

Л.Г.ПРИЩЕП



УЧЕБНИК СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРИКА



РЕГУЛЯРНЫЙ ИНСТРУКТАЖ РАБОТАЮЩИЕ

ДОЛЖНЫ ПРОХОДИТЬ ЛИЦА, С ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАМИ



НА МАШИНАХ
С ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ



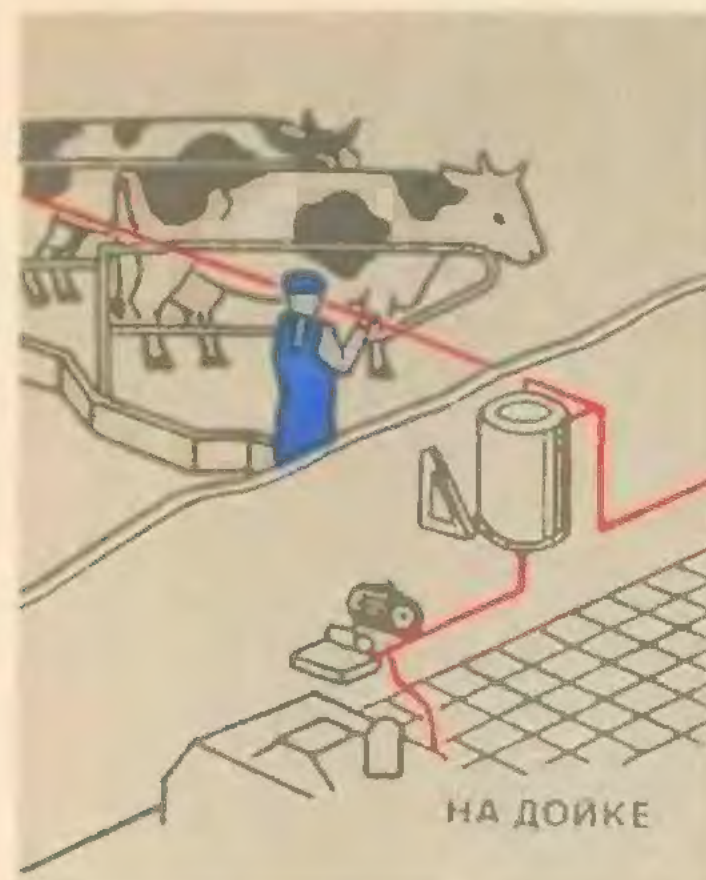
НА СТРИЖКЕ



ПРИ ОБЛУЧЕНИИ
И ОБОГРЕВЕ
МОЛОДНЯКА



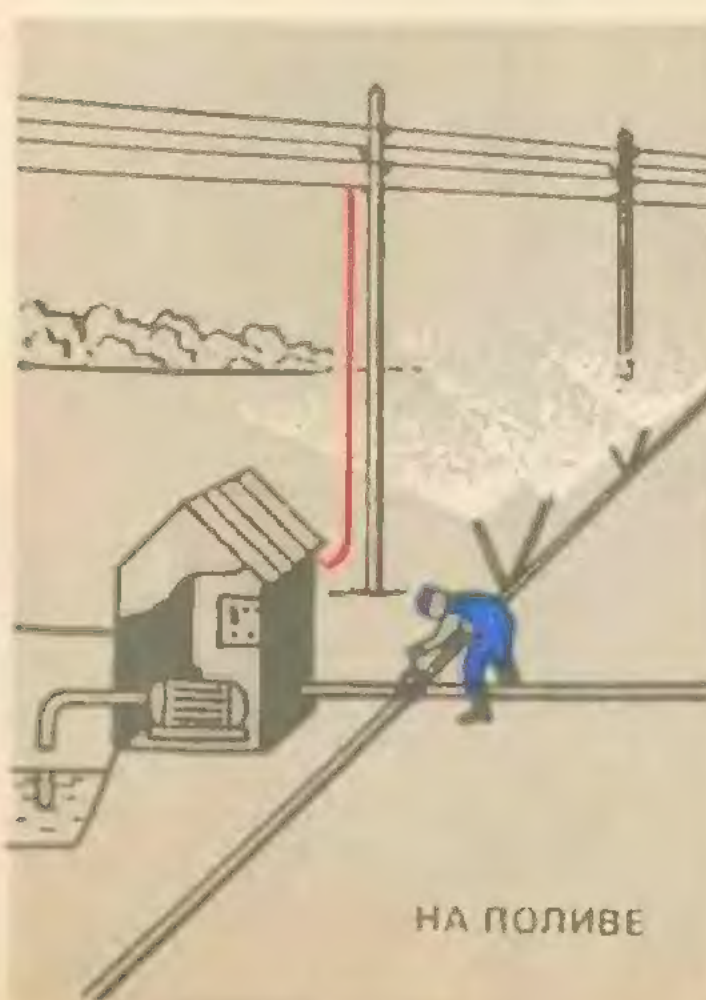
В МАСТЕРСКИХ



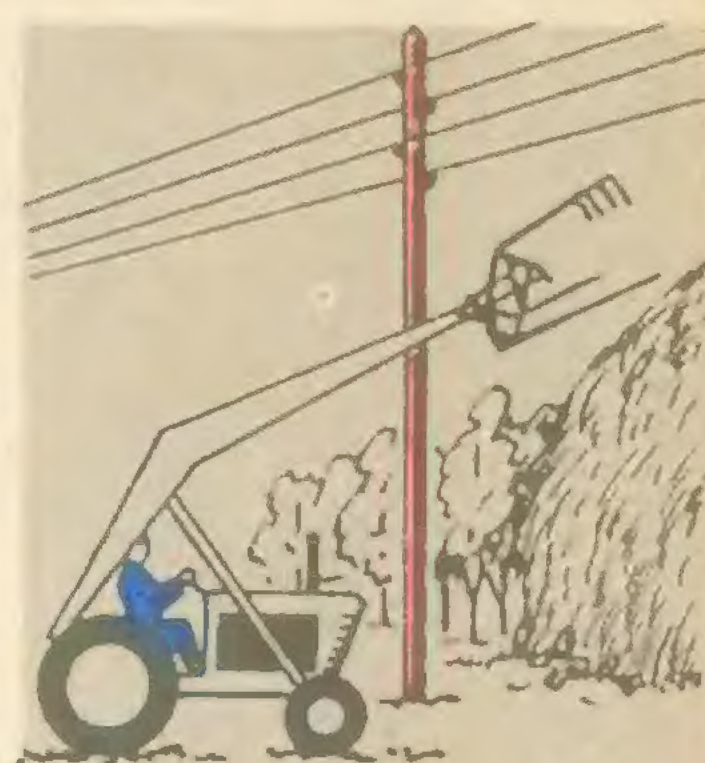
НА ДОЙКЕ



В СООРУЖЕНИЯХ
ЗАЩИЩЕННОГО ГРУНТА



НА ПОЛИВЕ



У ЛИНИЙ
ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

ББК 40.7

П77

УДК 631.371 : 621.3(075.3)

Автор — академик ВАСХНИЛ *Л. Г. Прищеп*

Рецензенты: доктор технических наук, профессор
В. В. Шевченко и кандидат технических наук, доцент
Е. А. Конюхова (МЭИ)

Прищеп Л. Г.

П 77 Учебник сельского электрика. — 3-е изд., доп. и перераб. —
М.: Агропромиздат, 1986. — 509 с.: ил. — (Учебники и учеб.
пособия для подгот. кадров массовых профессий).

Книга предназначена в качестве учебника для сельских профтехучилищ. В ней даны необходимые сведения по практической электротехнике, подробно рассмотрены вопросы теории и практики производства, распределения и применения электрической энергии в сельском хозяйстве, эксплуатации электроустановок и техники безопасности, а также приведен ряд сопутствующих материалов. Учебник может быть использован при профессиональном обучении рабочих на производстве. Второе издание вышло в 1981 году.

П 3802040200—184
035(01)—86 143—86

ББК 40.7

ВВЕДЕНИЕ

В двенадцатой пятилетке и в последующие годы в соответствии с решениями XXVII съезда КПСС предусматривается интенсивное развитие экономики страны, ускорение научно-технического прогресса. Это будет новый этап научно-технической революции, который должен обеспечить значительное повышение производительности труда, экономию ресурсов, улучшение качества продукции.

Ведущая роль в выполнении планов ускорения социально-экономического развития страны принадлежит энергетике, подавляющую часть ресурсов которой составляют невозобновляющиеся источники топлива — нефть, газ, уголь, расходуемые на тепловые цели или для получения электроэнергии. Существенная, постоянно увеличивающаяся доля электроэнергии вырабатывается и на атомных электростанциях, где используется ядерное топливо (уран, торий).

Все более возрастающее внимание в стране уделяется использованию и возобновляющихся энергоресурсов — энергии рек, солнца, а также биомассы.

Одним из главных критериев в развитии материально-технической базы в стране является ресурсо- и энергосбережение. Здесь прежде всего имеется в виду развитие энергосберегающих и безотходных технологий, применение более рациональных методов использования топлива и электроэнергии и т. д.

Развитие электрификации сельского хозяйства — неперенное условие научно-технического прогресса и интенсификации сельскохозяйственного производства. Именно электрификации в современных условиях принадлежит ведущая роль в росте производительных сил общества.

Инициатором электрификации нашей страны был В. И. Ленин. Под его руководством в 1920 г. был принят первый в мировой практике Государственный план комплексного развития народного хозяйства на базе электрификации — план ГОЭЛРО, который сыграл огромную роль в жизни нашей страны, положив начало формированию научно обоснованных пятилетних планов развития народного хозяйства.

В сельском хозяйстве электрическая энергия используется для привода стационарных машин, для освещения и облучения в производстве и быту. В перспективе с развитием ядерной энергетики все большая доля электроэнергии будет использоваться и на тепловые процессы: обогрев, сушку продукции, обеспечение микроклимата в сооружениях защищенного грунта, в животноводстве и т. д.

Наибольший эффект от электрификации обеспечивается при полном переводе на электропривод и автоматическое управление всех

рабочих операций технологических процессов, и прежде всего самых трудоемких — в растениеводстве и животноводстве. Возрастают требования к надежности электроснабжения, которое осуществляется от государственных энергосистем. Потребление электроэнергии в сельском хозяйстве возрастает за каждые 10 лет примерно в два раза.

Преимущества электрической энергии перед другими видами энергии заключаются в простоте и экономичности ее передачи на большие расстояния, легком распределении между потребителями разной мощности, высоком уровне гигиенических условий ее применения. Электрическая энергия легко превращается в механическую энергию движения, в тепловую с автоматическим регулированием температуры, в видимое и невидимое излучения, в электромагнитные колебания, которые используются не только для передачи информации на расстояние, но и для воздействия на биологические объекты при сушке, лечении, обогреве и т. д. Электрическая энергия создает широкие возможности для построения автоматизированных линий по производству и переработке продукции, которые можно объединять в цехи-автоматы.

Сельским энергетикам предстоит решать большой круг задач не только по правильному выбору направлений электрификации и автоматизации производственных процессов, но и по надежности и качеству монтажных работ, по эффективным методам эксплуатации электроустановок, по организации рационального потребления электрической энергии, по обеспечению безаварийной и безопасной работы установок, по всемерной экономии энергии путем предотвращения ее потерь, повышения коэффициента мощности, правильного подбора электрооборудования к рабочим машинам, по умению правильно спланировать работу установок в течение суток, составить график их включения в наиболее благоприятные для энергосистем часы. Весьма ответственная задача — обеспечить безопасность обслуживающего персонала и правила противопожарной безопасности.

Научно-технический прогресс в сельском хозяйстве предопределяет повышенные требования к подготовке специалистов по электрификации сельскохозяйственного производства, особенно через систему профессионально-технического образования. Выполнению этой ответственной задачи призван служить «Учебник сельского электрика». В нем отмечена роль отечественных ученых в развитии электротехники и электрификации, учтены новые достижения современной науки и техники. Автор учел замечания рецензентов, а также читателей.

Параграфы 1.1, 12.1, 12.2, 12.3 и 15.7 написаны автором совместно с В. А. Прищепом.

Глава 1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ
ЗАРЯДЫ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ
(ЭЛЕКТРОСТАТИКА)

1.1. ПРИРОДА ЭЛЕКТРИЧЕСТВА.
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВ

Энергия есть мера движения материи.

Различные виды энергии — это проявления тех или иных форм движения материи. *Механическая энергия* проявляется при механическом движении тел, *тепловая* — при молекулярно-атомном движении, *атомная* — при ядерных реакциях внутри атомов, *химическая* — при химических реакциях веществ, *электромагнитная* — в электромагнитных процессах.

Электрическая энергия — это та часть электромагнитной энергии, за счет которой в приборе, включенном в электрическую цепь, выделяется теплота, свет, происходит электролиз, появляется механическое усилие и т. д.

Электричество — это понятие, определяющее всю совокупность явлений, связанных с существованием, движением и взаимодействием электрических зарядов. В обиходе, однако, электричеством часто называют электрическую энергию, потребляемую от источников электрической энергии.

Каждое вещество состоит из *химических элементов*, которые представляют собой простые природные образования (например, водород, кислород, медь, алюминий). Соединения же различных элементов составляют сложные вещества (например, воду, кислоту, окись меди и т. д.).

Всякий элемент состоит из очень маленьких частиц, обладающих свойствами данного элемента, — *атомов*, которые уже не могут быть разложены на более мелкие частицы химическим путем. Атомы различных элементов отличаются друг от друга атомным весом.

Мельчайшей частицей сложного вещества является *молекула*, представляющая собой соединение атомов различных элементов. В молекулярном состоянии, когда два атома образуют одну молекулу, находятся газообразные элементы — водород, кислород и др. Атомы инертных газов — гелия, неона, аргона, криптона, ксенона — в молекулы не соединяются. Молекула воды состоит из двух атомов водорода и одного атома кислорода. Число атомов у некоторых белковых веществ доходит до нескольких тысяч.

В свою очередь, атом является сложным образованием из *элементарных частиц* вещества, уже не обладающих свойствами данного химического элемента. В соответствии с современной электронной

теорией строения вещества в атоме различают *ядро* и вращающиеся вокруг него *электроны*.

Ядро атома состоит из *нейтронов* — частиц, не обладающих электрическим зарядом, и *протонов* — частиц, имеющих положительный заряд. Таким образом, ядро обладает положительным зарядом. Вокруг ядра по разным орбитам вращаются электроны, имеющие отрицательный заряд. Заряд протона численно равен заряду электрона, в то время как масса электрона в 1836 раз меньше массы протона. Те электроны, которые вращаются на внутренних орбитах, прочно удерживаются в атоме, а электроны с внешних орбит могут легко покидать атом, находясь в свободном состоянии или присоединяться к другим атомам. Атом, потерявший один или несколько электронов, приобретает положительный заряд.

Кроме нейтрона, электрона и протона, обнаружено еще более 100 элементарных частиц, но многим из них свойствен весьма малый срок жизни, измеряемый миллионными долями секунды.

Свободные электроны могут быть выделены из вещества, если им сообщить некоторую дополнительную энергию, достаточную для того, чтобы преодолеть внутриатомные силы притяжения (например, нагреть или облучить вещество, подвергнуть его воздействию света или электрического поля и т. п.). Свободные электроны во многом определяют электрические и химические качества вещества.

Высокая электрическая проводимость металлов объясняется наличием большого числа свободных электронов. Направленное движение потока свободных электронов вдоль металлического проводника называется *электрическим током проводимости*.

Электрическими проводниками первого рода называются металлы и сплавы металлов, обладающие свободными электронами и вследствие этого — электронной проводимостью. В электротехнике для изготовления проводников широко используют медь, алюминий, сталь.

Проводниками второго рода называются жидкости, хорошо проводящие электрический ток. Это различные электролиты, например водные растворы серной кислоты H_2SO_4 , едкого натра $NaOH$, медного купороса $CuSO_4$ и т. д. Во всяком электролите происходит распад молекул (диссоциация молекул) на составные части — разноименно заряженные *ионы* — и одновременно с этим идет процесс воссоединения разноименных ионов (молизация) в нейтральные молекулы. Упорядоченное и направленное движение потока ионов в электролите под действием сил электрического поля называется *ионным электрическим током*.

Изоляторами, или диэлектриками, называют вещества, которые практически не проводят электрического тока. К ним относят стекло, фарфор, эбонит, каучук, слюду, минеральные масла, кристаллы солей и т. д. Под действием сил электрического поля диэлектрик может *поляризоваться*, то есть электроны и ионы, находящиеся в связанном состоянии, ориентируются под действием поля, смещаясь на ничтожно малые расстояния, и создают свое электрическое поле. Эти связанные заряды не могут перемещаться и их нельзя, например,

отвести в землю. Однако созданное ими электрическое поле может воздействовать на конфигурацию внешнего поля, вызвавшего поляризацию.

Полупроводниками называют вещества, которые по своим свойствам электрической проводимости занимают среднее положение между проводниками и изоляторами. К ним принадлежат селен, кремний, германий, графит, карборунд, сернистые соединения и т. д.

В полупроводниках, как и в металлах, электрический ток представляет собой движение электронов. Однако характер этого движения имеет существенные особенности, которые обуславливают свойства полупроводников. Наряду с перемещением свободных электронов происходит перемещение и положительных зарядов. То место полупроводника, где вместо нейтрального атома имеется положительный ион, называют «дыркой» и говорят, что ток в полупроводнике представляет собой движение электронов против поля и «дырок» — по полю.

В идеально чистом полупроводнике без всяких примесей каждому освобожденному тепловым или световым воздействием электрону соответствовало бы образование одной дырки, и число электронов и дырок было бы одинаковым. Однако в полупроводниках всегда есть некоторое количество примесей, которые нарушают это равновесие и меняют свойства полупроводников. В одних случаях примеси создают избыток свободных электронов и тогда полупроводники называют *электронными (n-типа)*; в других случаях примеси создают избыток «дырок» и получаются *дырочные полупроводники (p-типа)*.

Наряду с полупроводниками *n*-типа и *p*-типа могут быть и полупроводники смешанного типа, в которых заметную роль играют и электронная и дырочная проводимости.

Свободные заряды в полупроводниках возникают под воздействием теплоты, света, потока электронов и других видов энергии, получаемых от посторонних источников. В современной технике широко используются такие свойства полупроводников, как односторонняя электрическая проводимость (в полупроводниковых выпрямителях — диодах и триодах — на основе селена, германия, кремния и др.); изменение проводимости под действием электрического поля (в усилителях сигналов — триодах), освещения, облучения (в различных фоторезисторах), температуры (в термисторах и позисторах); появление электродвижущих сил при освещении, облучении, нагреве и других воздействиях (в фотоэлементах, термоэлементах и других приборах).

Газы в естественном состоянии не проводят электрического тока. Это объясняется тем, что атомы и молекулы газов в естественном состоянии представляют собой нейтральные, незаряженные частицы, то есть не являются носителями заряда, создающими электрический ток. Но эти отрицательные и положительные частицы могут быть образованы под воздействием излучений (ультрафиолетовых, рентгеновских и др.), света, высокой температуры, ударов быстролетающих электронов, ионов, атомов. Этот процесс называется *ионизацией*.

Возникновение электрического тока в газе связано с его электрическим пробоем при наложении электрического поля. При снятии поля

газ восстанавливает свои свойства (в то время как полупроводники и диэлектрики не восстанавливают своих свойств после пробоя).

Различают тлеющий, искровой, дуговой и коронный разряды.

Тлеющий разряд возникает при давлении в несколько десятков паскалей. Газ при таком разряде хорошо проводит электричество и в нем поддерживается достаточная ионизация до тех пор, пока на электродах поддерживается необходимое напряжение. Тлеющий разряд используется в газоразрядных лампах.

При увеличении напряжения между электродами до пробивного значения (для воздуха 30 кВ/см) возникает искровой разряд, когда газ мгновенно утрачивает свои изолирующие свойства. Механизм пробоя объясняется следующим образом. В газе всегда есть некоторое количество ионов и электронов, возникающих вследствие случайных причин. Однако этих частиц настолько мало, что газ практически не проводит электричества. При увеличении напряжения между электродами ионы и электроны приобретают значительную скорость в пространстве между электродами и, сталкиваясь с нейтральными молекулами, ионизируют их. Число токопроводящих частиц увеличивается лавинообразно до возникновения искры, то есть пробоя газа между электродами.

Искровой разряд при благоприятных для этого условиях может перейти в дуговой, который характеризуется значительной яркостью свечения, длительным током, малым сопротивлением промежутка между электродами и напряжением между ними порядка 40...60 В. Электроды при этом накаляются и поддерживают высокий уровень ионизации. Дуговой разряд применяется для электросварки, в электропечах и т. п.

Коронный разряд (вокруг проводника или острия электрода появляется свечение) возникает в высоковольтных установках из-за неоднородного электрического поля. Это свечение — корона возникает вследствие интенсивной ионизации в непосредственной близости от электродов, где напряженность поля достигает пробивного значения.

Корона может возникать на проводах высоковольтных электрических линий и приводить к потерям электрической энергии, создавать радиопомехи. В целях борьбы с короной увеличивают расстояние между проводами, заменяют один провод в фазе на несколько (расщепление фаз), увеличивают радиус провода, делая его полым. Все эти мероприятия позволяют уменьшить коронную напряженность, которая зависит также от метеоусловий и состояния поверхности проводов.

Полезное применение электрическая корона находит в машинах для обработки семян перед посевом, в ионизаторах воздуха, в электрофильтрах для очистки газов и воздуха в помещениях, в счетчиках элементарных частиц и т. д.

1.2. СИСТЕМЫ ЕДИНИЦ ИЗМЕРЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ, МАГНИТНЫХ И МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

Развитие науки и техники неразрывно связано с измерениями. Всякое измерение — это экспериментальное сравнение некоторой искомой величины с другой однородной величиной, принятой и узаконенной

в качестве *единицы*. Следовательно, для каждого конкретного измерения и для измерения вообще необходима узаконенная система единиц.

В настоящее время действует Международная система единиц измерения физических величин (СИ), единая, универсальная, охватывающая все отрасли науки, техники и народного хозяйства. Эта система связывает воедино единицы измерения механических, тепловых, электрических, магнитных и других величин. Международная система единиц применяется как предпочтительная во всех областях науки, техники и народного хозяйства. Все основные и некоторые производные единицы, которые упоминаются в настоящей книге, приведены в таблицах 1.1 и 1.2.

Для образования десятичных кратных и дольных единиц рекомендуется перечень приставок к основным единицам (табл. 1.3).

1.1. Основные единицы СИ

Величина	Единица		
	Наименование	Обозначение	
		русское	международное
Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s
Сила электрического тока	ампер	А	A
Термодинамическая температура	кельвин	К	K
Количество вещества	моль	моль	mol
Сила света	кандела	кд	cd
Дополнительные единицы СИ			
Плоский угол	радиан	рад	rad
Телесный угол	стерадиан	ср	sr

1.2. Производные единицы СИ, имеющие собственные наименования

Величина	Единица		Выражение производной единицы	
	наименование	обозначение	через другие единицы СИ	через основные единицы СИ
Частота	герц	Гц	—	c^{-1}
Сила	ньютон	Н	—	$m \cdot kg \cdot c^{-2}$
Давление	паскаль	Па	H/m^2	$m^{-1} \cdot kg \cdot c^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	джоуль	Дж	$H \cdot m$	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-2}$
Мощность, поток энергии	ватт	Вт	$Дж/с$	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3}$
Количество электричества, электрический заряд	кулон	Кл	$A \cdot c$	$c \cdot A$
Электрическое напряжение, электрический потенциал	вольт	В	$Вт/А$	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-1}$
Электрическая емкость	фарада	Ф	$Кл/В$	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot c^4 \cdot A^2$
Электрическое сопротивление	ом	Ом	$В/А$	$m^2 \cdot kg \cdot c^{-3} \cdot A^{-2}$

Величина	Единица		Выражение производной единицы	
	наименование	обозначение	через другие единицы СИ	через основные единицы СИ
Электрическая проводимость	сименс	См	A/V	$m^{-2} \cdot kg^{-1} \cdot s^3 \cdot A^2$
Поток магнитной индукции	вебер	Вб	$V \cdot s$	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Магнитная индукция	тесла	Тл	Vb/m^2	$kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-1}$
Индуктивность	генри	Гн	Vb/A	$m^2 \cdot kg \cdot s^{-2} \cdot A^{-2}$
Световой поток	люмен	лм	—	$cd \cdot sr$
Освещенность	люкс	лк	—	$m^{-2} \cdot cd \cdot sr$
Активность нуклида	беккерель	Бк	—	s^{-1}
Доза излучения	грэй	Гр	—	$m^2 \cdot s^{-2}$

* В эти два выражения входят наравне с основными единицами СИ дополнительная единица — стерадиан.

П р и м е ч а н и я. 1. Сокращенные обозначения единиц, получивших наименование в честь ученых (Ампера, Вольта, Ватта, Кельвина, Кулона, Ньютона, Ома, Паскаля, Сименса, Фарадея и др.), пишутся с заглавной буквы (А, В, Вт, К, Кл, Н, Ом, Па, См, Ф и т. д.).

2. Размер (размерность) данной производной величины — это выражение, показывающее, из каких основных единиц состоит данная производная.

3. Следует правильно применять наименования соответствующих величин. Так, недопустимо пользоваться терминами «вес» вместо «масса» с единицами «килограмм», «грамм», «тонна», «центнер», «карат», являющимися единицами массы, а не веса (сила тяжести). Нельзя применять термины «удельный вес», «объемный вес» и «насыпной вес» вместо терминов «плотность», «объемная масса» и «насыпная масса» с единицами $г/см^3$, $кг/м^3$, $т/м^3$, являющимися единицами плотности, объемной и насыпной массы.

1.3. Приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований

Приставка	Отношение к главной единице	Обозначение приставки		Приставка	Отношение к главной единице	Обозначение приставки	
		русское	международное			русское	международное
Атто	10^{-18}	а	a	Деци	10^{-1}	д	d
Фемто	10^{-15}	ф	f	Дека	10^1	да	da
Пико	10^{-12}	п	p	Гекто	10^2	г	h
Нано	10^{-9}	н	n	Кило	10^3	к	k
Микро	10^{-6}	мк	μ	Мега	10^6	М	M
Милли	10^{-3}	м	m	Гига	10^9	Г	G
Санти	10^{-2}	с	c	Тера	10^{12}	Т	T

1.3. СТАТИЧЕСКИЙ ЗАРЯД ТЕЛА И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Заряд тела. Из физики известны опыты получения зарядов трением (электризация) эбонитового стержня о фланель (отрицательный заряд) или стеклянного стержня о шелк (положительный заряд). Подобным образом при соответствующих условиях может быть заряжено любое вещество.

Если при этом тело получает избыток электронов, то считают, что оно заряжено отрицательно. Если же тело потеряло часть своих электронов, считают, что оно заряжено положительно.

Известно также, что одноименные заряды отталкиваются, разноименные — притягиваются. Силу взаимодействия зарядов определяют по закону Кулона: *два точечных заряда действуют друг на друга (притягиваются или отталкиваются) с силой, пропорциональной произведению зарядов и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними, то есть*

$$F = \frac{1}{\epsilon} \frac{q_1 q_2}{4\pi r^2}, \quad (1.1)$$

где F — сила взаимодействия электрических зарядов, Н; q_1, q_2 — электрические заряды, Кл; r — расстояние между зарядами, м; ϵ — диэлектрическая проницаемость среды, характеризующая электрические свойства пространства, Кл/(В · м), или Ф/м.

Диэлектрическую проницаемость обычно выражают так:

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0, \quad (1.2)$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная (электрическая проницаемость свободного пространства, или вакуума), Ф/м; $\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi \cdot 10^7}$; ϵ_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды (отвлеченное число, показывающее, во сколько раз диэлектрическая проницаемость среды больше диэлектрической проницаемости вакуума).

Диэлектрическая проницаемость воздуха $\epsilon_r = 1$; значения этой величины для некоторых материалов приведены ниже (см. табл. 1.4).

Электрическое поле между двумя разноименно заряженными телами, например между двумя пластинами, тем сильнее, чем больше заряд на пластинах и чем меньше расстояние между ними.

Если электрическое поле создано совокупностью зарядов, которые можно считать практически неподвижными в пространстве, его называют *электростатическим полем* («статический» означает «неподвижный»). Электростатическое поле характеризуется *потенциалом поля*. Потенциал данной точки электростатического поля равновелик такой работе, которую надо затратить, чтобы переместить единицу заряда (1 Кл) из-за пределов поля в данную его точку. Потенциал измеряется в вольтах. *Потенциал земли* принято считать равным нулю. Земной шар имеет заряд около $3 \cdot 10^5$ Кл.

Сила электростатического поля стремится перемещать заряды от точки с более высоким потенциалом в точку с меньшим потенциалом. Если, например, потенциал точки A равен φ_A , а потенциал точки B равен φ_B , то между точками A и B действует *электрическое напряжение*

$$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B, \quad (1.3)$$

то есть *напряжение равно разности потенциалов*.

Воображаемые линии, по которым стремится двигаться положительный заряд, лишенный инерции в электрическом поле, называют *электрическими силовыми линиями*.

Интенсивность электрического поля характеризуется *напряженностью*, обозначаемой буквой E . Напряженность электрического поля измеряется в вольтах на метр (В/м). Если напряжение между двумя

параллельными металлическими пластинами с однородной диэлектрической средой между ними и заряженными разноименными зарядами равно U (В), а расстояние между пластинами равно d (м), то напряженность электрического поля между пластинами

$$E = U/d. \quad (1.4)$$

Напряженность естественного поля у поверхности земли составляет 100...130 В/м. Это поле играет колоссальную роль в процессах жизнедеятельности растений и животных.

1.4. КОНДЕНСАТОРЫ

Две параллельные металлические пластины, разделенные диэлектриком (воздухом, бумагой, слоем стекла и т. д.) и находящиеся одна от другой на таком расстоянии, что заряды одной пластины влияют на заряды другой, образуют *конденсатор* (рис. 1.1). Если одну пластину конденсатора соединить с землей (заземлить), а на другой создать избыток электронов, то электроны с заземленной пластины, отталкиваясь, уйдут в землю, и эта пластина (рис. 1.2) окажется заряженной положительно.

Таким образом, на противоположных пластинах конденсатора останутся разноименные заряды, которые, притягиваясь друг к другу через диэлектрик, будут прочно удерживаться в конденсаторе. Напряжение между землей и не соединенной с ней пластиной называют *потенциалом по отношению к земле*.

Каждый конденсатор обладает определенной емкостью, то есть способностью вмещать определенный заряд. Емкость плоского конденсатора C (Ф) тем больше, чем больше площадь S (м²) пластины, чем больше диэлектрическая проницаемость ϵ (Ф/м) среды и чем меньше расстояние d (м) между пластинами:

$$C = \epsilon S/d. \quad (1.5)$$

Единица для измерения емкости — *фарада* (Ф). Однако широко используются и ее производные — микрофарада (мкФ), пикофарада (пФ): $1 \text{ Ф} = 10^6 \text{ мкФ} = 10^{12} \text{ пФ}$.

Одна фарада — это емкость такого проводника, потенциал которого изменяется на один вольт, если заряд увеличивается на один кулон.

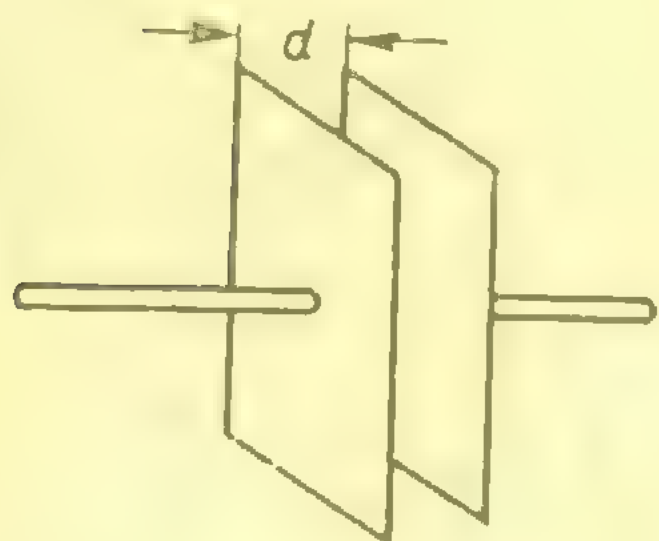


Рис. 1.1. Плоский конденсатор.



Рис. 1.2. Заряд конденсатора.

Заряд же в один кулон — это количество электричества, которое протекает в одну секунду через проводник при токе в один ампер.

Напряжение U на пластинках конденсатора емкостью C будет тем больше, чем больше сообщенный ему заряд Q :

$$U = Q/C,$$

откуда

$$C = Q/U. \quad (1.6)$$

Если конденсатор состоит из n пластин (соединенных между собой через одну), то его емкость определяется так:

$$C = (n - 1) \epsilon S/d. \quad (1.7)$$

В современной электротехнике и радиотехнике применяют конденсаторы переменной и постоянной емкости. По типу диэлектрика их подразделяют на воздушные, бумажные, слюдяные, керамические, электролитические. В паспорте конденсатора указываются его марка, номинальная емкость, рабочее напряжение, класс точности. Различают нулевой ($\pm 2\%$), первый ($\pm 5\%$), второй ($\pm 10\%$) и третий ($\pm 20\%$) классы точности конденсаторов, причем цифрой обозначают допустимые отклонения фактической емкости от номинальной.

В электрических установках находят применение конденсаторы, заполненные минеральным маслом или синтетической жидкостью (в обозначении конденсатора соответственно символы М и С). Например, конденсаторы ЛСМ, предназначенные для работы в цепях переменного тока частотой 50 Гц в пускорегулирующих аппаратах люминесцентных ламп (символ Л), имеют пропитку синтетической жидкостью (символ С). Символ М означает малогабаритный. Выпускаются эти конденсаторы на 240...400 В емкостью от 2,5 до 100 мкФ.

Ниже приведены общие сведения о конденсаторах, используемых в радиотехнике, в схемах управления и автоматики.

В *воздушных конденсаторах* диэлектрической средой между алюминиевыми пластинками служит воздух. Воздушные конденсаторы постоянной емкости применяются редко из-за их громоздкости.

В *бумажных конденсаторах* (КБ, КБГ, БМ, БГМ и т. д., где Г означает герметизированный) в качестве диэлектрика используется специальная тонкая конденсаторная бумага, пропитанная изоляционным составом. Обкладками служат две ленты из тонкой металлической фольги. Они свернуты в рулон, вложены в металлический корпус и залиты изоляционным составом.

В *металло-бумажных конденсаторах* (типа МБГ, МБМ и др.) обкладки изготавливают путем напыления металла (металлизация) на бумажные ленты, пропитанные изоляционным составом и покрытые тонким слоем лака. Подобные обкладки имеют очень малую толщину.

В *слюдяных конденсаторах* между обкладками из фольги прокладывают тонкие слюдяные пластинки или металлизуют на них тончайший слой серебра.

В *керамических конденсаторах* диэлектриком является высококачественная керамика: ультрафарфор, тиконд, ультрастеатит и др. Обклад-

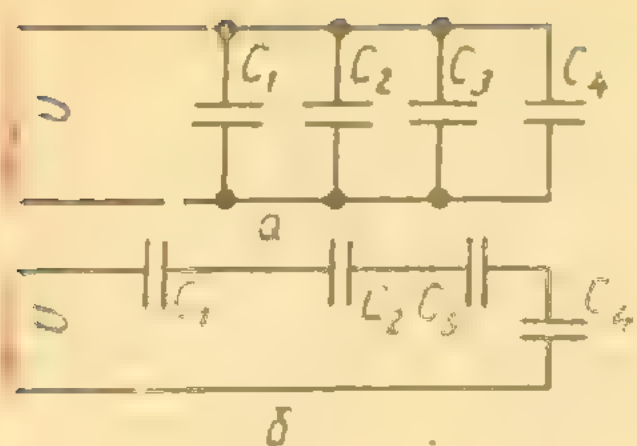


Рис. 1.3. Параллельное (а) и последовательное (б) соединение конденсаторов.

кой служит слой серебра, нанесенный на поверхность керамики металлизацией.

Наряду со слюдяными и керамическими применяются пленочные конденсаторы, в которых диэлектриком служат полистироловые и фторопластовые пленки.

В электролитических полярных конденсаторах (КЭ, ЭМ и др.) диэлектриком служит тонкий слой окиси, нанесенный на ленту из тонкой фольги электролитическим способом. Другая обкладка (катод) образуется из пропитанной электролитом и плотно прилегающей к покрытой окисью поверхности фольги бумажной ленты.

При включении полярных электролитических конденсаторов нужно обязательно соблюдать полярность. В цепи переменного тока возможно лишь кратковременное их включение.

В электролитических неполярных конденсаторах обе обкладки имеют оксидный слой.

Емкость электролитических конденсаторов может быть очень велика — до нескольких тысяч микрофарад — при относительно малых габаритных размерах самого конденсатора. Это объясняется тем, что расстояние между обкладками конденсатора (электролит — анидная лента) очень мало.

При параллельном соединении конденсаторов (рис. 1.3, а), общая емкость батарей $C_{об}$ равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{об} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4. \quad (1.8)$$

При последовательном соединении конденсаторов (рис. 1.3, б) величина, обратная общей емкости, равна сумме величин, обратных емкостям отдельных конденсаторов:

$$\frac{1}{C_{об}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}. \quad (1.9)$$

1.5. РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРОВ.

ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ ДИЭЛЕКТРИКА

Если обе обкладки конденсатора соединить между собой через значительное сопротивление, то заряды на них выравняются через промежуток времени тем больший, чем больше значение сопротивления, а следовательно, чем меньше сила тока, протекающего с одной обкладки конденсатора на другую. Если обкладки соединить накоротко или через малое сопротивление, то разряд конденсатора произойдет практически мгновенно и будет сопровождаться электрической искрой. Если же напряжение на обкладках конденсатора увеличивать, то может наступить момент, когда разряд произойдет через диэлектрик, находящийся между пластинами конденсатора. Это явление называется пробоем диэлектрика. Диэлектрик при этом теряет свои первоначальные свойства.

Каждому диэлектрику соответствует определенное пробное напря-

жесткие, или электрическая прочность, выраженная в киловольтах на миллиметр.

В таблице 1.4 приведены некоторые технические показатели электроизоляционных материалов.

1.4. Некоторые показатели электроизоляционных материалов

Материал	Плотность, г / см ³	Электрическая прочность при 20°C, кВ / мм	Относитель- ная диэлект- рическая проницае- мость ϵ_r при 50 Гц и 20°C	Удельное объемное сопротивле- ние при 20°C, Ом · м
Асбестоцемент	1,7	2,5	7,0	10^6
Битумы	1,0	17,5	3,0	10^{12}
Бумага	0,78	7,5	3,0	10^{11}
Винипласт	1,37	22,5	4,0	10^{12}
Гетинакс	1,35	22,0	7,0	10^9
Древесина	0,7	4,0	3,5	$2 \cdot 10^6$
Мрамор	2,7	2,5	8,0	10^6
Оргстекло (полиметакрилат)	1,2	30	3,7	10^{11}
Парафин	0,85	27	2,1	10^{15}
Полиэтилен	0,94	42	2,3	10^{14}
Слюда	2,78	135	6,5	10^{12}
Фарфор	2,4	25	7,0	10^{11}
Фибра	1,1	5	6,0	10^7
Шифер	2,8	1	7,0	10^6
Эбонит	1,2	17	3,0	10^{12}
Электрокартон	1,1	22	2,0	10^7

Для воздуха пробивное напряжение составляет 22 кВ/см, то есть если к обкладкам воздушного конденсатора подвести напряжение из расчета 22 кВ/см, то произойдет искровой разряд конденсатора через воздух — пробой диэлектрика. Например, природные грозовые явления — молнии и гром — это колоссальный разряд через воздух естественного конденсатора, образованного грозовой тучей и землей или двумя грозowymi тучами.

1.6. СТАТИЧЕСКОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Внешнюю броню электрического кабеля, металлические корпуса и кожухи приборов также можно считать обкладками конденсаторов; другой обкладкой для них являются токоведущие жилы или катушки приборов. Если на кабель или приборы подается напряжение, то броня или кожухи заряжаются электричеством, противоположным по знаку электричеству в токоведущих частях. При выключении электрического тока эти заряды могут остаться как на внешних оболочках, так и на внутренних токоведущих частях. Они представляют собой весьма существенную угрозу с точки зрения электробезопасности. Это одна из причин, по которой все кожухи и корпуса электрических приборов необходимо заземлять, то есть соединять с землей (сопротивление растеканию не должно превышать 100 Ом).

Статическое электричество возникает также при трении приводных ремней о шкивы машин и вообще везде, где есть движение, трение, сжатие, дробление и др. Если, например, приводимая в движение машина изолирована от земли деревянной рамой, то вследствие постоянного трения ремня о шкив корпус машины заряжается статическим электричеством. Этот заряд может оказаться весьма опасным для обслуживающего персонала, а также вызвать искрение, пожар, взрыв.

Во избежание несчастных случаев необходимо заземлять корпуса машин, имеющих ремennую передачу, даже в том случае, когда приводной двигатель тепловой или другого типа.

Потенциалы по отношению к земле могут приобретать корпуса автомобилей во время движения на больших скоростях по изолирующим покрытиям дорог и — что особенно опасно — корпуса цистерн при наливе, сливе и транспортировке в них горючих и взрывоопасных веществ.

Для борьбы со статическим электричеством, кроме обычного заземления, которое в ряде случаев может оказаться малоэффективным, применяют ряд способов увеличения поверхностной и объемной электрической проводимости диэлектрика. Так, увлажнение воздуха до 65...75% существенно увеличивает поверхностную электрическую проводимость. Еще в большей мере проводимость диэлектриков можно увеличить, применяя антистатические гигроскопические и поверхностно-активные вещества. К первым относятся гликоль, глицерин, сорбит, неорганические соли CaCl_2 , MgCl_2 и др. Поверхностно-активные вещества имеют различные составы в зависимости от материалов, для покрытия которых они предназначаются. Применяя электропроводящие наполнители (сажа, алюминиевая пудра, графит, цинковая пыль и др.), можно резко повысить проводимость материала. Используют также различные нейтрализаторы зарядов — электрические, индукционные, высоковольтные, высокочастотные, радиоактивные (о последних см. гл. 23).

Говоря о том вреде, который наносит статическое электричество народному хозяйству, и о тех опасностях, которые связаны с ним, не следует забывать, что статическое электричество можно использовать для высококачественной окраски изделий, очистки воздуха от пыли и продуктов сгорания, попадающих в атмосферу из заводских труб, а также для других целей. В этих случаях необходим специальный источник статического электричества (гл. 24).

Контрольные вопросы к главе I. 1. Дать определение различным видам энергии. Что понимают под термином «электрическая энергия»? 2. В чем отличие проводников первого рода от проводников второго рода? 3. В чем заключается разница между проводниками и полупроводниками, полупроводниками и изоляторами? 4. Как взаимодействуют одноименные и разноименные электрические заряды? Как меняется сила взаимодействия в зависимости от расстояния между зарядами? 5. Как связаны между собой электрическое напряжение, разность потенциалов в отдельных точках, напряженность? 6. Как определить емкость плоского конденсатора? Чему равна общая емкость двух конденсаторов по 10 мкФ, соединенных последовательно и параллельно? 7. Что такое пробой диэлектрика? Чему равно пробивное напряжение для воздуха, бумаги, полиэтилена, фарфора, шифера? 8. Где и как может возникнуть статический заряд и какие меры защиты от него следует принимать?

Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. ЭЛЕМЕНТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ. ЗАКОН ОМА

Элементы цепи. Электрическая цепь состоит из источника энергии и его приемников, в которых электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии — тепловую, лучистую, механическую и т. д.

В качестве источников энергии в цепи могут использоваться электрохимические источники, солнечные батареи, термоэлектротеплопреобразователи, электрические генераторы.

На полюсах источника энергии получаются различные уровни электрических зарядов, которые стремятся выровняться через электрическую цепь под действием *электродвижущей силы* (ЭДС), подобно тому, как уровни воды в различных сосудах, соединенных между собой трубкой, стремятся выровняться под действием давления водяного столба.

ЭДС имеет одинаковую природу с *напряжением*. В цепи с источником тока ЭДС равна напряжению на зажимах источника тока при отсутствии тока в цепи, то есть при разомкнутой внешней цепи.

Принято считать, что ток во внешней цепи направлен от положительного полюса (+) к отрицательному (-), то есть как бы от верхнего уровня к нижнему.

Различают источники ЭДС и источники тока. У идеального источника ЭДС напряжение на зажимах не должно меняться при любых токах нагрузки. В реальных условиях, однако, всякий источник ЭДС обладает собственным внутренним сопротивлением, на котором происходит потеря напряжения при протекании тока в цепи. Поэтому на зажимах реального источника ЭДС напряжение меняется в некоторых пределах в зависимости от тока нагрузки. На схемах реальный источник ЭДС изображают как последовательно соединенные источник ЭДС и его внутреннее сопротивление (рис. 2.1, а).

В цепи с идеальным источником тока должен оставаться неизменным ток при любом сопротивлении приемника энергии. В реальных условиях в цепи, подключенной к источнику тока, сила тока меняется в некоторых пределах в зависимости от сопротивления приемника. Такой реальный источник тока на расчетных схемах изображают как идеальный, но с включенным на его зажимах параллельным резистивным элементом, сопротивлению которого равно внутреннему сопротивлению источника (рис. 2.1, б).

Закон Ома. В замкнутой цепи, изображенной на рисунке 2.2, а, сила тока на всех участках цепи одинакова. Она зависит от ЭДС E источника и полного сопротивления R — величины, характеризующей противодействие электрической цепи току, и определяется *законом Ома*, выражающим зависимость между ЭДС E (В), силой тока I (А) и сопротивлением R (Ом):

$$I = E / R. \quad (2.1)$$

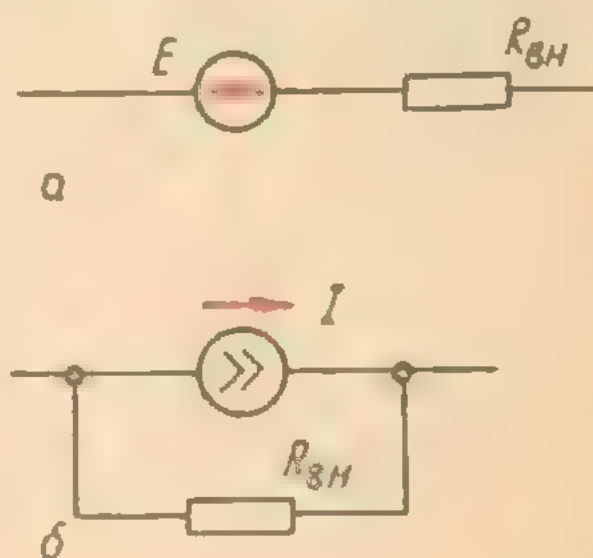


Рис. 2.1. Схемы замещения источников ЭДС (а) и тока (б).

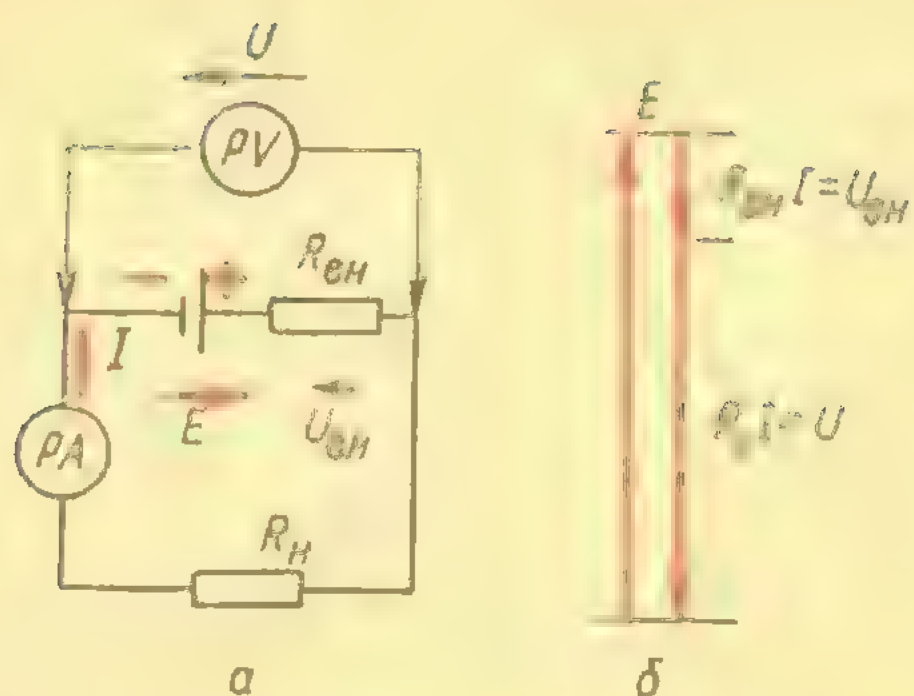


Рис. 2.2. Замкнутая цепь (а) и графическое изображение распределения в ней напряжений и ЭДС (б):

E — ЭДС источника; $R_{\text{вн}}$ — внутреннее сопротивление источника тока; $R_{\text{н}}$ — внешнее сопротивление цепи; PV — вольтметр, включенный параллельно нагрузке $R_{\text{н}}$; PA — амперметр, включенный последовательно с $R_{\text{н}}$.

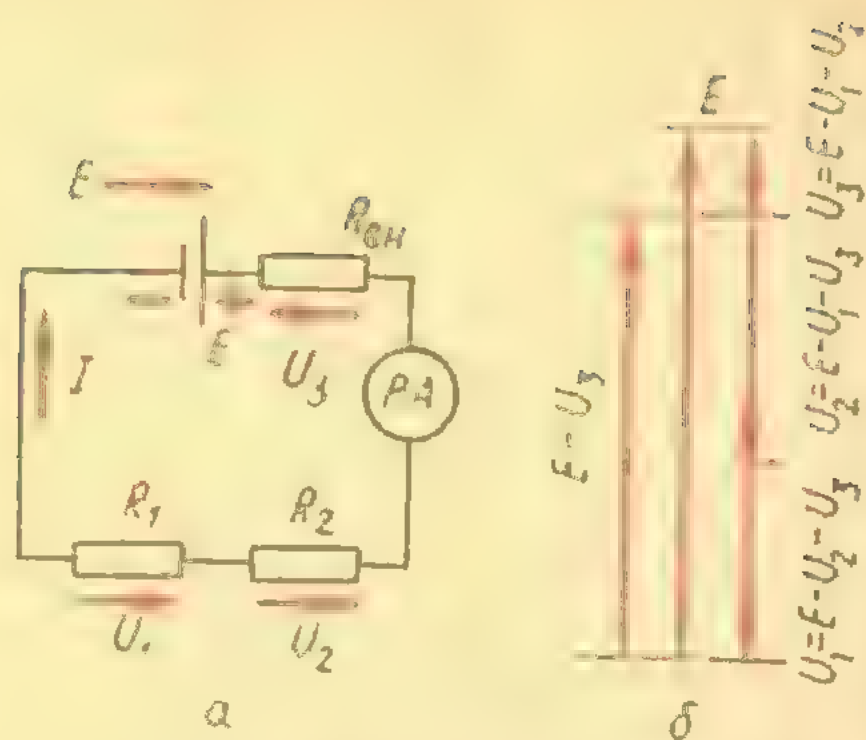


Рис. 2.3. Замкнутая цепь (а) и графическое изображение распределения напряжений на элементах цепи (б).

Сопротивление всей цепи R равно сумме сопротивлений наружного (внешнего) участка цепи R и внутреннего сопротивления источника тока $R_{\text{вн}}$:

$$R = R_{\text{н}} + R_{\text{вн}}.$$

Закон Ома может быть применен и ко всей цепи, и к отдельным ее участкам. Так, для электрической цепи, изображенной на рисунке 2.3, а, можно написать:

$$I = U_1/R_1; I = U_2/R_2; I = U_3/R_{\text{вн}}, \quad (2.2)$$

где I — сила тока в цепи; U_1 — напряжение на сопротивлении R_1 ; U_2 — напряжение на сопротивлении R_2 ; U_3 — напряжение на внутреннем сопротивлении источника тока $R_{\text{вн}}$.

Сумма напряжений на отдельных участках цепи равна ЭДС источника:

$$U_1 + U_2 + U_3 = E. \quad (2.3)$$

Из этого равенства следует, что напряжения и общая ЭДС в цепи имеют разные знаки. Для большей наглядности и уяснения взаимодействия напряжений на элементах цепи и ЭДС источника можно прибегнуть к графическому изображению (рис. 2.2, б и 2.3, б). Здесь длина отрезков, представляющих напряжения, пропорциональна их значениям (отрезки взяты в масштабе).

Стрелками на расчетных схемах указывают положительное направление ЭДС, напряжений и токов.

Если сопротивление внешней цепи $R_{\text{н}}$ стало небольшим по сравнению с внутренним сопротивлением $R_{\text{вн}}$ источника и можно считать, что оно равно нулю, то в цепи возникает режим короткого замыкания источника энергии. Сила тока I_k при этом может достигать очень больших значений, так как сопротивление $R_{\text{вн}}$ во много раз меньше сопротивления токоприемников. Сила тока короткого замыкания

$$I = U/R$$

Короткое замыкание происходит, например, при повреждении изоляции, когда провода, идущие от источника тока к токоприемнику, соединяются (замыкаются) между собой.

В общем случае закон Ома может быть записан в трех вариантах:

$$I = U/R; U = IR; R = U/I. \quad (2.4)$$

Следует заметить, что закон Ома в том виде, в каком он рассмотрен нами, применим только к цепям постоянного тока и цепям переменного тока с активным сопротивлением (лампы накаливания, нагревательные приборы, резисторы). Активным называется такое сопротивление, в котором происходит необратимый процесс превращения электрической энергии в другой вид энергии (теплота, свет и т. д.).

2.2. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ, ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТОРОВ

Параллельное и последовательное соединение. На рисунке 2.4, а и б показано параллельное соединение двух и трех резисторов, а на рисунке 2.4, в — последовательное соединение трех резисторов. При параллельном соединении концы резисторов сходятся в общие узловые точки и каждый резистор оказывается включенным на общее напряжение, приложенное к узловым точкам А и В (рис. 2.4, а) и С и D (рис. 2.4, б). При последовательном соединении резисторы включают один за другим, то есть начало последующего резистора — к концу предыдущего. В цепи таким соединением протекает общий ток для всех резисторов.

Цепи, изображенные на рисунке 2.4, а и б, относятся к разветвленным цепям, в которых имеются точки, где сходятся три и более проводников

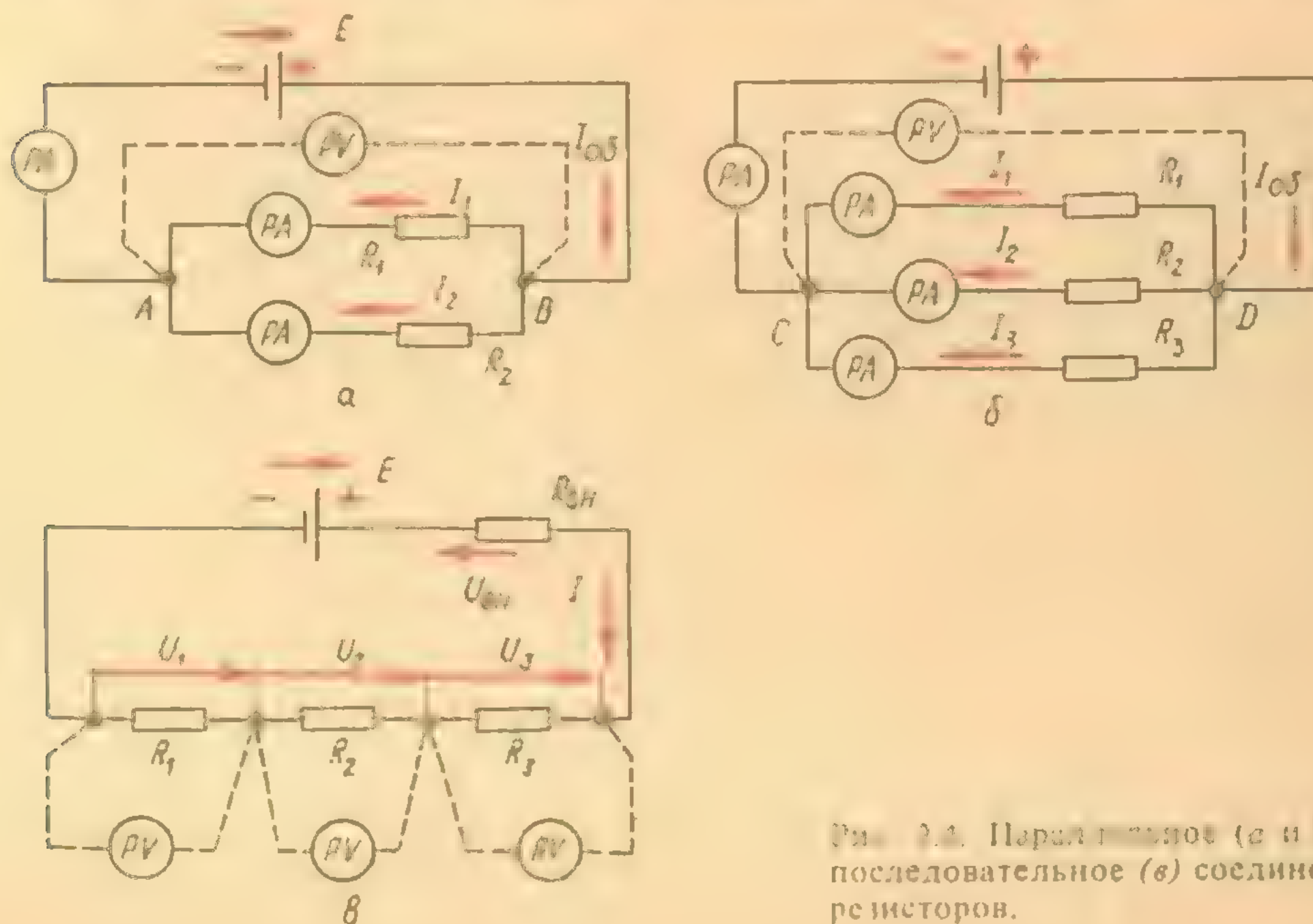


Рис. 2.4. Параллельное (а и б) и последовательное (в) соединения резисторов.

(точки A, B, C, D). Эти точки называют узлами. Участки цепи, соединяющие два узла (A и B, C и D), называют ветвями цепи. При установившемся электрическом токе количество электричества, притекающего в единицу времени к узлу, равно количеству электричества, утекающего от узла за тот же период, то есть сумма токов, направленных к узлу, равна сумме токов, направленных от узла, или

$$\Sigma I = 0. \quad (2.5)$$

Это равенство является выражением первого закона Кирхгофа, который гласит: *алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.*

В соответствии с этим законом для точки B (рис. 2.4, a)

$$I_1 - I - I_2 = 0,$$

или

$$I_1 + I_2 = I_{об}; \quad (2.6)$$

для точки D (рис. 2.4, b)

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_{об}. \quad (2.7)$$

Общее сопротивление цепи при параллельном соединении определяют следующим образом. Для каждой из ветвей между точками A и B (рис. 2.4, a) по закону Ома можно написать:

$$U = I_1 R_1 \text{ или } I_1 = U / R_1; \quad (2.8)$$

$$U = I_2 R_2 \text{ или } I_2 = U / R_2, \quad (2.9)$$

где U — напряжение между точками A и B , измеренное вольтметром.

Если общее сопротивление параллельных ветвей цепи между A и B записать как $R_{об}$, а общий ток I как сумму токов, то по закону Ома

$$U = I_{об} R_{об} = (I_1 + I_2) R_{об}, \quad (2.10)$$

или

$$I_1 + I_2 = U / R_{об}. \quad (2.11)$$

Складывая левые и правые части формул (2.8) и (2.9), получают:

$$I_1 + I_2 = U / R_1 + U / R_2. \quad (2.12)$$

Из формул (2.11) и (2.12) следует, что

$$U / R_{об} = U / R_1 + U / R_2. \quad (2.13)$$

Сократив U , находят:

$$1 / R_{об} = 1 / R_1 + 1 / R_2 \quad (2.14)$$

Значит,

$$R_{об} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \quad (2.15)$$

Величину, обратную сопротивлению ($1/R$), называют *электрической проводимостью*. Из формулы (2.14) следует, что общая проводимость

параллельно соединенных ветвей равна сумме проводимостей отдельных параллельных ветвей.

• Проводимость между точками C и D (рис. 2.4, δ)

$$1/R_{об} = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3, \quad (2.16)$$

или

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}. \quad (2.17)$$

Если

$$R_1 = R_2 = R_3 = R,$$

то

$$R_{об} = \frac{R^3}{R^2 + R^2 + R^2} = \frac{R^3}{3R^2} = \frac{R}{3}. \quad (2.18)$$

Если параллельно соединено n равных между собой сопротивлений R , то общее сопротивление

$$R_{об} = R/n. \quad (2.19)$$

Второй закон Кирхгофа гласит: в замкнутой электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжений на отдельных участках цепи.

Согласно этому закону для схемы, изображенной на рисунке 2.4, δ , можно записать:

$$E = U_{вн} + U_1 + U_2 + U_3. \quad (2.20)$$

Если это уравнение разделить на общий ток I в цепи, то

$$E/I = U_{вн}/I + U_1/I + U_2/I + U_3/I = R,$$

или

$$R_{н} = R_{вн} + R_1 + R_2 + R_3, \quad (2.21)$$

то есть при последовательном соединении элементов цепи общее сопротивление $R_{н}$ цепи равно сумме сопротивлений составляющих ее элементов.

Смешанное соединение элементов цепи означает, что одна часть ветвей цепи соединена параллельно, а другая — последовательно. В этом случае для определения общего сопротивления рекомендуется всю цепь привести к наиболее простому виду — последовательному соединению, а затем вычислить общее сопротивление.

Так для смешанного соединения, показанного на рисунке 2.5, общее сопротивление

$$R_{об} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + R_3. \quad (2.22)$$



Рис. 2.5. Смешанное соединение резисторов.

2.3. РАСЧЕТ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Каждый приемник электрической энергии (электролампа, нагревательный прибор, резистор и др.) характеризуется электрическим сопротивлением.

2.1. Удельное сопротивление металлов и сплавов и область их применения

Металлы и сплавы	Удельное сопротивление при 20°C, Ом · мм ² /м	Область применения
Металлы		
Серебро	0,015...0,016	Контакты некоторых электроприборов и аппаратов
Медь	0,0175...0,0182	Провода, кабели и шины
Алюминий	0,026...0,029	То же
Вольфрам	0,053...0,055	Нити ламп накаливания, нагрывостойкие электроды в лампах, контакты
Цинк	0,0535...0,0625	Антикоррозионные покрытия, электроды в гальванических элементах, контакты
Никель	0,068...0,072	Катоды, аноды и сетки в электронных лампах
Сталь	0,103...0,14	Провода, кабели и шины, конструкционный материал
Свинец	0,217...0,227	Защитные оболочки кабелей, вставки предохранителей, пластины аккумуляторов
Ртуть	0,943...0,952	Электроды в терморегуляторах, ртутных выпрямителях
Натрий	0,047	Перспективные кабели
Сплавы		
Бронза	0,0210...0,052	Контакты, пружины
Латунь	0,031...0,079	Контакты, зажимы
Нейзильбер (медь, цинк, никель, железо)	0,30...0,45	Реостаты
Манганин (медь, марганец, никель, железо)	0,42...0,50	Эталонные сопротивления, магазины сопротивления
Константан (медь, никель)	0,45...0,52	Реостаты и сопротивления, нагревательные элементы (до 450°C)
Нихром (хром, никель, железо)	1,02...1,12	Электронечи с температурой до 1000°C
Фехраль (железо, хром, алюминий)	1,1...1,26	Бытовые нагревательные приборы и электронечи с температурой до 650°C

Способность того или иного материала проводить электричество оценивают по *удельному сопротивлению* ρ или по его обратной величине — *удельной проводимости* $\gamma = 1/\rho$. Удельным сопротивлением материала называют сопротивление проводника из данного материала длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 мм² при температуре 20°C.

В таблице 2.1 приведены удельные сопротивления некоторых распространенных в электротехнике материалов.

Как видно из таблицы, лучшими проводниками являются серебро и медь, затем алюминий и различные сплавы. Для нагревательных элементов тепловых приборов используют сплавы с высоким удельным сопротивлением — нихром, фехраль и др.

Сопротивление провода длиной l (м) и площадью поперечного сечения S (мм²) определяют по формуле

$$R = \rho l / S = l / \gamma S, \quad (2.23)$$

где ρ — удельное сопротивление; γ — удельная проводимость.

По формуле (2.23) определяют размерность удельного сопротивления:

$$[\rho] = [RS/l] = \text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}.$$

Если задан диаметр D (мм) провода, то площадь его сечения

$$S = \pi D^2/4. \quad (2.24)$$

Если известно сопротивление провода и его материал, а также один из геометрических параметров — длина или площадь сечения, то из формулы (2.23) можно определить второй параметр — площадь сечения или длину:

$$l = RS/\rho; \quad S = \rho l/R. \quad (2.25)$$

Иногда в таблицах физических величин (см. табл. 1.4) приводят значения объемного удельного сопротивления или сопротивления между противоположными гранями куба материала с ребром, равным 1 м. Размерность объемного удельного сопротивления $\text{Ом} \cdot \text{м}^2/\text{м} = \text{Ом} \cdot \text{м}$.

2.4. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ЗНАЧЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Удельное сопротивление металлов при нагревании увеличивается (вследствие повышения скорости движения атомов в материале проводника с возрастанием температуры). Удельное сопротивление электролитов и угля при нагревании, наоборот, уменьшается, так как у этих материалов не только увеличивается скорость движения атомов и молекул, но и возрастает число свободных электронов и ионов в единице объема.

Удельное сопротивление некоторых сплавов (константан, манганин и др.), обладающих большим удельным сопротивлением, чем составляющие их металлы, почти не зависит от температуры.

Величину, показывающую относительное изменение сопротивления при изменении температуры материала на 1° , называют *температурным коэффициентом электрического сопротивления*. Если температурный коэффициент обозначить через α , удельное сопротивление при $t_0 = 20^\circ\text{C}$ через ρ_0 , то при нагреве материала до температуры t_1 его удельное сопротивление

$$\rho_1 = \rho_0 + \alpha \rho_0 (t_1 - t_0) = \rho_0 [1 + \alpha (t_1 - t_0)] \quad (2.26)$$

и соответственно

$$R_1 = R_0 [1 + \alpha (t_1 - t_0)]. \quad (2.27)$$

Температурный коэффициент α для меди, алюминия, вольфрама равен 0,004 1/град, для стали $\alpha = 0,006$, для латуни $\alpha = 0,002$, для фехрали $\alpha = 0,00015$, для нихрома $\alpha = 0,00014$, для константана $\alpha = 0,000005$, для манганина $\alpha = 0,00004$ 1/град.

Пример 2.1. Как изменится сопротивление R_0 стальной проволоки при нагреве ее на 520° ?

Решение. По формуле (2.27)

$$R_1 = R_0 + R_0 \alpha (t_1 - t_0) = R_0 + R_0 \cdot 0,006 (520 - 20) = 4R_0.$$

Таким образом, сопротивление увеличится в 4 раза.

Пример 2.2. Определить сопротивление R_2 алюминиевых проводов при температуре $t_2 = 30^\circ\text{C}$, если известно, что при температуре $t_1 = -20^\circ\text{C}$ их сопротивление $R_1 = 5 \text{ Ом}$.
Решение. Искомое сопротивление

$$R_2 = R_1 + \alpha R_1 (t_2 - t_1) = 5 + 0,004 \cdot 5 [30 - (-20)] = 5 + 0,02 \cdot 50 = 6 \text{ Ом}.$$

Свойство материалов изменять свое электрическое сопротивление при нагреве или охлаждении используется для измерения температур. Так, термосопротивления, представляющие собой проволоку из платины или чистого никеля, вплавленную в кварц, применяют для измерения температур от -200 до $+600^\circ\text{C}$. Полупроводниковые термосопротивления с большим отрицательным коэффициентом (термисторы) служат для точного определения температур в более узких диапазонах.

2.5. РЕЗИСТОРЫ, РЕОСТАТЫ И МАГАЗИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Резисторы от нескольких омов до нескольких мегаомов применяют в различных радиотехнических, телефонных и других устройствах, в разнообразных измерительных приборах и т. д. Резисторы различают не только по величине, но и по мощности рассеивания, то есть номинальной мощности, развиваемой в них током. Чем больше мощность рассеивания, тем больше габариты резисторов.

Резисторы могут быть проволочными и непроволочными.

Проволочные резисторы типа ПЭ (проволочные эмалированные или остеклованные) выполняют из константовой (низкоомные) или нихромовой (высокоомные) проволоки, которую наматывают на керамическую трубку, а снаружи покрывают предохранительным слоем стекло-видной эмали.

К *непроволочным* относят резисторы типов: ВС — влагостойкие, УЛМ — углеродистые лакированные малогабаритные, МЛТ — металлизированные лакированные теплостойкие и др.

Резисторы ВС изготавливают путем нанесения слоя углерода на керамическую основу — стержень, если мощность рассеивания $0,5 \dots 2 \text{ Вт}$, или трубку, если мощность рассеивания $5 \dots 10 \text{ Вт}$.

Реостат — это устройство, при помощи которого можно изменять сопротивление электрической цепи. Схема включения реостата показана на рисунке 2.6. Перемещая скользящий контакт K влево, можно уменьшать сопротивление реостата, а перемещая вправо, увеличивать его. Ток в цепи соответственно этому изменяется практически плавно.

Элементы реостата чаще изготавливают из металлической проволоки (константан, нейзильбер, сталь и т. д.). В непроволочных реостатах, широко применяемых в радиотехнике, токопроводящим элементом служит тонкий слой проводящего материала, нанесенный на основание из изоляционного материала.

Реостат со ступенчатым переключателем, схема которого показана на рисунке 2.7, состоит из ряда секций, включенных между контактами K . Чтобы изменить значение сопротивления, включенного в цепь, перемещают переключатель P . Реостаты такого типа используют главным образом как пусковые для электродвигателей постоянного тока и трехфазных асинхронных электродвигателей с фазным ротором.

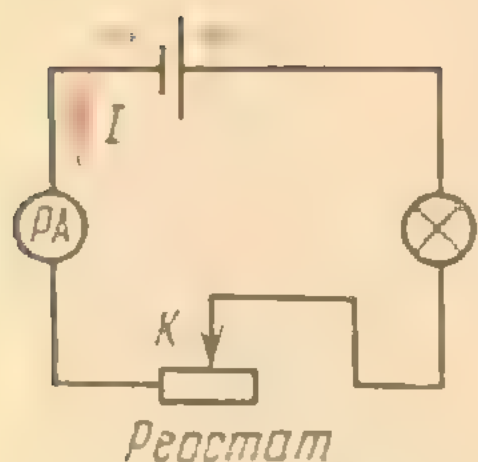


Рис. 2.6. Включение реостата для регулирования тока в цепи.

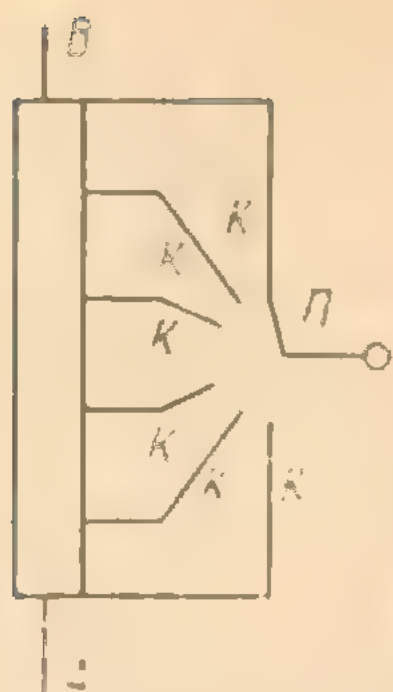


Рис. 2.7. Схема реостата со ступенчатым переключением.

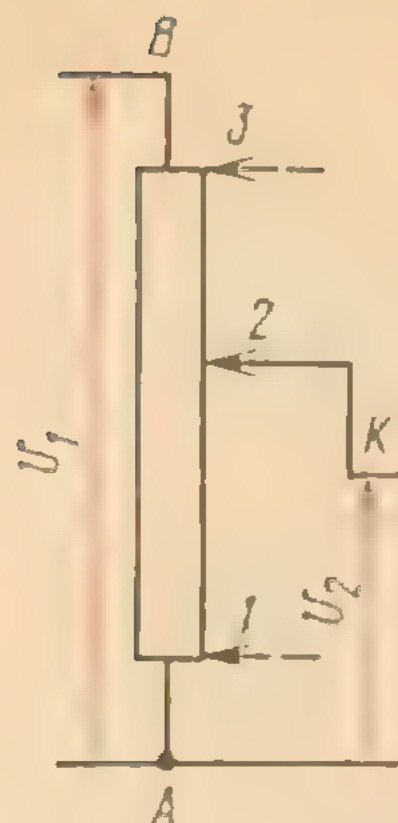


Рис. 2.8. Схема включения реостата в качестве потенциометра.

На рисунке 2.8 приведена схема включения реостата в качестве *потенциометра* — прибора, при помощи которого изменяют напряжение питания цепи при одном и том же напряжении источника электрической энергии.

К контактам *A* и *B* подведено напряжение U_1 . С контактов *A* и *K* снимается напряжение U_2 . Если ползунок, с которым соединен контакт *K*, находится в точке *1*, то напряжение U_2 равно нулю, а если в точке *3*, то напряжение U_2 равно U_1 . Таким образом, передвигая ползунок, можно изменять напряжение от 0 до U_1 .

Магазины сопротивлений представляют собой специальные наборы резистивных элементов, различные сочетания которых, получаемые при помощи переключателей и штепселей, дают очень широкий диапазон значений. Если, например, магазин составлен из четырех групп элементов по 10 штук: от 0 до 9 Ом, от 0 до 90 Ом, от 0 до 900 Ом и от 0 до 9000 Ом, то, меняя положения четырех переключателей, можно установить значение сопротивления в пределах от 0 до 9999 Ом с интервалом в 1 Ом.

Элементы сопротивлений в магазинах выполнены из манганиновой или константановой проволоки, обладающей очень малым температурным коэффициентом.

2.6 НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Рассмотренные выше схемы соединения резистивных элементов, имеющих сопротивление, не меняющееся от приложенного напряжения или протекающего в цепи тока, а также от воздействия различных внешних факторов, относятся к *линейным* схемам. Для таких элементов зависимость протекающего тока от приложенного напряжения носит характер прямой линии $I(U_1)$ (рис. 2.9, *a*). Это так называемая ампер-вольтовая характеристика (а.в.х.) элемента. Такой же характер будет носить и обратная зависимость — напряжения на концах элемента от силы протекающего тока, или вольт-амперная характеристика (в.а.х.)

К *нелинейным* элементам относятся лампы накаливания и газоразрядные лампы, намагничивающие катушки с ферромагнитным сердеч-

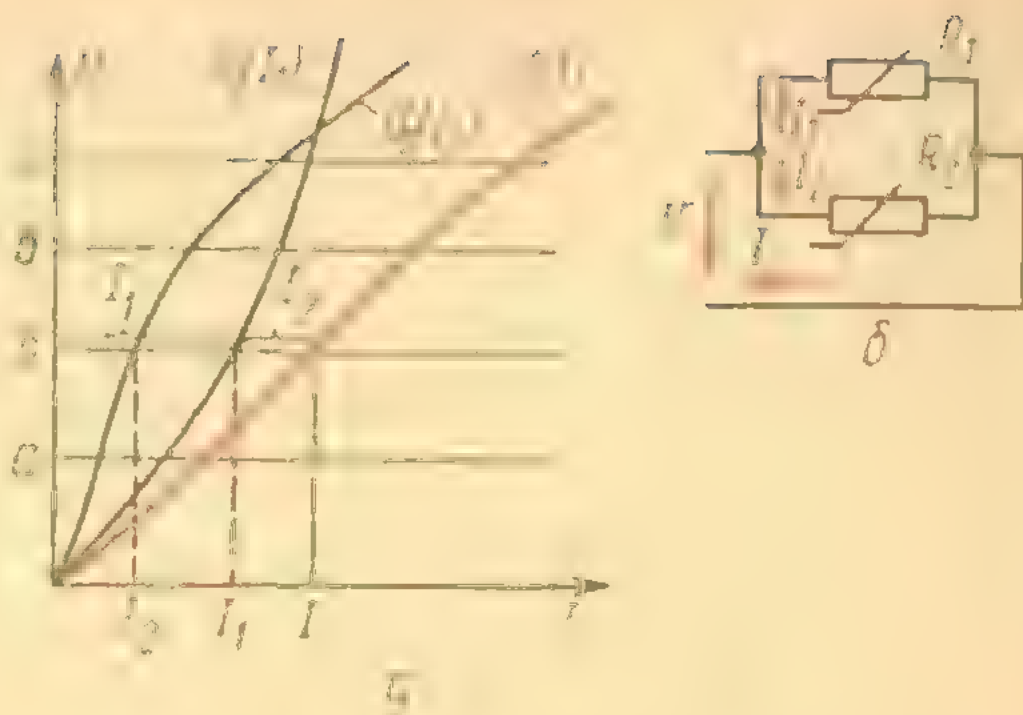
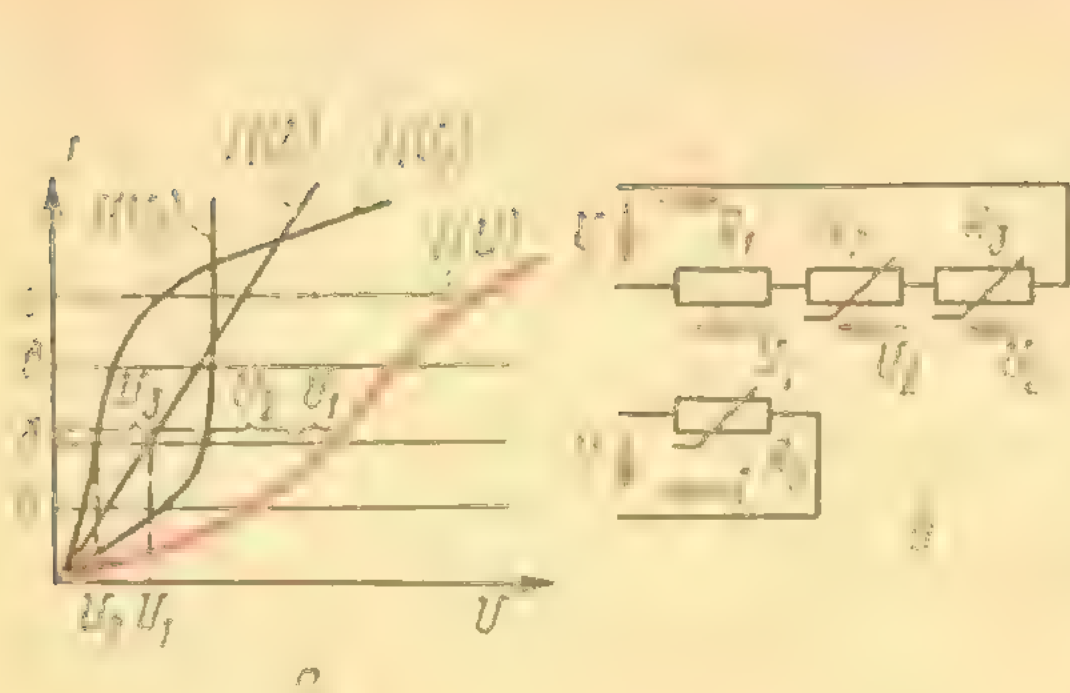


Рис. 2.9. Ампер-вольтовые характеристики линейного и нелинейного элементов цепи (а) и расчетные схемы — исходная и замещения (б).

Рис. 2.10. К расчету цепи с параллельным соединением нелинейных элементов.

ником [кривая $I(U_2)$, рис. 2.9, а], различные полупроводниковые приборы и т. д.

Как правило, цепи с нелинейными элементами рассчитывают графо-аналитическим методом. Покажем ход графического расчета простейших цепей. Пусть последовательно соединены один линейный и два нелинейных элемента (рис. 2.9, б), а.в.х. которых приведены на рисунке 2.9, а. В этой цепи протекает общий для всех элементов ток, а напряжения связаны соотношением:

$$U = U_1 + U_2 + U_3.$$

Для расчета заменяют заданную электрическую цепь цепью с общим, эквивалентным элементом R , и находят для этой цепи общую а.в.х. Для этой цели задаются несколькими значениями тока (точки а, б, в, г, рис. 2.9, а) и проводят горизонтальные линии. На этих линиях откладывают (суммируют) значения напряжений на отдельных элементах цепи, как отмечено для точки б. Полученная таким образом общая а.в.х. позволяет затем определить ток в цепи для любого приложенного к ней напряжения. При этом могут быть определены и напряжения на отдельных ее элементах.

Если нелинейные элементы соединены параллельно, то определяют в.а.х. эквивалентного элемента, задаваясь рядом значений приложенного к схеме напряжения (рис. 2.10). Ход построения общей в.а.х. такой же, как и выше: для точки б ток $I = I_1 + I_2$ и т. д.

Если имеется смешанное соединение нелинейных элементов, то сначала находят эквивалентную в.а.х. для участка с параллельным соединением, а затем определяют общую для всей цепи в.а.х.

2.7. МОЩНОСТЬ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЭНЕРГИЯ И КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ

Электрическая мощность P (Вт) определяется произведением напряжения на силу тока:

$$P = UI, \quad (2.28)$$

где U — напряжение на токоприемнике, В; I — сила тока через токоприемник, А.

Единица мощности — 1 *ватт* = 1 вольт $\times$ 1 ампер.

Принимая во внимание закон Ома ($U = IR$; $I = U/R$), равенство (2.28) можно представить следующим образом:

$$P = I^2 R, \quad (2.29)$$

$$P = U^2 / R. \quad (2.30)$$

В практике пользуются производной единицей мощности — *киловатт* (кВт), 1 кВт = 1000 Вт.

Электрическая энергия, или работа (Дж), как и в механике, равна произведению мощности на время:

$$W = Pt, \quad (2.31)$$

где P — мощность, Вт; t — время, с.

Единица энергии 1 *джоуль* = 1 ватт $\times$ 1 секунду. В практике пользуются значительно более крупной единицей — *киловатт-часом* (кВт $\cdot$ ч), 1 кВт $\cdot$ ч = 1 кВт $\cdot$ 1 ч = 1000 Вт $\cdot$ 3600 с = 3 600 000 Дж = 3,6 МДж.

Если взять значение P из выражений (2.28), (2.29) и (2.30), то формулу (2.31) можно переписать так:

$$W = UI t = \frac{U^2}{R} t = I^2 R t. \quad (2.32)$$

Пример 2.3. Нагревательный прибор, включенный в сеть 220 В, потребляет ток 5 А. Сколько энергии расходуется за сутки?

Решение. Количество энергии $W = 220 \cdot 5 \cdot 24 = 26\,400$ Вт $\cdot$ ч = 26,4 кВт $\cdot$ ч = 95,04 МДж.

Пример 2.4. Какова мощность нагревательного прибора, если за 5 ч потребляемая им энергия составила 10 кВт $\cdot$ ч?

Решение. Мощность прибора

$$P = W/t = 10/5 = 2 \text{ кВт}.$$

Тепловое действие тока. Прохождение электрического тока через проводник сопровождается выделением теплоты. В нагревательных приборах получение теплоты — это конечная цель. Но в других приборах и устройствах выделение теплоты представляет собой непроизводительные потери электрической энергии.

Количество теплоты измеряют в джоулях, причем 1 Дж = 1 Вт $\cdot$ 1 с = 1 Вт $\cdot$ с.

По закону Ленца — Джоуля количество теплоты Q , выделяемой током в проводнике, пропорционально квадрату тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока:

$$Q = I^2 R t, \quad (2.33)$$

где I — сила тока, А; R — сопротивление, Ом; t — время, с.

Пример 2.5. Найти количество теплоты, которое выделяется на сопротивлении $R = 20$ Ом в течение $t = 1$ ч при протекании тока $I = 10$ А.

Решение. Искомое количество теплоты

$$Q = 100 \cdot 20 \cdot 3600 = 7200 \text{ кДж}.$$

Коэффициент полезного действия. При всяком превращении одного вида энергии в другой наблюдаются потери энергии. Например, при превращении электрической энергии в механическую (в электрическом двигателе) часть электроэнергии, потребляемой электродвигателем из сети, расходуется на нагрев двигателя, на трение в подшипниках и т. д.

Этот процесс количественно характеризует величина, называемая коэффициентом полезного действия (КПД). Под КПД понимают отношение полезной мощности $P_{\text{пол}}$, отдаваемой машиной, к подведенной мощности $P_{\text{подв}}$:

$$\eta = P_{\text{пол}} / P_{\text{подв}}. \quad (2.34)$$

Пример 2.6. Водонагревательный прибор потребляет из сети мощность 1 кВт, причем 50 л воды нагреваются на 80° в течение 5 ч. Каков КПД водонагревателя?

Решение. Потребляемая из сети за 5 ч электроэнергия

$$W = Pt = 1 \cdot 5 = 5 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 5000 \cdot 3600 \text{ Дж}$$

Для нагревания 50 л воды на 80° используется энергия, равная

$$W'_{\text{пол}} = cV(t_2 - t_1) = 4,19 \cdot 50\,000 \cdot 80 \text{ Дж},$$

где $c = 4,19$ — теплоемкость воды, Дж/(см³ · °С).

Часть энергии, равная разности $W_{\text{подв}} - W_{\text{пол}}$, теряется на охлаждение нагревателя. Тогда КПД

$$\eta = \frac{W'_{\text{пол}}}{W_{\text{подв}}} = \frac{4,19 \cdot 50\,000 \cdot 80}{5000 \cdot 3600} = \frac{4,19}{4,5} = 0,93, \text{ или } 93\%,$$

где $W_{\text{пол}}$ — энергия, израсходованная на нагрев воды; $W_{\text{подв}}$ — энергия, выделившаяся в нагревателях.

Контрольные вопросы и задания к главе 2. 1. Из каких элементов состоит замкнутая электрическая цепь? 2. Как записать закон Ома для полной цепи с учетом источника тока и для участка цепи? 3. Найти ЭДС источника тока, если сила тока в цепи, состоящей из $R_{\text{н}} = 30$ Ом и $R_{\text{вн}} = 0,5$ Ом, равна 10 А. Каково напряжение на нагрузке? 4. Найти общее сопротивление цепи, состоящей из последовательно соединенных резисторов $R_1 = 5$ Ом, $R_2 = 10$ Ом, $R_3 = 7$ Ом. Чему будет равно общее сопротивление этих резисторов при их параллельном соединении? 5. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа. 6. Найти общее напряжение на участке цепи, состоящей из трех резисторов 5, 10 и 7 Ом, соединенных последовательно, если в цепи протекает ток 5 А. 7. Определить сопротивление проводника из меди, если длина его 100 м, а площадь поперечного сечения 1,5 мм². 8. Как влияет температура проводника на его сопротивление? 9. Приведите пример нелинейного элемента в электрической цепи. 10. Как определить общее напряжение на участке цепи, состоящей из двух нелинейных элементов?

Глава 3. ХИМИЧЕСКОЕ ДЕЙСТВИЕ ТОКА. ИСТОЧНИКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

3.1. ПОСТОЯННЫЙ ТОК В ЭЛЕКТРОЛИТАХ. ЭЛЕКТРОЛИЗ. ГАЛЬВАНОТЕХНИКА

Положительные и отрицательные ионы образуются из молекул электролита под действием электрического тока. Ионы водорода или металла имеют положительный заряд, а неметаллический остаток молекулы электролита — отрицательный.

Так, под действием растворителя (диоксида, воды) молекулы поваренной соли (NaCl) распадутся на положительные ионы натрия (Na⁺)

и отрицательный ион хлора (Cl^-); молекула медного купороса (CuSO_4) — на положительный ион меди (Cu^+) и отрицательный ион сульфата (SO_4^-) и т. д.

Если в электролит опустить два электрода (рис. 3.1) и приложить к ним напряжение, то под действием электрического поля к отрицательному электроду — *катоде* — будут перемещаться положительные ионы, которые называют *катионами*, а к положительному электроду — *аноду* — отрицательные ионы, которые называют *анионами*. Достигая электрода, ионы отдают ему свой заряд и либо вступают с ним в химическую реакцию, либо оседают на нем.

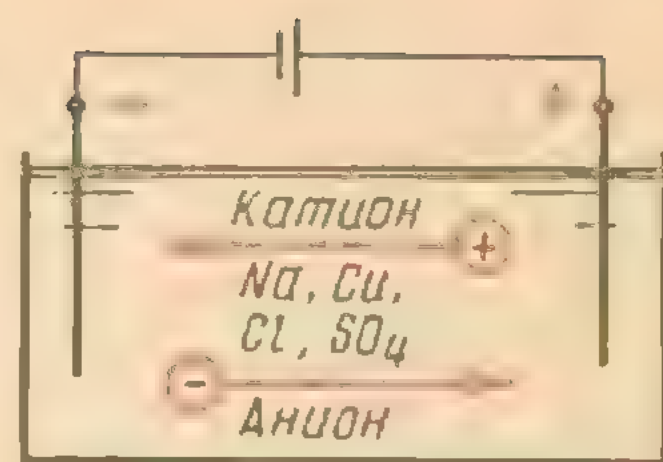


Рис. 3.1. Схема электролиза.

Электролизом называется процесс выделения вещества электролита на электродах. Количественные законы электролиза были открыты выдающимся английским ученым М. Фарадеем. Он нашел, что, во-первых, масса какого-либо вещества, выделяющегося или разлагающегося под действием тока, пропорциональна количеству прошедшего электричества; во-вторых, отношение масс различных веществ, выделяемых одним и тем же количеством электричества, равно отношению их химических эквивалентов.

Электролиз широко используют в технике для получения металлов из их соединений, отделения металлов от примесей, нанесения металлических покрытий на металлические предметы и изготовления металлических копий с неметаллических предметов (гальванотехника).

Гальванотехника открыта русским ученым Б. С. Якоби в 1840 г. Она делится на *гальванопластику* — получение легко отделяющихся металлических точных копий с различных предметов и *гальваностегию* — нанесение на изделия из металла тонких покрытий из других металлов, например не поддающихся коррозии.

Для нанесения металлического покрытия изделие (катод) соединяют с отрицательным полюсом источника энергии и погружают в электролит, содержащий положительные ионы осаждающегося металла. Анодом служат пластины или прутки из того металла, которым покрывают изделие.

В некоторых случаях используют и нерастворимые аноды. Тогда на изделии (положительный полюс источника) выделяются атомы кислорода, окисляющие поверхность металлического изделия. Напряжение на электродах составляет 6...12 В, плотность тока 1...10 А на 1 дм² поверхности покрываемой детали.

Изделие предварительно очищают от ржавчины, окалины, смазок, жиров и пр., подвергая его механической очистке (шлифовке, полировке и т. д.), электрохимическому обезжириванию (в щелочном электролите), травлению (в щелочных или кислотных электролитах).

К наиболее распространенным операциям по металлическому покрытию относят цинкование, кадмирование, лужение, свинцование, меднение, никелирование, хромирование, серебрение, золочение, оксидирование.

3.2. ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА. ГАЛЬВАНИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

К химическим источникам тока, в которых происходит прямое преобразование химической энергии в электрическую, относят гальванические элементы, топливные элементы, аккумуляторы, а также комбинированные источники тока типа топливный элемент — аккумулятор. Эти источники тока, как правило, имеют высокий КПД, работают бесшумно, практически не загрязняют окружающую среду.

Гальванические элементы — это первичные химические источники тока, в которых химические реакции необратимы. В простейшем виде элемент представляет собой два электрода из разных металлов, погруженных в раствор электролита. При этом на одном из электродов (катоде) идет реакция растворения материала электрода или окисления, при которой электрод теряет электроны, отдавая их во внешнюю электрическую цепь, а на другом электроде (аноде) идет реакция восстановления — нейтрализации ионов материала, окружающего электрод за счет электронов, поступающих с катода по внешней цепи. Разность потенциалов (электродвижущая сила) для различных элементов находится в пределах от 0,85 до 3 В.

В наиболее широко применяемых гальванических элементах (для питания радиоприемников, карманных фонарей и т. д.) положительный электрод представляет собой угольный стержень 1 (рис. 3.2, а) и массу 2 из активированного угля или смеси двуокиси марганца с графитом, а отрицательный — цинковую обкладку 3 в виде стаканчика или чашечки. В качестве электролита чаще всего используется раствор нашатыря.

Галетному (рис. 3.2, б) элементу придана плоская форма, удобная для соединения в батарею. На наружную сторону цинкового электрода 4 нанесен специальный электропроводный слой, не пропускающий электролит. Собранный элемент покрывают тонкой хлорвиниловой пленкой 5. Такое устройство имеет, например, батарея «Крона».

Пленочное покрытие изолирует отдельные элементы с боков, препятствует вытеканию электролита, но легко пропускает газы, образующиеся внутри элемента. Масса из активированного угля 6 несколько высту-



Рис. 3.2. Гальванический элемент:

а — в виде стаканчика; б — в виде галеты; 1 — угольный стержень; 2 — масса из активированного угля или графита в смеси с двуокисью марганца; 3 и 4 — цинковая обкладка (электрод); 5 — хлорвиниловая пленка; 6 — электрод из угольной массы.



рис. 3.3. Последовательное (а) и параллельное (б) соединения элементов в батарею.

пает из галеты для удобного контакта с другой галетой. В этих батареях активный материал используется лучше и полнее, чем у стаканчиковых батарей.

Сухие гальванические элементы поступают потребителю в готовом виде; водоналивные перед употреблением необходимо залить чистой водой.

Напряжение гальванического элемента всегда меньше, чем развиваемая им ЭДС, во-первых, вследствие падения напряжения внутри элемента на его внутреннем сопротивлении, во-вторых, из-за явления поляризации электродов в результате электрохимических реакций, происходящих на поверхности электродов под влиянием проходящего в цепи тока. Например, выделение водорода на катоде и кислорода на аноде сопровождается возникновением потенциалов поляризации, которые направлены навстречу электродным потенциалам и снижают их. Чтобы уменьшить влияние поляризации на работу элемента, применяют *деполяризаторы* — вещества, которые принимают на себя водород или кислород, вступают с ними в реакцию и таким образом способствуют снижению потенциала поляризации. В гальванических элементах с угольным электродом в качестве деполяризатора используется двуокись марганца.

Чтобы в электрической цепи получить напряжение, превышающее напряжение одного элемента, элементы соединяют в батарею, включая их последовательно, то есть положительный полюс каждого предыдущего элемента соединяют с отрицательным полюсом последующего (рис. 3.3, а). Общая электродвижущая сила батареи в этом случае равна сумме электродвижущих сил отдельных элементов:

$$E_{об} = E_1 + E_2 + E_3 + \dots + E_n. \quad (3.1)$$

Когда элементы одинаковы и их ЭДС равны, ЭДС батареи, состоящей из n элементов,

$$E_{об} = nE_{эл}. \quad (3.2)$$

Если по условиям работы в цепи требуется небольшое напряжение, а ток нагрузки — превышающий ток разрядки одного элемента, используют батарею из параллельно включенных элементов (рис. 3.3, б), в которой все полюсы одинаковых полярностей соединены между собой. В этом случае ЭДС всей батареи равна ЭДС одного из элементов, а ток увеличивается в n раз, где n — число элементов в батарее.

Цифры в маркировке батарей означают следующее: первые — начальное напряжение батареи в вольтах, последние — начальный электрический заряд батареи в ампер-часах или продолжительность ее работы в часах, если за последней цифрой стоит буква «ч». Первые буквы расшифровывают так: А — анодная, Н — накальная, Ф — фонарная, Т —



телефонная, П — приборная, АН — анодно-накальная, АС — анодно-сеточная, СА — слуховой анод, ЭВ — для электронной вспышки и т. д. Буквы МЦ свидетельствуют о том, что батарея угольно-марганцово-цинковая, далее — Г — галетная, Ч — чашечковая. Отсутствие буквы после МЦ указывает на то, что батарея стаканчиковая. Буквами Х и У обозначают соответственно хладостойкую и универсальную (в зависимости от состава электролита) батарею. Летние батареи отличительной буквы не имеют.

Для питания транзисторных приборов применяют окиснортутные (ОР) гальванические элементы миниатюрных размеров.

Гальванические элементы необходимо защищать от коротких замыканий и не рекомендуется проверять «на искру». Напряжение их следует измерять под нагрузкой. При отсутствии нагрузки вольтметр покажет ЭДС, которая не характеризует степени использования батарей.

3.3. АККУМУЛЯТОРЫ — ВТОРИЧНЫЕ ХИМИЧЕСКИЕ ИСТОЧНИКИ ТОКА

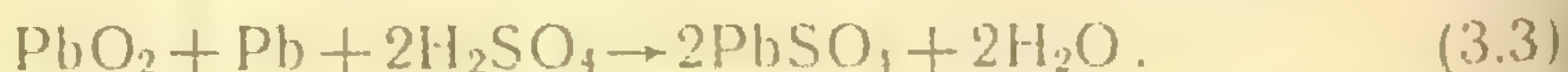
Аккумуляторы — вторичные химические источники электрической энергии — обладают способностью накапливать (аккумулировать) химическую энергию под действием электрического тока и затем по мере надобности отдавать ее в виде электрической энергии во внешнюю цепь.

При правильной эксплуатации аккумуляторы выдерживают до 500 и более циклов заряд — разряд. В буферном режиме, когда аккумулятор включен параллельно с генератором постоянного тока и служит главным образом для сглаживания колебаний напряжения последнего, срок службы исчисляется годами.

В настоящее время широкое применение находят кислотные (свинцовые), щелочные (кадмиево-никелевые, железоникелевые, серебряно-цинковые) аккумуляторы.

В серебряно-цинковых аккумуляторах в качестве активных материалов участвуют серебро и окись цинка. Электролитом служит раствор едкого калия. Эти батареи в 6 раз легче и в 5 раз меньше по размерам, чем свинцово-кислотные того же заряда. Они используются в ответственных электроустановках.

В свинцовых аккумуляторах в качестве активного вещества на положительном электроде служит двуокись свинца PbO_2 , на отрицательном электроде — губчатый металлический свинец Pb . Электролит — раствор серной кислоты H_2SO_4 плотностью 1,18...1,29 г/см³. При разряде свинцового аккумулятора происходит химический процесс, описываемый уравнением



При заряде процесс идет в обратном направлении.

В кадмиево-никелевых аккумуляторах активными веществами положительного электрода являются окислы никеля, смешанные для увеличения электропроводности с графитом, а отрицательного электрода — губчатый металлический кадмий в смеси с губчатым железом. Электро-

литом служит раствор едкого кали или едкого натра, иногда с добавлением едкого лития.

В железоникелевых аккумуляторах, которые были разработаны выдающимся американским инженером Т. Эдисоном, вместо кадмия использован мелкий порошок железа, поэтому их стоимость значительно ниже. Недостаток железоникелевых аккумуляторов — значительный саморазряд.

В обозначении аккумуляторов первое число показывает, сколько аккумуляторных банок в батарее, последнее — каков электрический заряд* батареи в ампер-часах или кулонах: $1 \text{ А} \cdot \text{ч} = 3,6 \text{ кКл}$. Буквы в маркировке кислотных аккумуляторов означают: С — стационарный для продолжительных режимов разряда, СК — стационарный для кратких и продолжительных режимов разряда с усиленными соединительными полосами, СЭ — стационарный в эбонитовом баке, СЗ — закрытого исполнения, СТ — стартерный для автомобилей и других машин, МТ — мотоциклетный, А — авиационный, РА — радиоанодный, РН — радионакальный и т. д.

В щелочных аккумуляторах буквы в маркировке означают: НК — никель-кадмиевые, НЖ — никель-железные, ТНЖ — тяговые никель-железные.

Основная характеристика аккумуляторов — их электрический заряд, измеряемый в ампер-часах. Его вычисляют как произведение силы тока при разряде на продолжительность этого режима. Так, если электрический заряд равен $100 \text{ А} \cdot \text{ч}$, то при силе тока 10 А обеспечивается работа токоприемника в течение 10 ч , при силе тока 5 А — в течение 20 ч и т. д. Электрический заряд зависит от конструкции аккумулятора, от качества его зарядки, а также от силы разрядного тока.

Для питания транзисторных приборов промышленность выпускает миниатюрные герметичные кадмиево-никелевые аккумуляторы серии Д, ЦНК, КНГ с электрическим зарядом от $0,06$ до $1,5 \text{ А} \cdot \text{ч}$, рассчитанные более чем на 100 циклов разряд — заряд.

Для электромобилей перспективны аккумуляторы с расплавленным электролитом, содержащим литий и сульфиды железа, с удельной энергией до $130 \text{ Вт} \cdot \text{ч/кг}$.

3.4. ЭКСПЛУАТАЦИЯ АККУМУЛЯТОРОВ

Свинцовые (кислотные) аккумуляторы выпускают на электрический заряд от нескольких десятков до тысяч ампер-часов. Число, указанное после букв, означает номер аккумулятора. В таблице 3.1 приведены некоторые технические данные этих аккумуляторов. Значения зарядов и токов для аккумулятора больших размеров получают умножением значений зарядов и токов (для С-1 и др.) на номер аккумулятора.

Электролит кислотных аккумуляторов составляют из химически чистой серной кислоты и дистиллированной воды. Плотность электролита устанавливают в зависимости от условий, в которых работают аккумуляторы.

* Термин «электрическая емкость» устарел.

3.1. Некоторые данные свинцовых стационарных аккумуляторов типов С-1, СК-1, СЭ-1, СЗ-1, СКЭ-1 в зависимости от продолжительности разряда*

Продолжительность разряда, ч	Электрический заряд, А	Разрядный ток, А · г	Конечное напряжение разряда, В	Продолжительность разряда, ч	Электрический заряд, А	Разрядный ток, А · г	Конечное напряжение разряда, В
0,25	8,0	32,0	1,75	3,0	27,0	9,0	1,8
0,5	12,5	25,0	1,75	5,0	30,0	6,0	1,8
1,0	18,5	18,5	1,75	10,0	36,0	3,6	1,8

* Зарядный ток во всех случаях 9 А.

муляторы. Чем выше плотность электролита, тем ниже температура замерзания, но и тем меньше срок службы аккумулятора.

Плотность электролита измеряют специальным прибором — ареометром. Нормальной плотностью считают 1,15...1,23 г/см³. При плотности электролита 1,15 г/см³ требуется 239 г серной кислоты с плотностью 1,8 г/см³ на 1 л электролита; при плотности электролита 1,23 г/см³ — 382 г кислоты на 1 л электролита. Вместо дистиллированной воды можно использовать чистую дождевую или снеговую воду.

При составлении электролита в стеклянную посуду наливают сначала дистиллированную воду, а затем тонкой струйкой серную кислоту. Категорически запрещается лить воду в серную кислоту, так как капли воды, соприкасаясь с серной кислотой, сильно нагреваются и испаряются. При этом они уносят с собой капельки серной кислоты, которые, попадая на кожу, могут причинить ожоги. В этом случае необходимо немедленно промыть место поражения раствором соды, а затем холодной водой.

Нормальная температура кислотного электролита 25°C. Повышение температуры свыше 40°C недопустимо. Уровень электролита в аккумуляторе должен быть выше верхнего края пластин примерно на 10 мм (проверяют стеклянной палочкой или трубкой). Доливать электролит в аккумулятор рекомендуется перед зарядкой. Во время зарядки пробки аккумулятора открывают. Значение зарядного тока указано в паспорте аккумулятора.

Аккумуляторы нельзя разряжать ниже конечного напряжения разряда (для свинцовых аккумуляторов 1,8 В). Как только аккумуляторная батарея разрядилась до предельно допустимого напряжения, ее нужно заново зарядить. При зарядке повышают напряжение на зарядном агрегате до значения несколько большего, чем напряжение на батарее (2,1...2,15 В на банку), затем подключают к нему батарею.

Аккумулятор можно заряжать несколькими способами: при неизменном зарядном токе, при неизменном зарядном напряжении, при предельно допустимых зарядных токах, соответствующих каждой стадии заряда. Предельно допустимые токи устанавливают опытным путем. Их выбирают таким образом, чтобы процесс зарядки протекал без бурного выделения газов на пластинах аккумуляторов. Максимально допустимый ток зарядки для аккумуляторов типа С равен 9*n*, где *n* — номер размера элемента.

В практике ток первой ступени зарядки не обязательно должен иметь предельно допустимое значение. Его обычно выбирают из соотношения

$$I_{1\text{зар}} = (3,6 \dots 9) n, \quad (3.4)$$

а ток второй ступени — из соотношения

$$I_{2\text{зар}} = 2,25 n. \quad (3.5)$$

Током первой ступени зарядку ведут в течение времени t_1 , пока не начнется выделение газа из пластин. После этого зарядный ток снижают до значения $I_{2\text{зар}}$ и продолжают зарядку еще некоторое время t_2 (обычно 2...3 ч). При этом общий заряд, сообщаемый аккумулятору,

$$I_{1\text{зар}} t_1 + I_{2\text{зар}} t_2 = Q_{\text{раз}} / \eta_z = Q_{\text{зар}}, \quad (3.6)$$

где $Q_{\text{раз}}$ — заряд, отданный аккумулятором при разрядке; $Q_{\text{зар}}$ — заряд, полученный аккумулятором при зарядке; $\eta_z = Q_{\text{раз}} / Q_{\text{зар}}$ — коэффициент отдачи аккумулятора.

Таким образом, при зарядке наблюдается два характерных периода. В первом периоде напряжение на аккумуляторе увеличивается медленно и держится длительное время в пределах от 2,2 до 2,36 В. Во втором периоде, после того как на пластинах аккумулятора начинают бурно выделяться газы и появляется необходимость снизить зарядный ток, напряжение увеличивается быстро и достигает предельного значения 2,5...2,7 В. После окончания зарядки концентрация раствора в пластинах выравнивается и ЭДС снижается до значения, соответствующего установившейся концентрации электролита в аккумуляторе.

Нельзя оставлять аккумулятор незаряженным, так как в этом случае его пластины покрываются кристаллами сульфата и емкость аккумулятора снижается. На период хранения аккумулятор разряжают, сливают электролит и водой смывают с пластин следы кислоты. После промывки пробки плотно заворачивают.

Аккумулятор можно хранить и в заряженном состоянии. Но в этом случае его следует не реже одного раза в месяц подзаряжать, ибо в результате саморазряда он может полностью разрядиться и пластины покроются сульфатом. В помещениях, где находятся аккумуляторы, категорически запрещается курить, пользоваться аппаратами, приборами, инструментами и выключателями, которые могут вызвать появление искры, поскольку при зарядке аккумуляторов в результате электролиза воды в электролите образуется гремучий газ, то есть смесь водорода и кислорода, которая может взорваться от случайной искры.

Новые аккумуляторы подвергают двум-трем режимам зарядки и разрядки. Зарядный ток при этом устанавливают в 2 раза меньшим, чем обычный периодический зарядный ток. Разрядку ведут током 10-часовой разрядки.

Исправный аккумулятор должен удовлетворять следующим требованиям: быть герметичным, иметь нормальные значения напряжения каждого элемента, плотности и уровня электролита, высоты осадков в банке, в нем должны отсутствовать сульфатация, коррозия, коробление и короткие замыкания пластин. Сроки проверки следующие: сульфата-

цию проверяют не реже одного раза в 2... 3 месяца, высоту электролита — раз в 3...6 месяцев, химический анализ электролита проводят раз в 6 месяцев.

Щелочные аккумуляторы. Электролит для этих аккумуляторов составляют из дистиллированной воды и едкого кали или натра. При температуре эксплуатации от -15 до $+40^{\circ}\text{C}$ рекомендуется электролит, состоящий из $\text{KOH} + \text{LiOH}$ плотностью $1,19...1,21 \text{ г/см}^3$, при температуре эксплуатации от $+15$ до $+35^{\circ}\text{C}$ — электролит из NaOH плотностью $1,17...1,19 \text{ г/см}^3$, при температуре от $+40$ до $+60^{\circ}\text{C}$ — электролит из $\text{NaOH} + \text{LiOH}$ плотностью $1,17...1,19 \text{ г/см}^3$. Плотности $1,17 \text{ г/см}^3$ соответствует содержание в 1 л электролита $176,2 \text{ г}$ едкого натра, а плотности $1,19 \text{ г/см}^3$ — $201,2 \text{ г}$ едкого натра.

Электролиты готовят только в стеклянной или керамической посуде. Аккумулятор заливают только остывшим электролитом, температура которого не более $+25^{\circ}\text{C}$. По мере расхода электролита его доливают дистиллированной водой или слабым раствором едкого кали. Если на тело или одежду попала едкая щелочь, ее надо смыть 2-процентным раствором борной кислоты, а затем промыть загрязненное место чистой водой.

Зарядный ток аккумулятора указан в паспорте, его можно также определить по формуле

$$I_{\text{зар}} = Q/4, \quad (3.7)$$

где Q — электрический заряд аккумулятора.

Продолжительность нормальной зарядки не менее 6 ч. Но при форсированной зарядке время можно сократить до 4 ч: 2,5 ч заряжать двойным нормальным током и 1,5 ч — нормальным током. К концу зарядки напряжение на клеммах банки достигает $1,8 \text{ В}$. При достижении этого напряжения аккумулятор следует поддержать под зарядкой еще полчаса, а затем прекратить ее.

Поскольку во время зарядки щелочных аккумуляторов выделяются кислород и водород, то пробки должны быть вывернуты. Завинчивать их следует не раньше чем через 6 ч после окончания зарядки.

Разрядку щелочного аккумулятора следует заканчивать при снижении напряжения на его клеммах до $1,1 \text{ В}$ (в крайнем случае до $0,8 \text{ В}$).

На рисунке 3.4 приведена простейшая схема включения аккумуляторов на зарядку. К источнику зарядного тока (генератору постоянного тока или выпрямителю) через регулировочный реостат R подключен аккумулятор. Зарядный ток контролируют амперметром PA , напряжение на аккумуляторе — вольтметром PV .

Для проверки степени зарядки аккумуляторов под нагрузкой применяют *нагрузочную вилку* (рис. 3.5). Стержневые контакты 1 острыми концами прижимают к зажимам аккумуляторного элемента. При измерениях электроды соединяют нагрузочным резистором 2, сопротивление которого равно $0,012 \text{ Ом}$. Вольтметр 3 включен параллельно нагрузочному резистору. Нагрузочной вилкой поочередно проверяют элементы аккумулятора. Через нагрузочный резистор протекает ток порядка 100 А . При 100-процентной зарядке напряжение

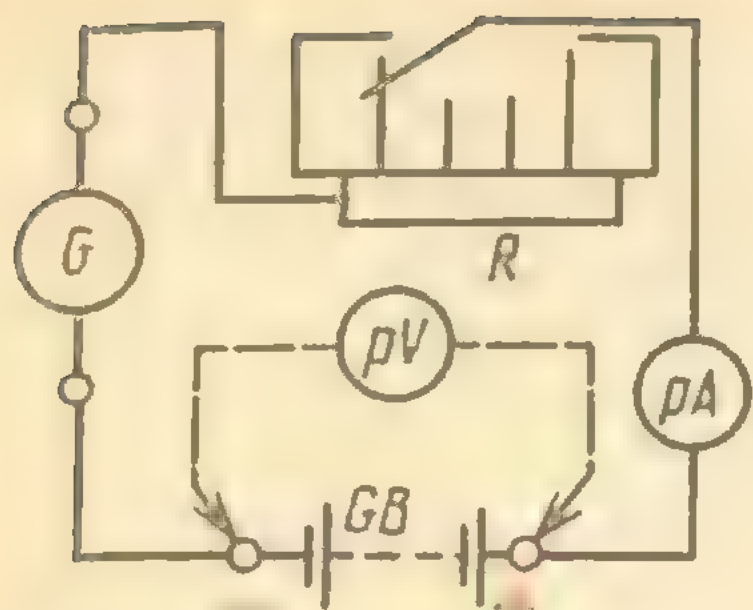


Рис. 3.4. Простейшая схема включения аккумулятора на зарядку:

G — источник зарядного тока; GB — батарея аккумуляторов.

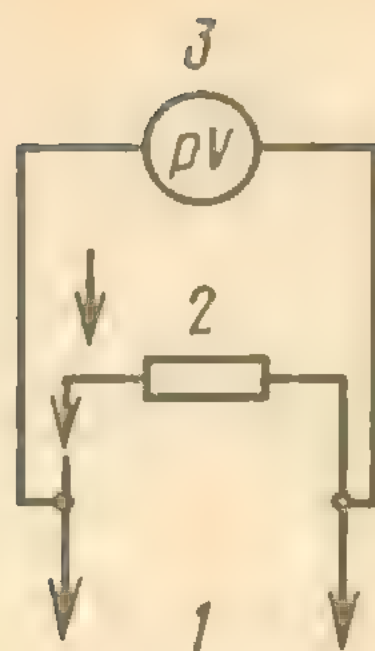


Рис. 3.5. Схема устройства нагрузочной вилки:

1 — контакты с острыми концами; 2 — нагрузочный резистор; 3 — вольтметр.

элемента кислотного аккумулятора под нагрузкой равно 1,7...1,8 В; при 75-, 50- и 25-процентной зарядке — соответственно 1,6...1,7 В, 1,5...1,6 и 1,4...1,5 В.

3.5. ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ. ВОЗДУШНО-ЦИНКОВЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ И ГЕНЕРАТОРЫ

Топливные элементы работают за счет химических реакций окисления (горения) газообразного и жидкого топлива, подводимого извне в пористые электроды элемента, между которыми циркулирует электролит.

Практическое применение нашли топливные водородно-кислородные элементы, в которых топливом (восстановителем) служит водород, а окислителем — кислород из воздуха: то есть в один из электродов нагнетается водород, а в другой — воздух. При их взаимодействии в электролите образуется вода: происходит процесс, обратный электролизу воды в кислород и водород.

Газы подводят под таким давлением, чтобы они соприкасались с электролитом в порах внутри электродов. Для нормальной работы элемента необходимо поддерживать постоянной его температуру (несколько сот градусов у водородно-кислородного элемента), регулировать подачу газов, напряжение на электродах и т. д. Топливный элемент и вспомогательное оборудование к нему называют электрохимическим генератором.

Коэффициент полезного действия водородно-кислородных элементов приближается к 80%. Они имеют большой срок службы, так как их электроды мало изнашиваются.

В ряде стран серийно производятся топливные элементы мощностью от нескольких сот ватт до сотен киловатт. КПД этих устройств при малой мощности около 40%, а термический КПД с учетом пара и горячей воды — более 80%. Рабочая температура элементов до 700°C. Созданы новые топливные элементы с твердым электролитом, с рабочей температурой выше 750°C и КПД около 60%. Их мощность будет составлять до 1 МВт в одной установке.

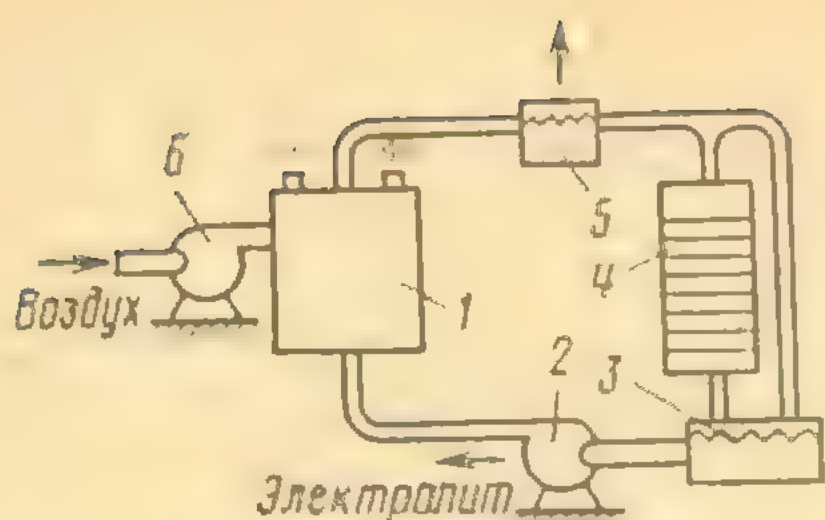


Рис. 3.6. Схема воздушно-цинкового генератора:
1 — химические элементы; 2 — насос подачи электролита в элементы; 3 — резервуар с электролитом; 4 — фильтры для очистки электролита; 5 — сепаратор для отделения воздуха от электролита; 6 — воздушный компрессор.

Ведутся работы по созданию биологических топливных элементов, где в качестве катализаторов используются ферменты, вызывающие брожение органической массы.

В воздушно-цинковом элементе (в батарее «Крона-ВЦ») один из электродов — угольный пористый — работает, как в топливном элементе: в него из воздуха свободно поступает кислород, выполняющий роль окислителя. Восстановителем является цинковый электрод, который здесь изнашивается (растворяется) более интенсивно, чем в обычном гальваническом элементе. Поэтому у перспективных воздушно-цинковых элементов цинковый электрод после износа будет заменяться запасным.

Разрабатываются топливные и полутопливные элементы, где будут использоваться другие виды топлива и металлов для электродов.

Воздушно-цинковые генераторы — значительно более мощные источники тока (до нескольких десятков киловатт), которые могут найти применение для электромобилей, являются как бы комбинацией обычного гальванического элемента, аккумулятора и топливного элемента. Катод здесь выполнен, как в топливном элементе, и воздух (кислород) к нему подается принудительно. А анод устроен, как цинковый электрод гальванического элемента.

Схема устройства воздушно-цинкового генератора изображена на рисунке 3.6. Электролит постоянно циркулирует сквозь элементы и уносит с собой окись цинка, которая накапливается в фильтре. При заряде эта окись поступает обратно в элемент и восстанавливается в цинк на положительных электродах, а кислород, выделяющийся на катодах, возвращается в атмосферу.

Масса такой батареи, приходящаяся на единицу энергии, в 4...5 раз меньше, чем аналогичная характеристика современных свинцовых тяговых аккумуляторных батарей, и составляет 7...9 кг/(кВт·ч). Трудности их производства заключаются пока в сложности изготовления высококачественного электрода воздушной деполяризации.

3.6. ТЕРМОЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРЫ

Действие термоэлектродвигателя основано на использовании *термоэлектрического эффекта*, сущность которого заключается в том, что при нагревании места соединения (спая) двух разных металлов между их свободными концами, имеющими более низкую температуру, возникает разность потенциалов — так называемая *термоэлектродвижущая сила*. Если замкнуть такой термоэлемент (термопару) на внешнее сопротивление, то по цепи потечет электрический ток

рис. 3.7. Схема получения термоэлектричества:

ГС — горячий спай; ХС — холодный спай; 1 — отрицательный электрод; 2 — положительный электрод.

(рис. 3.7). Происходит прямое преобразование тепловой энергии в электрическую.

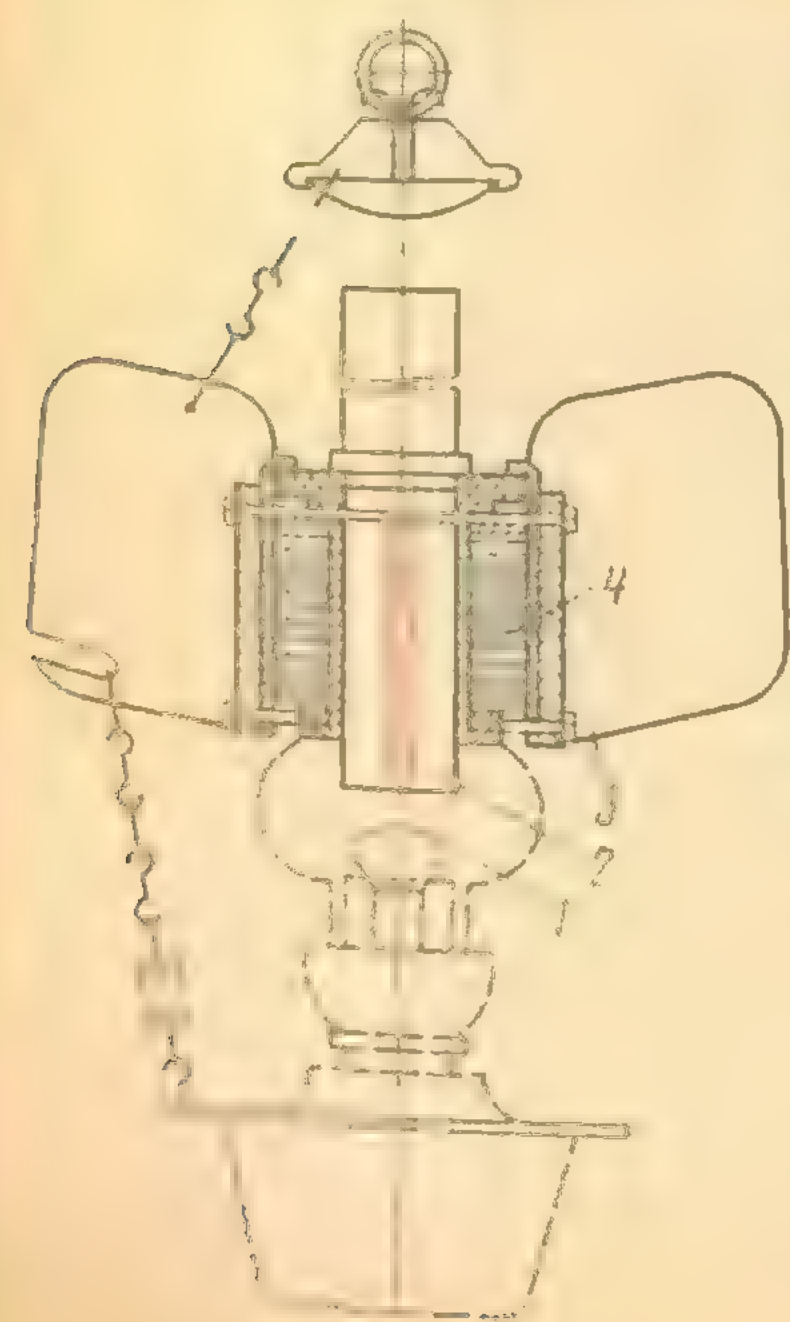
Значение термоэлектродвижущей силы (В) приближенно определяют по формуле

$$E = \alpha (T_1 - T_2) \cdot 10^{-3}, \quad (3.8)$$

где T_1 и T_2 — соответственно температуры нагретого и холодного спаев (концов) термопары; α — коэффициент термо-ЭДС, зависящий от того, какие металлы участвуют в спае. Для пары висмут — сурьма α достигает 11,2 мВ/град, для пары железо — константан — 5 мВ/град, для пары железо — алюминий — 1,22 мВ/град и т. д.

Если температуру холодного спаив поддерживать постоянной, термо-ЭДС будет изменяться пропорционально изменению температуры горячего спаив. Это дает возможность применять термопары для измерения температуры. Коэффициент полезного действия таких термопар менее 0,1 %.

В настоящее время разработаны термопары со значительно большим коэффициентом полезного действия. На их основе созданы термоэлектрогенераторы. На рисунке 3.8 показан термоэлектрогенератор с керосиновой лампой. Стекло 1 укорочено, внутрь него входит нижняя часть металлического теплопередатчика 2. На боковой поверхности теплопередатчика расположены блоки термобатарей 4. Для охлаждения холодных спаев термоэлементов к внешним поверхностям блоков прикреплены металлические радиаторные ребра 3 воздушного охлаждения.



Основным преимуществом термоэлектрогенератора по сравнению с сухими элементами и батареями является уменьшение расхода цветных металлов. Кроме того, он может неограниченно долго храниться в нерабочем состоянии, а в условиях эксплуатации срок его службы превышает 10 000 ч. Он устойчив в работе, дает стабильное напряжение, не боится коротких замыканий, не требует специального ухода. При разности температур между спаями порядка 300° каждый термоэлемент развивает ЭДС около 55 мВ.

Коэффициент полезного действия преобразователя тепловой энергии в электриче-

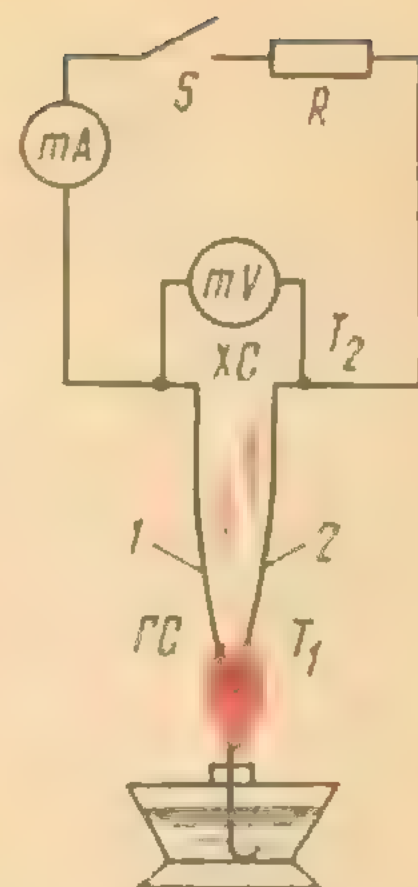


Рис. 3.8. Термоэлектрогенератор для питания радиоаппаратуры:

1 — стекло лампы; 2 — металлический теплоноситель; 3 — охлаждающие металлические ребра; 4 — блоки термобатарей.

скую составляет 3,5% и выше. Он зависит от целого ряда факторов, но в первую очередь как от качества самих используемых для термопар материалов, так и от уровня технологии производства этих термопар. В настоящее время коэффициент полезного действия полупроводниковых термопар достигает 14%.

Удельная мощность современных термоэлектрогенераторов находится в пределах от 3 до 22 Вт на 1 кг установки. Но в перспективе она возрастает до 220 Вт/кг и более.

В качестве материалов термопар используют цинк, сурьму, теллур, уголь и др., а также сплавы различных металлов.

3.7. ФОТОЭЛЕМЕНТЫ И СОЛНЕЧНЫЕ БАТАРЕИ

Фотоэлемент — это полупроводниковое устройство, в котором световая энергия преобразуется в электрическую.

В качестве полупроводника в них используются селен, германий, кремний. Селеновые фотоэлементы используют в *люксметрах* — приборах для измерения освещенности. Селеновый фотоэлемент является неотъемлемой частью фотографического экспонометра, который измеряет освещенность фотографируемого объекта. Коэффициент полезного действия селеновых фотоэлементов не превышает 0,1% и их используют лишь для измерительных целей, германиевые фотоэлементы обладают КПД около 5%, кремниевые — от 7 до 11% и выше.

Солнечные батареи служат для прямого преобразования излучаемой солнцем энергии в электрическую. Их составляют из кремниевых фотоэлементов.

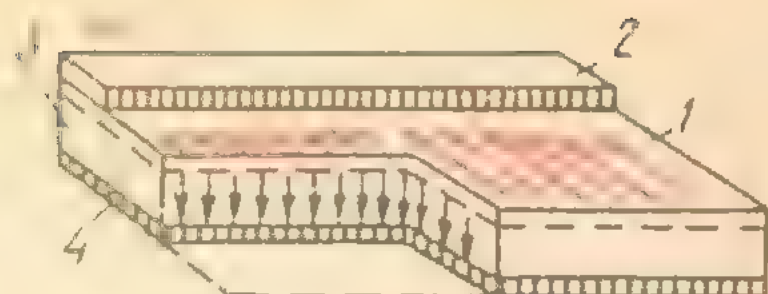
На рисунке 3.9 приведена схема устройства кремниевого фотоэлемента*. Тонкая пластинка кремния покрыта очень тонким (прозрачным) слоем золота. Под действием светового потока в элементе происходит интенсивное движение электронов от поверхности внутрь кремния. В замкнутой цепи течет ток. Электродвижущая сила такого элемента составляет около 0,5 В.

Если произошло короткое замыкание выводных проводов элемента, то при прямом солнечном освещении и площади освещаемой поверхности 1 см² ток короткого замыкания достигает 0,025 А.

Чтобы увеличить напряжение, элементы соединяют в батарею последовательно. Если нужно увеличить ток, элементы соединяют параллельно. Для кремниевого фотоэлемента при отсутствии потерь теоретический КПД составляет 22%. Из-за различных потерь (отражение солнечных лучей от поверхности фотоэлемента, наличие сопротивления в самом элементе и контактных выводах) КПД значительно снижается. Подсчитано, что с каждого квадратного метра поверхности, перпендикулярной солнечным лучам, на уровне верхних слоев атмосферы можно получать мощность, равную 1350 Вт. Энергия, даваемая солнечной батареей площадью 70 м²,

* О физических процессах в полупроводниках см. гл. 19.

рис. 3.9. Схема устройства кремниевого фотоэлемента: 1 — слой кремния, в котором появляется избыток электронов при воздействии на него световых лучей (*n*-слой); 2 — токоотвод от *n*-слоя; 3 — слой кремния, в котором возникает недостаток электронов при воздействии на него световых лучей (*p*-слой); 4 — токоотвод от *p*-слоя (стрелками показано движение носителей тока в *n*-слое и *p*-слое).



смонтированной на крыше небольшого дома, могла бы обеспечить население этого дома электрической энергией для освещения и отопления. Эта батарея должна работать совместно с аккумуляторной батареей, которая днем будет заряжаться, а вечером отдавать энергию для питания электроприборов.

В связи со сложным процессом получения чистого кремния солнечные батареи пока довольно дороги, но они уже применяются для питания радиотехнических устройств. В частности, солнечные батареи применены на искусственных спутниках Земли и космических кораблях для питания радиоаппаратуры и других устройств. Разработаны и находятся в опытно-хозяйственной эксплуатации солнечные батареи для питания электродвигателей привода щитов на оросительных каналах и подъема воды из колодцев на отдаленных пастбищах. С совершенствованием технологии получения чистого кремния солнечные элементы получают широкое применение в повседневной жизни.

Разработаны солнечные батареи, позволяющие получать до 100 Вт с 1 м² площади набора элементов.

В ряде стран уже выпускаются солнечные батареи и микро-батареи, которые состоят из нескольких десятков соединенных последовательно солнечных элементов в герметично закрытом прозрачном сосуде, например, из акриловой пластмассы. Над каждым элементом могут размещаться вплавленные линзы для концентрации солнечных лучей на элементе. Напряжение у таких батарей 6...12 В, а ток при полной интенсивности облучения — 36...18 мА. Такие батареи включаются на подзарядку аккумулятора. Его разряд предотвращается включением в цепь заряда диода.

В атомных батареях на пластинку кремния или германия нанесен слой радиоактивного материала, излучение которого заменяет свет в фотоэлементах. В зависимости от скорости распада (периода полураспада)* радиоактивного материала батарея может работать без замены до нескольких десятков лет. Из-за высокой стоимости батареи и чрезвычайной вредности радиоактивных излучений атомные батареи не имеют перспектив широкого практического применения.

Контрольные вопросы к главе 3. 1. Как протекает процесс электролиза? 2. Как устроен гальванический элемент? 3. Чем отличается аккумулятор от гальванического элемента? 4. Чем отличается щелочной аккумулятор от кислотного? 5. Какие данные заложены в обозначении марки аккумулятора? 6. Как определить зарядный ток для кислотного и для щелочного аккумулятора? 7. Как устроен электрохимический генератор? 8. В чем состоит принцип действия термоэлектрогенератора? 9. Как устроены солнечные батареи?

* Период полураспада радиоактивного вещества — время, за которое количество данного вещества вследствие распада уменьшается в 2 раза. Интенсивность радиоактивного излучения при этом также уменьшается в 2 раза.

4.1. ЕСТЕСТВЕННЫЙ МАГНИТ И МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Магнетизм — совокупность определенных свойств и явлений, связанных с особым родом взаимодействия тел. Это естественное проявление природных сил. Наша планета Земля обладает магнитными свойствами и по сути является огромным естественным магнитом, наводимым, по-видимому, гигантскими электрическими токами в недрах планеты. Магнитные свойства присущи некоторым железным рудам (магнитный железняк). Широко известна способность стальных предметов притягивать и прочно удерживать другие стальные предметы. Эта способность — одно из проявлений магнитной природы вещества этих тел. Такие тела называют магнитами.

Молекулы железа представляют собой элементарные магнитные частицы, что нужно рассматривать как следствие действия молекулярных электрических токов. В немагнитном железном стержне молекулы расположены в беспорядке (рис. 4.1, а). Под действием естественного магнитного поля молекулы располагаются в определенном порядке (рис. 4.1, б). Железный стержень приобретает магнитные свойства. Концы стержня, которые обладают максимальной магнитной силой, называют полюсами — северным и южным по аналогии с магнитными полюсами Земли.

Естественные магниты выполняют стержневыми и подковообразными. К подковообразному магниту прилагают якорь — стальной брусок, который замыкает магнитные силовые линии.

Пространство вокруг полюсов магнита, в котором проявляются магнитные свойства, называется магнитным полем. Одноименные полюса отталкиваются, а разноименные — притягиваются.

Согласно закону Кулона, сила, с которой два полюса действуют друг на друга, прямо пропорциональна произведению их магнитных сил и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Если на два разноименных полюса магнита наложить бумагу и насыпать сверху железные опилки, то они расположатся в определенном порядке, замыкаясь непрерывными линиями от полюса к полюсу (рис. 4.2, а). Магнитные силовые линии от двух одноименных полюсов (рис. 4.2, б) отталкиваются, не замыкаясь. Плотность магнитных силовых линий у полюсов выше, чем на некотором расстоянии от них.

Принято считать, что силовые линии

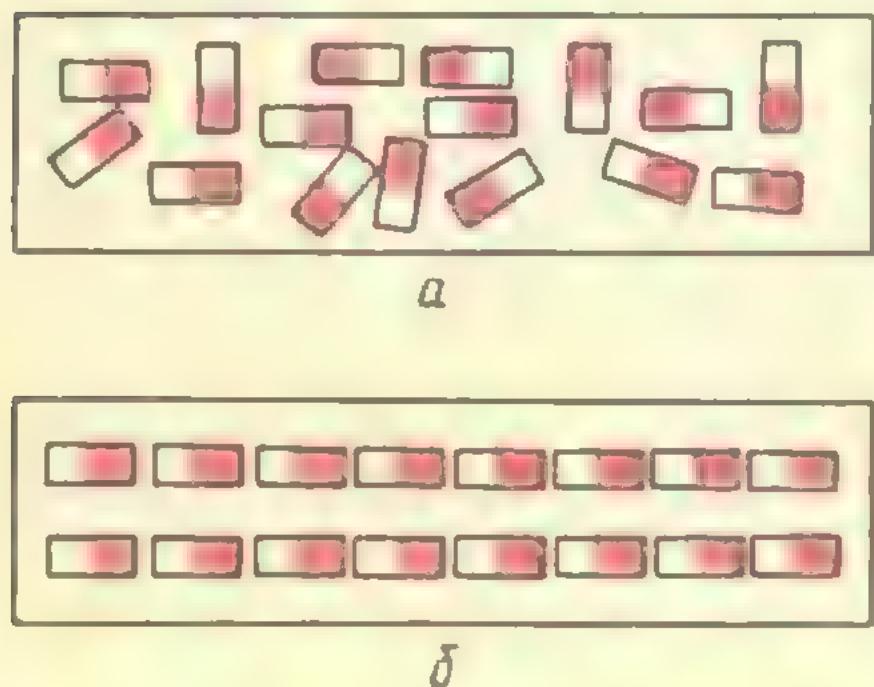


Рис. 4.1. Расположение молекул в стержне:

а — стержень немагнитный; б — стержень намагниченный.

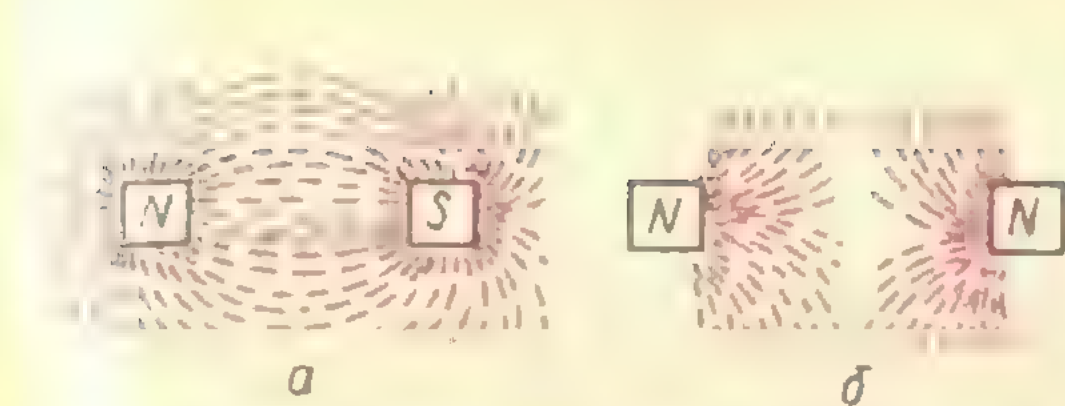


рис. 4.2. Магнитные силовые линии между двумя разноименными (а) и одноименными (б) полюсами магнита.

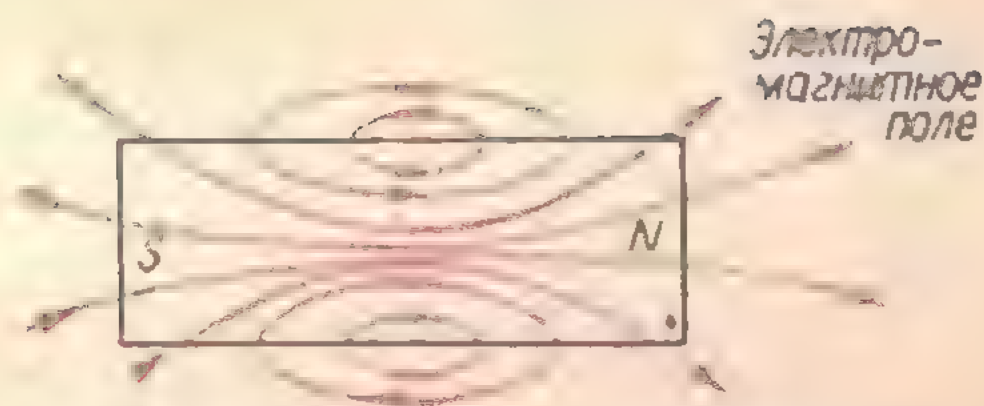


Рис. 4.3. Направление магнитных силовых линий.

окружающего магнитного поля направлены от северного полюса к южному (рис. 4.3). Внутри стержня магнитные линии замыкаются от южного полюса к северному.

4.2. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ

Электрический ток в проводнике образует вокруг него магнитное поле. Электрический ток и магнитное поле — это две неотделимые друг от друга части единого физического процесса. Магнитное поле постоянных магнитов порождается молекулярными электрическими токами, образованными движением электронов по орбитам и вращением их вокруг своих осей.

Магнитное поле проводника и направление его силовых линий можно определить при помощи магнитной стрелки. Магнитные линии прямолинейного проводника имеют форму концентрических окружностей, расположенных в плоскости, перпендикулярной проводнику. Направление магнитных силовых линий зависит от направления тока в проводнике. Если ток в проводнике идет от наблюдателя, то силовые линии направлены по часовой стрелке.

Зависимость направления поля от направления тока определяется правилом буравчика: при совпадении поступательного движения буравчика с направлением тока в проводнике направление вращения ручки совпадает с направлением магнитных линий.

Правилом буравчика можно пользоваться и для определения направления магнитного поля в катушке, но в следующей фор-

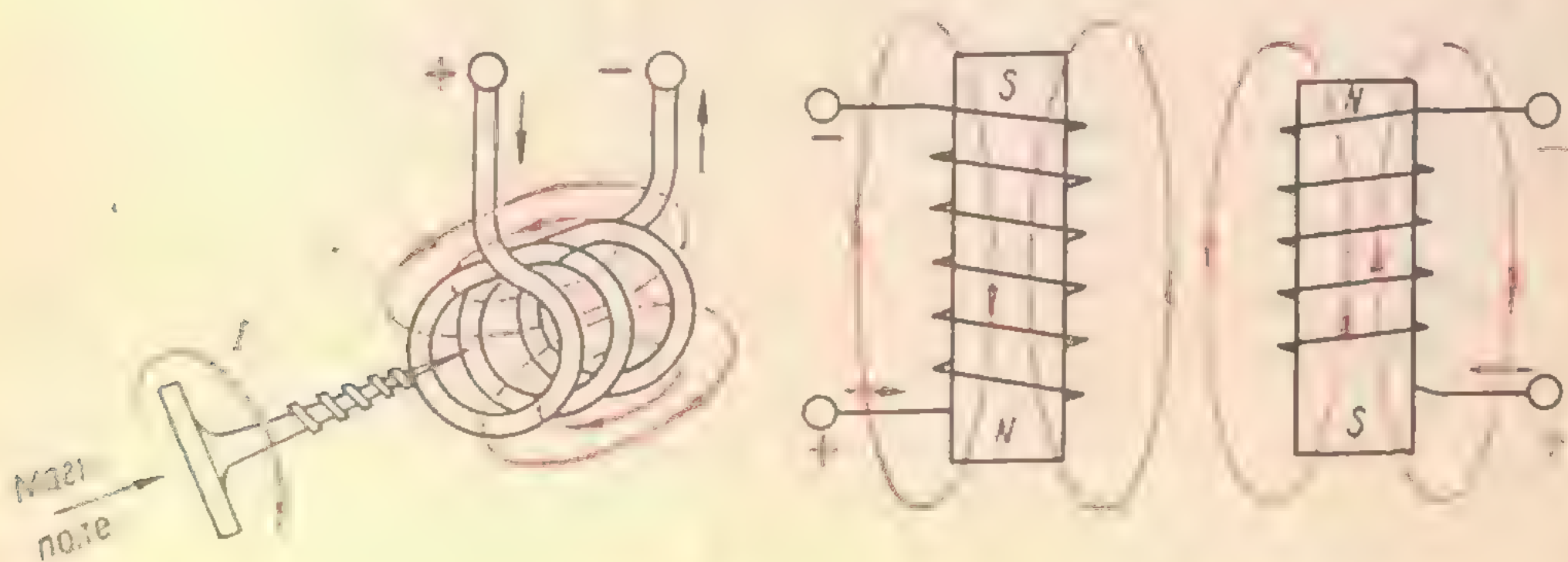


Рис. 4.4. Магнитное поле катушки и определение его направления (к правилу буравчика).

мулировке: если направление вращения рукоятки буравчика совместить с направлением тока в витках катушки, то поступательное движение буравчика покажет направление силовых линий поля внутри катушки (рис. 4.4). Внутри катушки эти линии идут от южного полюса к северному, а вне ее — от северного к южному.

Правилом буравчика можно пользоваться также и при определении направления тока, если известно направление силовых линий магнитного поля.

4.3. НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ, МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ И МАГНИТНЫЙ ПОТОК

Напряженность магнитного поля. Сила, с которой магнитное поле притягивает железные тела, пропорциональна значению протекающего по проводнику тока. Если провод уложен в виде катушки, то эта сила тем больше, чем больше витков имеет катушка. Произведение силы тока I на число витков ω катушки называют *ампер-витками*. Оно равно магнитодвижущей силе (м.д.с.) катушки, измеряемой в амперах (А). Ампер-витки $I\omega$, приходящиеся на единицу длины l катушки, называют *напряженностью магнитного поля* H :

$$H = I\omega / l. \quad (4.1)$$

Единица измерения напряженности магнитного поля

$$1 \frac{\text{ампер} \cdot \text{виток}}{\text{метр}} = 1 \text{ А/м}.$$

Напряженность, рассчитанная по формуле (4.1), соответствует напряженности внутри цилиндрической катушки. Если катушку замкнуть в виде кольца, то силовые линии замкнутся по кругу без рассеивания, и тогда формула (4.1) будет верна для любой точки такой катушки (тороида).

Магнитная индукция B_0 , или интенсивность магнитного поля, в катушке без сердечника

$$B_0 = \mu_0 H, \quad (4.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Г/м} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м}$ — магнитная постоянная (магнитная проницаемость свободного пространства или вакуума).

Если внутрь катушки ввести железный сердечник, то при тех же витках и силе тока магнитная индукция, или интенсивность магнитного поля, возрастает в значительной мере. Причина этого явления заключается в том, что молекулярные токи в железе под действием магнитного поля ориентируются относительно этого поля. Молекулярные магнитные поля при этом совпадают с внешним магнитным полем и усиливают его. Способность к увеличению интенсивности магнитного поля зависит от свойств материала сердечника, характеризуется *относительной магнитной проницаемостью* μ :

$$\mu = \frac{\text{Интенсивность магнитного поля в катушке с сердечником}}{\text{Интенсивность магнитного поля в катушке без сердечника}} = \frac{B}{B_0}. \quad (4.3)$$

Это безразмерная величина. Для воздуха значение μ принимают равным 1.

Произведение $\mu_0 \mu = \mu_a$ называется абсолютной магнитной проницаемостью. Тогда магнитная индукция B для катушки с сердечником

$$B = \mu_a H = \mu_0 \mu H, \quad (4.4)$$

где μ — относительная магнитная проницаемость материала сердечника.

Единица измерения магнитной индукции — тесла (Тл):

$$1 \text{ Тл} = 1 \text{ В с/м}^2.$$

Пример 4.1. Вычислить напряженность магнитного поля внутри сравнительно длинной катушки, если число витков $w = 300$, длина катушки $l = 0,5$ м, а ток катушки $I = 0,6$ А. Определить также магнитную индукцию B , если в катушку введен сердечник с $\mu = 7000$.

Решение. Напряженность магнитного поля

$$H = \frac{Iw}{l} = \frac{0,6 \cdot 300}{0,5} = 360 \text{ А/м}.$$

Магнитная индукция в сердечнике

$$B = \mu_0 \mu H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 7000 \cdot 360 = 3,17 \text{ Тл}$$

Магнитным потоком Φ называют произведение магнитной индукции B (Тл) на площадь сечения S (м²) сердечника катушки:

$$\Phi = BS. \quad (4.5)$$

Единица магнитного потока — вебер (Вб).

Пример 4.2. Найти магнитный поток Φ катушки, длина которой $l = 0,5$ м, число витков $w = 300$, ток $I = 0,6$ А, сердечник из электротехнической стали Э42 с площадью поперечного сечения 10^{-3} м².

Решение. Напряженность магнитного поля

$$H = \frac{wl}{l} = \frac{300 \cdot 0,6}{0,5} = 360 \text{ А/м}.$$

По кривой намагничивания (рис. 4.5) находим магнитную индукцию при $H = 360$ А/м:

$$B \approx 1,2 \text{ Тл}.$$

Магнитный поток

$$\Phi = BS = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Вб}.$$

4.4. МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ

Все материалы по их магнитным свойствам принято разделять на парамагнетики, диамагнетики и ферромагнетики.

Парамагнетики усиливают внешнее магнитное поле, поскольку молекулярные токи в веществе ориентируются так, что создава-

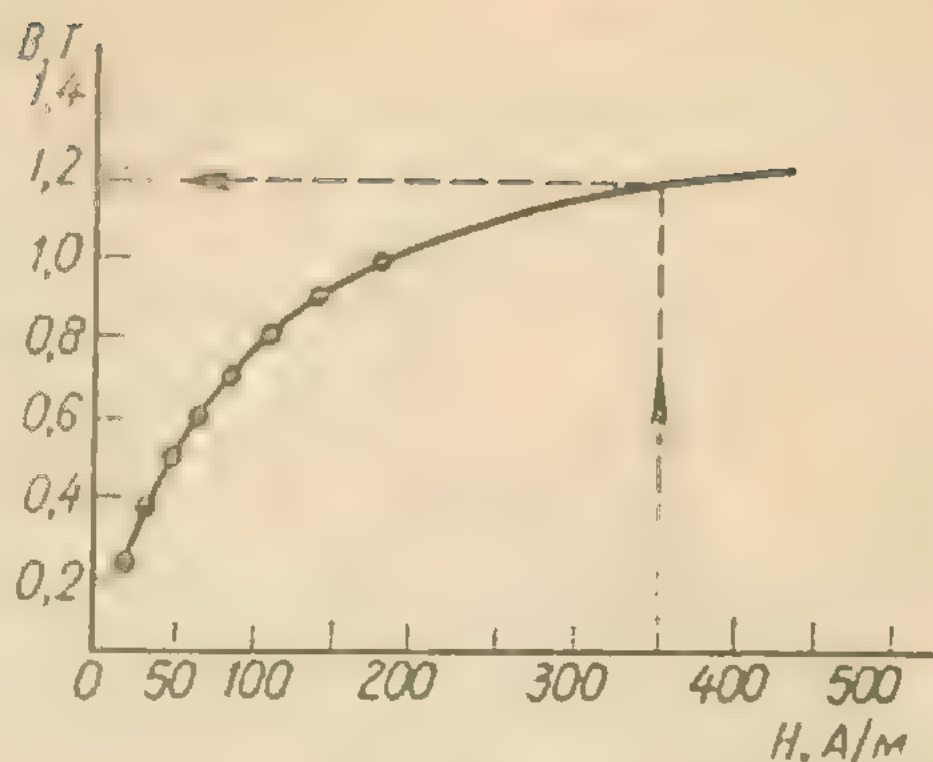


Рис. 4.5. Кривая намагничивания стали 1512 (Э42).

емое ими магнитное поле совпадает с внешним. К парамагнетикам относят олово ($\mu = 1,000004$), марганец ($\mu = 1,0037$), платину ($\mu = 1,000364$), алюминий ($\mu = 1,000023$) и др.

Диамагнетики — это вещества, молекулярные токи которых ориентируются так, что создаваемое ими магнитное поле ослабляет внешнее магнитное поле. К ним можно причислить медь ($\mu = 0,999991$), серебро ($\mu = 0,999981$), графит ($\mu = 0,999895$), цинк, кадмий, висмут, сурьму, воду и др.

Ферромагнетики значительно усиливают внешнее магнитное поле, причем магнитная проницаемость меняется в зависимости от напряженности поля и от характера обработки материала. Ферромагнетики — это железо, никель, кобальт, а также сталь, чугун и некоторые другие сплавы.

Относительная магнитная проницаемость парамагнетиков и диамагнетиков близка к единице и практически не меняется при изменении напряженности поля.

На рисунке 4.5 построена кривая намагничивания для стали 1512 (ранее обозначалась Э42). Такими кривыми удобно пользоваться при расчетах.

Как видно из этой таблицы, характеристики намагничивания ферромагнитных материалов изменяются в довольно широких пределах.

4.1. Характеристики намагничивания некоторых электротехнических сталей

Марка стали	Толщина, мм	Категория стали	Индукция B (Тл) при напряженности H (А/мм) не менее				
			1000	2500	5000	10000	30 000
2011	0,65	Холоднокатаная	1,48	1,6	1,7	1,8	2,02
2211	0,65	То же	1,4	1,56	1,65	1,73	1,96
2311	0,65	—»—	1,36	1,52	1,62	1,72	1,96
2411	0,5	—»—	1,37	1,49	1,6	1,73	1,96
1211	1,0	Горячекатаная	—	1,53	1,63	1,76	2
1311	0,5	То же	—	1,48	1,59	1,73	1,95
1511	0,5	—»—	1,3	1,46	1,57	1,7	1,9
1512 (Э42)	0,5	—»—	1,29	1,45	1,56	1,69	1,89

Индукция B в ферромагнитном сердечнике складывается из индукции B_0 внешнего магнитного поля и индукции J магнитного поля ферромагнитной среды — намагниченности среды:

$$B = B_0 + J = \mu_0 H + J. \quad (4.6)$$

В то же время

$$B = \mu_a H, \quad (4.7)$$

отсюда следует, что

$$\mu_a = \mu_0 + J/H, \quad (4.8)$$

то есть магнитная проницаемость вещества равна сумме магнитной проницаемости вакуума μ_0 и некоторой добавочной магнитной проницаемости, равной отношению намагниченности J к напряженности H внешнего магнитного поля.

Намагниченность среды не может возрастать бесконечно. При некотором значении напряженности H поля наступает магнитное насыщение $J_{\text{нас}}$, при котором дальнейшее увеличение напряженности H не приводит к увеличению магнитной индукции B .

Графически процесс насыщения показан на рисунке 4.6. Из графика видно, что для ферромагнетиков относительная магнитная проницаемость не является постоянной величиной, а зависит от напряженности поля H . Каждый ферромагнитный материал имеет характерную для него кривую намагничивания. Этими кривыми пользуются при расчете магнитных цепей электрических машин и аппаратов.

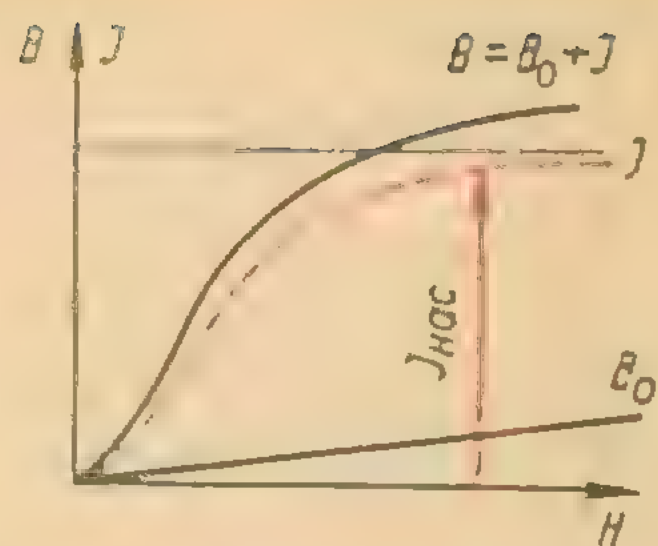


Рис. 4.6. Кривая намагничивания и ее составляющие.

4.5. ОСТАТОЧНЫЙ МАГНЕТИЗМ. ПОТЕРИ НА ПЕРЕМАГНИЧИВАНИЕ

На рисунке 4.7 показано, как растет индукция B в ферромагнитном сердечнике с увеличением тока в катушке, то есть напряженности поля H :

$$B = \mu_a H = \mu_a \omega I / l. \quad (4.9)$$

Если сердечник довести до насыщения (максимальная магнитная индукция $+B_{\text{max}}$ в точке A), а затем, уменьшая ток в сердечнике, размагничивать сталь, то магнитная индукция будет уменьшаться по новой кривой до точки C . Эта точка соответствует моменту, когда ток в катушке равен нулю ($H=0$). Однако индукция в сердечнике снизилась не до нуля, а до некоторого значения B_r . Эта индукция носит название *остаточной магнитной индукции*. Явление отставания магнитной индукции B от намагничивающей силы H называют *гистерезисом*.

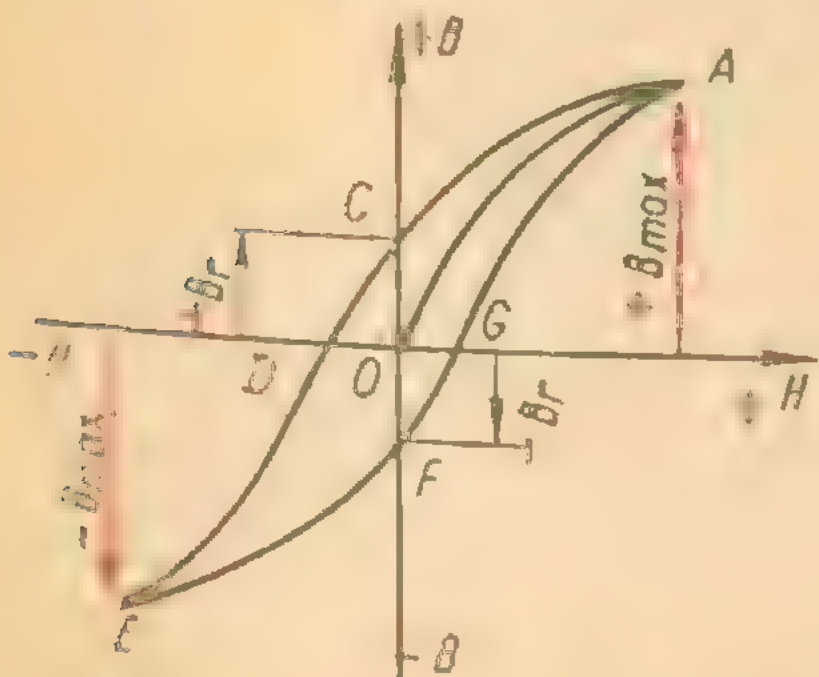


Рис. 4.7. Циклическая кривая намагничивания (петля гистерезиса).

Чтобы сталь полностью размагнитить, в катушку следует подать ток обратного направления, который создаст бы напряженность, выражаемую отрезком OD . Чем больше этот отрезок, тем больше требуется энергии на размагничивание. Отрезок OD характеризует собой сопротивляемость стали размагничиванию и называется *задерживающей (коэрцитивной) силой*. Если и дальше увеличивать ток в катушке, индукция снова возрастет до значения насыщения $-B_{\text{max}}$, но с

измененным направлением магнитных силовых линии. Размагничивание в обратном направлении дает остаточную индукцию — B_r . Увеличивая ток через катушку в первоначальном направлении, снова возвращаются в точку A .

Кривую $ACDEFGA$ называют *циклической кривой перемагничивания*, или *петлей гистерезиса*.

На перемагничивание расходуется энергия, которая превращается в теплоту. Чем больше площадь петли гистерезиса, тем больше потери на перемагничивание и тем больше выделяется теплоты в сердечнике.

4.6. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Магнитные материалы, применяемые в электротехнике, принято разделять на магнитно-мягкие и магнитно-твердые.

Магнитно-мягкие материалы характеризуются высокой относительной магнитной проницаемостью и малой задерживающей (коэрцитивной) силой, то есть малыми потерями на перемагничивание. Поэтому их используют для изготовления сердечников электромагнитов, полюсных наконечников и т. д. С целью уменьшения потерь на вихревые токи, возникающие в сплошном сердечнике вокруг силовых линии переменного магнитного поля (см. п. 5.4), сердечники выполняют из отдельных пластин стали, изолированных друг от друга. Чтобы увеличить удельное сопротивление, в сталь добавляют несколько процентов кремния. Такую листовую сталь с повышенным (до 4%) содержанием кремния называют *электротехнической*.

К магнитно-мягким материалам причисляют также *магнетодиэлектрики* и *ферриты*, которые очень хорошо проводят магнитные потоки и имеют малую электропроводность, чем объясняется снижение в них потерь энергии. Ферриты относят к полупроводникам.

Магнетодиэлектрики изготавливают из железного порошка, применяя в качестве связующего материала электроизолирующий лак. Наиболее распространенные магнетодиэлектрики: карбонильное железо, пермаллой, альсифер, магнетит и др. Начальная относительная магнитная проницаемость μ карбонильного железа равна 2000...3000, а максимальная магнитная проницаемость при магнитной индукции насыщения $B_{нас} = 2 \text{ Тл}$ составляет 20 000...21 000. У пермаллоя μ изменяется от 10 000 до 100 000.

Ферриты представляют собой соединения окислов железа с металлами — никелем, цинком и др. Ферриты значительно превосходят по своим свойствам магнетодиэлектрики, так как имеют очень высокое удельное сопротивление и значительно большие начальную и максимальную магнитные проницаемости.

Магнитно-твердым материалам свойственны небольшая магнитная проницаемость μ , высокая остаточная магнитная индукция B_r и значительная задерживающая (коэрцитивная) сила H_c . Поэтому из них изготавливают постоянные магниты, применяемые в технике

связи и электронизмерительной технике. Наиболее распространены магнитно-твердые материалы из вольфрамовых, хромовых и кобальтовых сталей, имеющих задерживающую силу H_c порядка 5000...14 000 А/м и остаточную магнитную индукцию B_r , равную 0,8...1,0 Тл.

Магнитно-твердым материалам из сплавов альни, альниси, альнико, магнико присущи $H_c = 40\,000...64\,000$ А/м и $B_r = 0,5...1,25$ Тл. Благодаря высоким магнитным свойствам этих сплавов постоянные магниты из них получаются значительно меньшими по размерам (в 10...15 раз), чем постоянные магниты из вольфрамовой, кобальтовой и других сталей.

4.7. ЗАКОН ОМА ДЛЯ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Как в электрической цепи сила тока зависит от приложенного напряжения и от сопротивления, оказываемого элементами цепи, так и в магнитной цепи магнитный поток Φ зависит от приложенной магнитодвижущей силы (м.д.с.), численно равной $I\omega$, и от сопротивления R_m магнитному потоку:

$$\Phi = I\omega / R_m. \quad (4.10)$$

Эта формула выражает закон Ома для магнитной цепи.

Магнитное сопротивление R_m определяют в зависимости от длины силовых линий l (м), площади поперечного сечения силового потока S (м²) и абсолютной магнитной проницаемости μ_a [Вб/(А·м)]:

$$R_m = \frac{l}{\mu_a S}. \quad (4.11)$$

Нетрудно уловить аналогию формулы (4.11) формуле (2.23) — для определения сопротивления проводника электрическому току.

Подставив в выражение (4.10) вместо R_m его значение из формулы (4.11), получим:

$$\Phi = \frac{I\omega}{\frac{l}{\mu_a S}} = \frac{I\omega \mu_a S}{l}. \quad (4.12)$$

При расчете магнитной цепи задача чаще всего сводится к определению необходимой м.д.с. для того, чтобы получить в магнитопроводе определенный магнитный поток или заданную магнитную индукцию, например в воздушном зазоре. Ниже излагается путь расчета применительно к магнитопроводу, показанному на рисунке 4.8.

Магнитный поток замыкается через сердечник и воздушный зазор δ . Отдельные участки сердечника могут быть выполнены из различных материалов с разными площадями сечения. Через сечение каждого из участков сердечника проходит один и тот же магнитный поток Φ :

$$\Phi = B_1 S_1 = B_2 S_2 = B_3 S_3 \text{ и т. д.}$$

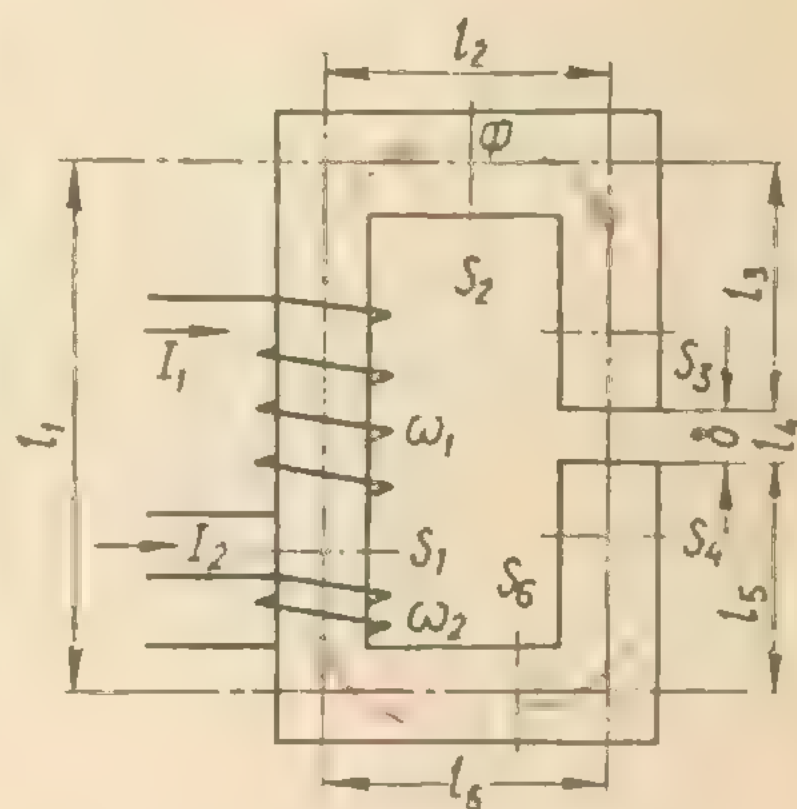


Рис. 4.8. Магнитопровод.

По закону Ома для магнитной цепи

$$\Phi = \frac{\Sigma I \omega}{\Sigma R}, \quad (4.13)$$

где $\Sigma I \omega$ — алгебраическая сумма ампер-витков, численно равная общей м.д.с. обмотки; ΣR — сумма магнитных сопротивлений участков, на которых индукция B и напряженность H постоянны.

Подставив формулу (4.11) для магнитной цепи, показанной на рисунке 4.8, можно найти:

$$\Sigma R = R_{a1} + R_{a2} + R_{a3} + R_{a4} = \frac{l_1}{\mu_{a1} S_1} + \frac{l_2}{\mu_{a2} S_2} + \dots + \frac{l_6}{\mu_{a6} S_6}, \quad (4.14)$$

где $\mu_{a1}, \mu_{a2}, \dots, \mu_{a6}$ — магнитные проницаемости участков магнитной цепи.

После подстановки значения ΣR из (4.14) в (4.13)

$$\Phi = \frac{\Sigma I \omega}{\frac{l_1}{\mu_{a1} S_1} + \frac{l_2}{\mu_{a2} S_2} + \dots + \frac{l_6}{\mu_{a6} S_6}},$$

откуда

$$\frac{\Phi l_1}{\mu_{a1} S_1} + \frac{\Phi l_2}{\mu_{a2} S_2} + \dots + \frac{\Phi l_6}{\mu_{a6} S_6} = \Sigma I \omega. \quad (4.15)$$

Ввиду того что

$$\Phi / S_1 = B_1; \quad \Phi / S_2 = B_2,$$

а также что

$$B_1 / \mu_{a1} = H_1; \quad B_2 / \mu_{a2} = H_2 \text{ и т. д.},$$

равенство (4.15) принимает следующий вид:

$$H_1 l_1 + H_2 l_2 + \dots + H_6 l_6 = I_1 \omega_1 + I_2 \omega_2 + \dots + I_6 \omega_6, \quad (4.16)$$

где произведения $H_1 l_1$; $H_2 l_2$ представляют собой м.д.с. отдельных участков.

4.8. ЭЛЕКТРОМАГНИТЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Электрические магниты находят самое широкое применение в различных аппаратах, используемых в электротехнике, телефонии, радиотехнике и других отраслях техники. Это электромагнитные выключатели, различные реле, магнитные муфты, магнитные подъемники и т. д.

Электромагнитные муфты, заменяя фрикционные, служат для включения нагрузки на двигатель. Их применяют в автомобилях, тепловозах, поршневых компрессорах и т. д. Электромагнитные муфты подразделяют на муфты трения и муфты скольжения.

Электромагнитная муфта трения состоит из ведущей и ведомой половин, притягивающихся под действием магнитного поля при включении катушек. В некоторых муфтах трения воздушный зазор между их половинами заполнен магнитным материалом, состоящим из смеси ферромагнитного порошка и порошкообразного или жидкого диэлектрика. Под действием магнитного поля вязкость этой смеси сильно возрастает, чем обеспечивается надежное сцепление.

Устройство электромагнитной муфты скольжения рассматривается в п. 17.10.

Подъемные магниты применяются для захвата чугуновых и стальных деталей при подъеме и перемещении их при помощи кранов. Эти магниты изготавливают на разную подъемную массу. Отдельные из них способны поднимать стальные болванки массой до 20 т. Если площадь поперечного сечения стального сердечника равна S (м^2), магнитная индукция между плоскостями сердечника и поднимаемой деталью равна B (Тл), то подъемная сила (Н) электромагнита определится так:

$$P = \frac{SB^2}{2,55} 10^6. \quad (4.17)$$

Пример 4.3. Определить подъемную силу P электромагнита, если

$$S = 10 \text{ см}^2 (10^{-3} \text{ м}^2) \text{ и } B = 0,2 \text{ Тл.}$$

Решение. Подъемная сила

$$P = \frac{10^{-3} \cdot 0,2^2}{2,55} \cdot 10^6 = 15,7 \text{ Н.}$$

4.9. ПРОВОДНИК С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Если в поле магнита (или электромагнита) поместить проводник с током, который создает свое собственное магнитное поле, то оба магнитных поля, взаимодействуя между собой, создадут силу, которая стремится вытолкнуть проводник из поля. Как видно на рисунке 4.9, а, магнитные силовые линии поля и проводника слева от него совпадают по направлению и их плотность здесь больше, чем справа от проводника, где магнитные силовые линии проводника идут навстречу линиям поля и ослабляют одна другую. Проводник выталкивается из магнитного поля вправо. Если изменить направление тока в проводнике (рис. 4.9, б), то направление силы также изменится.

Сила, с которой поле действует на проводник,

$$F = BIl, \quad (4.18)$$

где F — электромагнитная сила, Н; B — магнитная индукция поля, Тл; I — сила тока в проводнике, А; l — действующая в поле длина проводника, м.

Для определения направления силы, действующей на проводник с током в магнитном поле, применяют правило левой руки: если расположить левую руку так, чтобы магнитные линии входили в ладонь, а вытянутые четыре пальца совпадали с направлением тока в проводнике, то большой палец укажет направление действия силы, приложенной к проводнику.

Если два проводника с током расположить рядом друг с другом, то их магнитные поля будут взаимодействовать. Когда ток в двух параллельных проводах направлен в одну сторону

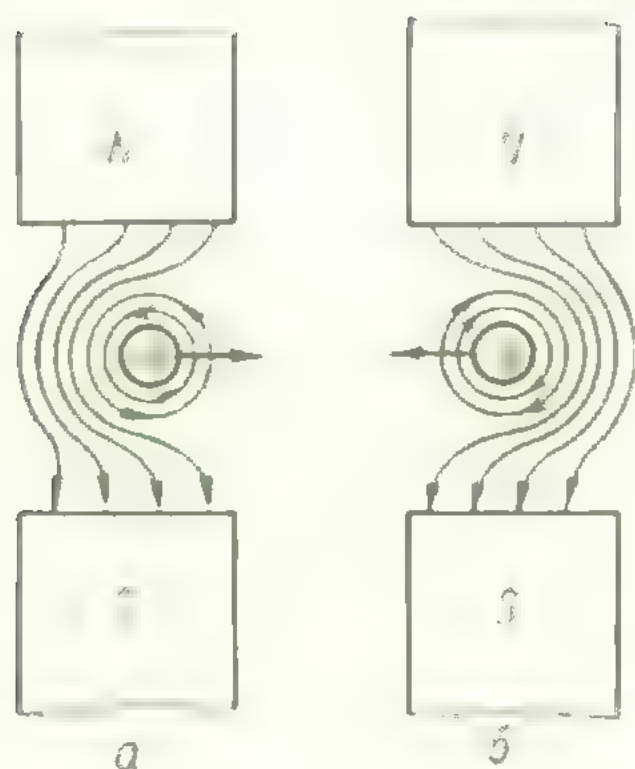


Рис. 4.9. Взаимодействие магнитного поля и проводника с током:

a — ток в проводнике направлен «к нам» (знак « $\cdot$ »); *b* — ток в проводнике направлен за плоскость чертежа «от нас» (знак « $\times$ »).

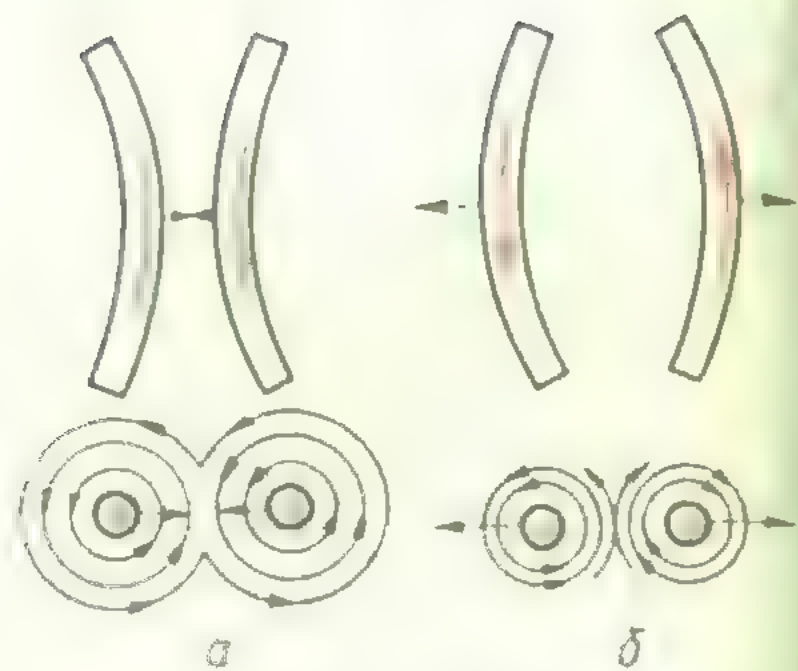


Рис. 4.10. Взаимодействие проводников с током.

(рис. 4.10, *a*), то проводники притягиваются. Когда же токи направлены в разные стороны, проводники отталкиваются (рис. 4.10, *б*).

Сила взаимодействия проводников, по которым проходят токи,

$$F = \frac{2I_1 I_2 l}{a} 10^{-7}, \quad (4.19)$$

где I_1 и I_2 — силы токов в проводниках, А; l — длина, на которой проводники взаимодействуют, м; a — расстояние между осями проводников, м.

Как видно из формулы (4.19), если токи в проводниках равны, сила взаимодействия пропорциональна квадрату тока. Поэтому при коротких замыканиях в обмотках электрических аппаратов возникают очень большие усилия между витками, приводящие к механическим повреждениям аппаратов.

Пример 4.4. Определить силу взаимодействия двух проводов с током $I = 100$ А в каждом, если расстояние между их центрами $a = 0,02$ м и действующая длина проводников $l = 1$ м.

Решение. Сила взаимодействия

$$F = \frac{2 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 1 \cdot 10^{-7}}{0,02} = 0,1 \text{ Н.}$$

Контрольные вопросы к главе 4. 1. Как в природе проявляется единство электрического и магнитного полей? 2. Как определяется направление магнитного поля в катушке? 3. Каковы соотношения между ампер-витками, напряженностью магнитного поля и магнитной индукцией? 4. Как определить магнитный поток в катушке? 5. В чем заключается принципиальная разница между парамагнетиками, диамагнетиками и ферромагнетиками? 6. Что такое гистерезис и как определить потери на перемагничивание? 7. Как формулируется закон Ома для магнитной цепи? 8. Где находят применение электромагниты? 9. Как определить силу взаимодействия проводников с током? 10. Как определяется направление силы, действующей на проводник с током в магнитном поле?

5.1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Явление электромагнитной индукции было открыто английским ученым М. Фарадеем. Он же разработал первые схемы устройства электродвигателей и генераторов. В дальнейшем он заложил основы учения об электрических и магнитных полях, которое развил затем другой выдающийся английский ученый Д. Максвелл.

Если в магнитном поле перемещается проводник таким образом, что он пересекает магнитные силовые линии, то в нем индуцируется ЭДС. Направление этой ЭДС определяют по правилу правой руки (рис. 5.1): если ладонь правой руки расположить в магнитном поле так, чтобы силовые линии были направлены в ладонь, а большой палец указывал направление перемещения проводника, то остальные четыре вытянутых пальца покажут направление индуцируемой ЭДС.

Значение индуцируемой ЭДС E (В) в прямолинейном проводнике пропорционально значению магнитной индукции B (Тл), скорости перемещения проводника v (м/с) и активной длине l (м) проводника, которая пересекается магнитными силовыми линиями:

$$E = Bvl. \quad (5.1)$$

Если проводник пересекает магнитные силовые линии под некоторым углом α (рис. 5.2), то индуцируемая ЭДС

$$E = Bvl \sin \alpha. \quad (5.2)$$

Если угол $\alpha = 0$, то $\sin \alpha = 0$ и ЭДС $E = 0$. В этом случае проводник перемещается вдоль магнитных силовых линий, не пересекая их.

Пример 5.1. Определить индуцируемую ЭДС в проводнике длиной 0,5 м, который перемещается со скоростью $v = 3$ м/с перпендикулярно силовым линиям в однородном магнитном поле, имеющем магнитную индукцию $B = 1$ Тл.

Решение. Индуцируемая в проводнике ЭДС

$$E = Blv = 1 \cdot 0,5 \cdot 3 = 1,5 \text{ В.}$$

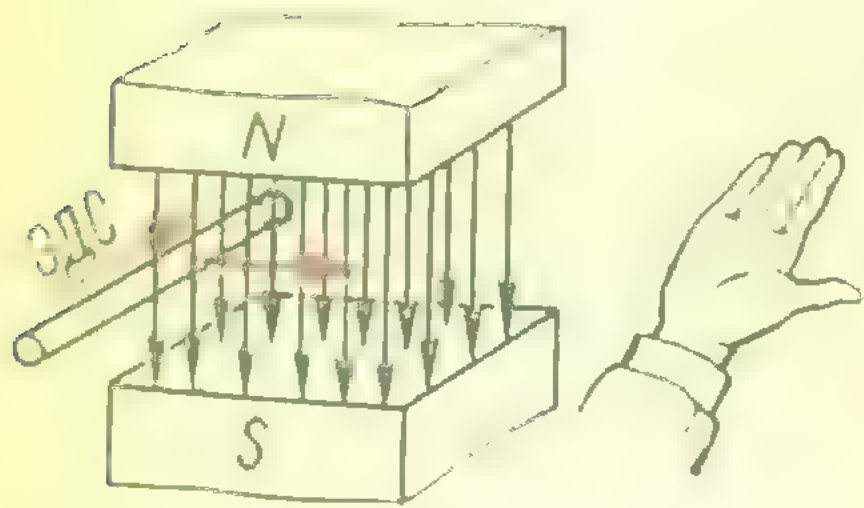


Рис. 5.1. Определение направления ЭДС, индуцируемой в проводнике (правило правой руки).

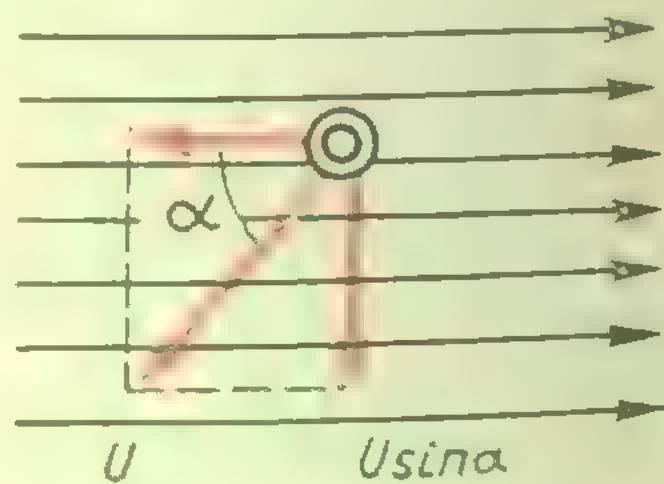


Рис. 5.2. К определению ЭДС, индуцируемой в проводнике, пересекающем силовые линии магнитного поля под некоторым углом.

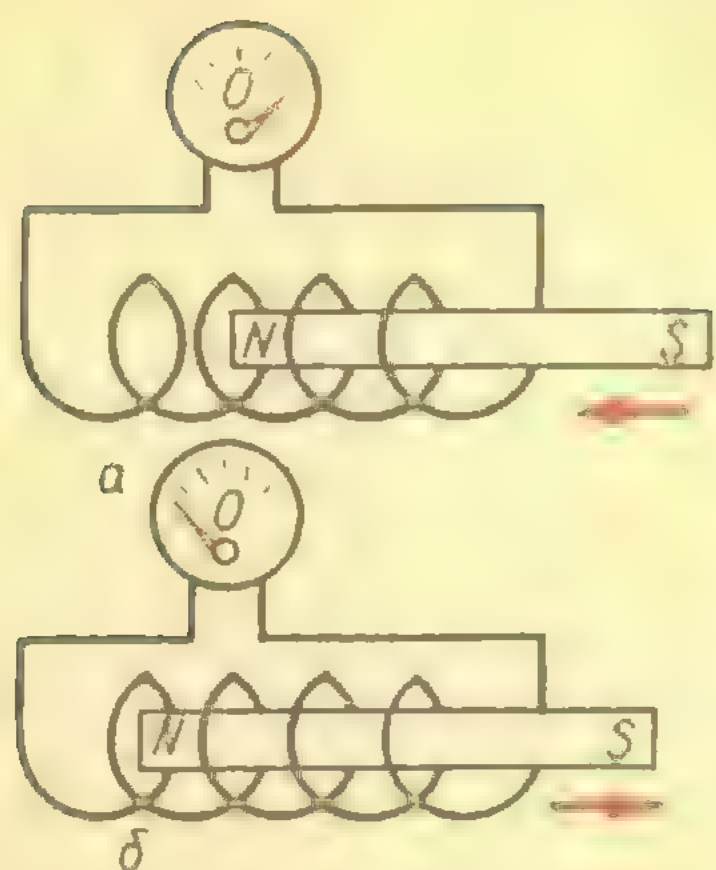


Рис. 5.3. Изменение охвата катушкой магнитного потока.

Если внутри катушки перемещают магнит, как это показано на рисунке 5.3, а, то витки катушки пересекаются магнитными силовыми линиями и в них индуцируется ЭДС. Направление тока в замкнутой цепи показывает чувствительный измерительный прибор. При неподвижном магните витки не пересекаются магнитными силовыми линиями и ЭДС в них не наводится. При обратном движении магнита (рис. 5.3, б) направление наводимой в витках ЭДС изменяется. Максимальное отклонение стрелка измерительного прибора испытывает при прохождении полюса магнита в центре катушки.

Если перемещать катушку 2 в магнитном поле катушки 1, в которой протекает ток (рис. 5.4), то в результате изменения суммарного магнитного потока, охватывающего витки катушки 2, в ней индуцируется ЭДС, направление которой зависит от направления перемещения катушки. Значение ЭДС будет зависеть от числа витков в этой катушке, от скорости перемещения катушки 2 относительно катушки 1, от диэлектрической проницаемости материала сердечника катушки 2 и от направления перемещения катушки 2, от которого зависит скорость изменения числа магнитных силовых линий, охватываемых сердечником катушки 2.

Когда катушки неподвижны одна относительно другой, а в катушке 1 изменяют силу тока, например включая и выключая его, то в результате появления и исчезновения магнитного поля, которое воздействует на витки катушки 2, в ней возникает ЭДС.

Если ток в катушке 1 не меняется, то неизменен и магнитный поток, охватывающий катушку 2, и ЭДС в ней не индуцируется. Когда к катушке 1 подведен переменный ток, например, промышленной частоты 50 Гц, во второй катушке индуцируется ЭДС, меняющая свое направление с такой же частотой.

В замкнутой электрической цепи с наведенной в ней ЭДС течет индуцированный ток. Направление этого тока устанавливают по правилу Ленца: *индуцированный в проводнике (контуре) ток направлен всегда таким образом, что его магнитное поле противодействует причине, вызвавшей возникновение тока.* Иными словами, правило Ленца показывает, что ток, индуцированный в замкнутой цепи, образует свое собственное магнитное поле, направление которого противоположно направлению основного — первичного магнитного поля, породившего этот ток.

Электродвижущая сила, индуцируемая в катушке, с учетом правила Ленца может быть выражена следующей формулой:

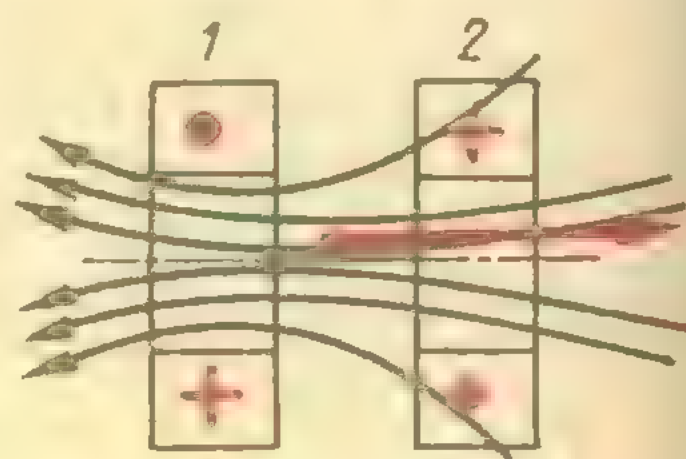


Рис. 5.4. Наведение ЭДС в катушке 2, перемещаемой в магнитном поле катушки 1.

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} w, \quad (5.3)$$

где $\Delta \Phi$ — величина, на которую меняется магнитный поток, охватывающий витки катушки, за отрезок времени Δt ; w — число витков в катушке.

Знак минус в соответствии с правилом Ленца учитывает противодействующее влияние индуктированной ЭДС. Поскольку ток, индуктированный в проводнике (контуре), возникает всякий раз такого направления, при котором он противодействует причине, вызвавшей его, то необходимо прилагать определенное усилие, чтобы перемещать замкнутый контур в магнитном поле.

Это усилие можно определить исходя из следующих соображений. Механическая мощность P_m (Вт), необходимая для перемещения со скоростью v (м/с) контура, к которому приложена сила F (Н),

$$P_m = Fv. \quad (5.4)$$

По закону сохранения энергии эта мощность должна быть равна электрической мощности в контуре, в котором индуктируется ЭДС E и протекает ток I :

$$P_m = P_z = EI = Fv, \quad (5.5)$$

откуда

$$F = EI/v, \quad (5.6)$$

но

$$E = Blv.$$

Тогда, подставляя значение E в формулу (5.6), получим:

$$F = Blvl/v = BIl. \quad (5.7)$$

5.2. САМОИНДУКЦИЯ. ИНДУКЦИОННАЯ АППАРАТУРА

Самоиנדукция. Как уже рассматривалось выше, по формуле (5.3) индуктируемая в катушке электродвижущая сила

$$E = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} w,$$

где магнитный поток Φ может быть создан посторонним контуром или самой катушкой путем ее включения в цепь тока или выключения из нее. Например, в момент включения магнитный поток увеличивается от нуля до некоторого установившегося значения Φ . Возникающие магнитные силовые линии пересекают витки катушки. При этом в катушке индуктируется электродвижущая сила. После размыкания цепи катушки магнитный поток исчезает, и его магнитные силовые линии пересекают витки катушки. При этом в катушке снова индуктируется ЭДС. Это явление называют *самоиндукцией*, а наводимую в катушке ЭДС — *электродвижущей силой самоиндукции*.

Произведение значения магнитного потока Φ (Вб), пронизываю-

щего витки катушки, на число ω витков катушки называют пото-
косцеплением:

$$\Psi = \omega \Phi.$$

Если катушка не имеет ферромагнитного сердечника, то пото-
косцепление пропорционально силе тока I в катушке:

$$\Psi = \omega \Phi = LI,$$

где L — коэффициент пропорциональности, называемый *индуктивностью* катушки.

Размерность индуктивности определяется из равенства

$$[L] = \frac{[\omega \Phi]}{[I]} = \frac{\text{Вб}}{\text{А}} = \frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{А}} = \text{Ом} \cdot \text{с} = \text{Г (генри)}.$$

Зная индуктивность катушки L (Г), число витков ω , силу
постоянного тока I (А), можно определить значение магнитного
потока по формуле

$$\Phi = LI/\omega. \quad (5.9)$$

Подставляя значение Φ в формулу (5.3), получим:

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (5.10)$$

Индукционный аппарат. Принцип индуктирования электродви-
жущей силы в момент включения и выключения цепи постоян-
ного тока с катушкой используется в различных индукционных
аппаратах: зуммерах, применяемых в фониических телефонных
аппаратах, индукционных аппаратах для получения искры, в
бобиных — индукционных устройствах для осуществления зажигания
в карбюраторных двигателях.

В *индукционном аппарате* (рис. 5.5) две обмотки расположены
в одном общем сердечнике. Первичная обмотка I состоит из сравнитель-
но небольшого числа витков провода относительно большой пло-
щади сечения, а вторичная обмотка II — из большого числа
витков тонкого провода.

Индукционный аппарат работает следующим образом. При
включении выключателя S ток обтекает первичную обмотку I .
Сердечник намагничивается и притягивает якорь YA . Прерыва-

тель SC размыкает цепь первичной обмот-
ки. Магнитный поток, запасенный в момент
включения, исчезает. Его силовые линии
пересекают витки вторичной обмотки II
и наводят в ней ЭДС. При исчезновении маг-
нитного поля якорь YA возвращается в исход-
ное положение, прерыватель снова замы-

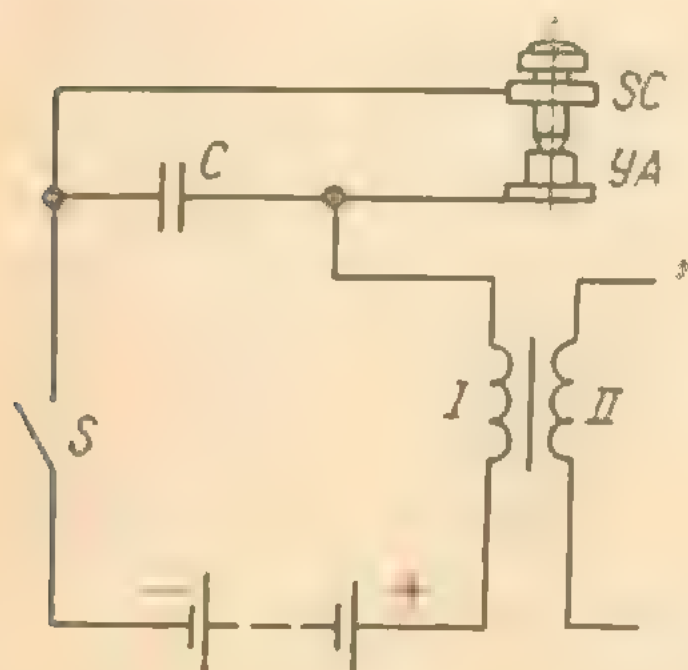


Рис. 5.5. Схема индукционного аппарата:
 S — выключатель; SC — прерыватель; YA — якорь; C — конденсатор;
 I и II — первичная и вторичная обмотки.

Рис. 5.6. Схема датчика импульсов электроизгороди:
 1 — вторичная обмотка; 2 — первичная обмотка; 3 — якорь;
 4 — рычаг маятника; 5 — пружина маятника; 6 — диск маятника;
 7 — выключатель.

кается, катушка 1 оживляется током, притягивается якорь УА и т. д.

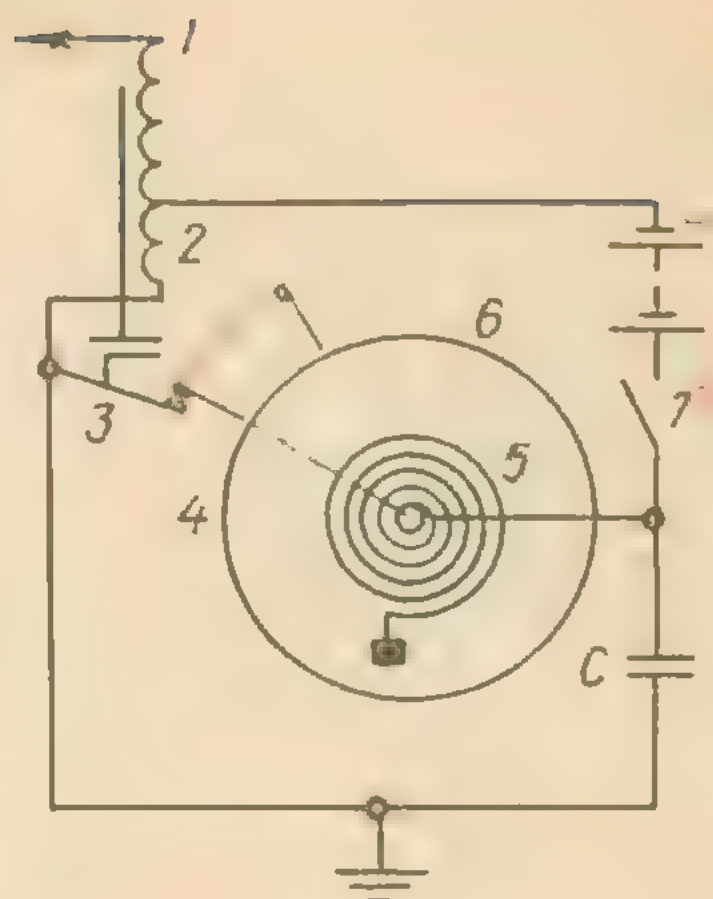
При помощи верхнего винтового контакта прерывателя SC можно регулировать частоту прерываний цепи в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен в секунду (в зуммерах).

Конденсатор C , включенный параллельно контактам прерывателя, служит для уменьшения искрения прерывателя, а также способствует более быстрому изменению (нарастанию и исчезновению) магнитного потока, а следовательно, и наведению более высокой ЭДС во вторичной обмотке. Конденсатор также гасит радиопомехи от аппарата.

В связи с тем, что магнитный поток в момент замыкания цепи катушки 1 нарастает медленнее, чем он исчезает при размыкании катушки, электродвижущая сила, индуцируемая в катушке при размыкании, больше, чем ЭДС, индуцируемая при замыкании.

Индукционный аппарат — датчик электрических импульсов высокого напряжения — входит в состав комплекта электроизгороди, применяемой для ограждения домашних животных и птицы. На рисунке 5.6 приведена схема датчика импульсов высокого напряжения электрической изгороди. При включении выключателя 7 по обмотке 2 катушки протекает ток, намагничивающий сердечник. К сердечнику притягивается стальной якорь 3, который при этом отбрасывает рычаг 4 маятника 5 (пунктиром показан путь рычага маятника). В момент размыкания якоря 3 с рычагом 4 цепь обмотки 2 размыкается и магнитное поле, образовавшееся перед этим в катушке и сердечнике, мгновенно исчезает. В обмотке 2 индуцируется ЭДС, под действием которой возникает зарядный ток в конденсаторе C . Во вторичной многовитковой обмотке 1 индуцируется высоковольтный импульс (порядка 5 кВ). Конденсатор C способствует образованию колебательного процесса в цепи первичной обмотки 2 и, следовательно, появлению серии кратковременных импульсов в обмотке 1. Эта серия импульсов продолжается несколько тысячных долей секунды. Спустя 0,5...1 с после предыдущего размыкания якоря 3 и рычага 4 маятник 6 под действием пружины 5 поворачивается влево, и рычаг 4 снова замыкается с якорем 3. Обмотка получает питание, притягивает якорь 3, размыкая цепь катушки 2. Следует очередная серия импульсов в обмотке 1.

Один конец этой обмотки 1 подводят к проводу электроизгороди, а второй конец через обмотку 2 заземляют. Если животное коснется провода, то замыкается цепь тока: обмотка 1 — животное —



земля — обмотка 2. Животное получает неопасный для жизни, но чувствительный электрический удар.

Натяжением пружины 5 можно регулировать частоту импульсов. Номинальная частота основных импульсов — 1...2 в секунду. При более частых размыканиях контактов быстро разряжается источник питания.

В качестве источника питания используют сухие элементы типа ЭС-Л-30 зарядом 30 А · ч и напряжением 1,5 В и др.

5.3. ИНДУКТИВНОСТЬ КАТУШЕК.

СОЕДИНЕНИЕ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТЕЙ

Индуктивность катушек. По устройству катушки бывают однослойными и многослойными.

Индуктивность однослойной катушки (рис. 5.7, а) может быть определена приближенно по формуле

$$L = w^2 \mu_s S / l, \quad (5.11)$$

где w — число витков катушки; μ_s — магнитная проницаемость сердечника; l — длина катушки, м; $S = \pi \frac{D^2}{4}$ — площадь поперечного сечения катушки, м²; D — диаметр катушки, м.

Для многослойной цилиндрической обмотки (рис. 5.7, б) индуктивность может быть определена так:

$$L = m^2 L_{\text{ср}}, \quad (5.12)$$

где m — число всех слоев обмотки катушки; $L_{\text{ср}}$ — индуктивность однослойной катушки,

диаметр которой $D_{\text{ср}} = \frac{D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}}{2}$.

Соединение катушек. Если несколько катушек индуктивности соединено последовательно (рис. 5.8, а), то общая индуктивность всей цепи равна сумме индуктивностей отдельных катушек:

$$L_{\text{об}} = L_1 + L_2 + L_3. \quad (5.13)$$

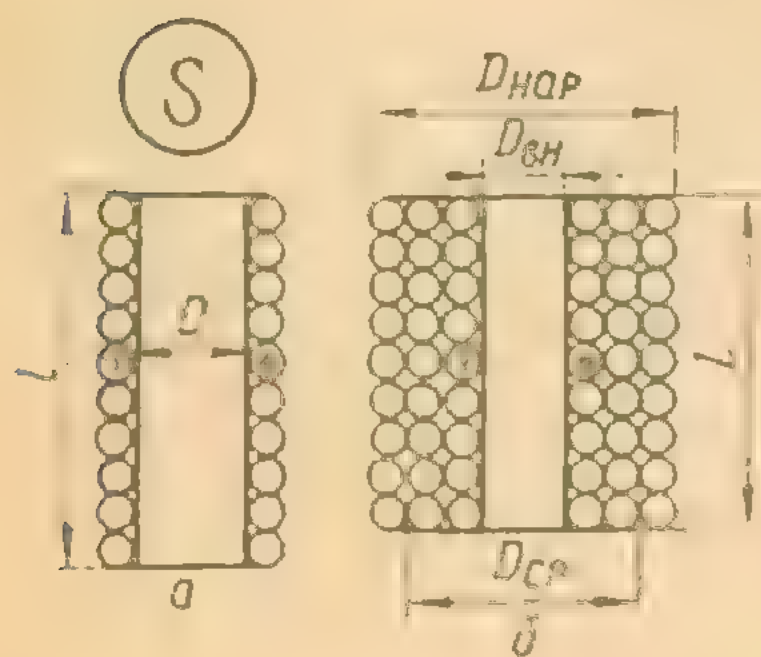


Рис. 5.7. Однослойная (а) и многослойная (б) катушки.

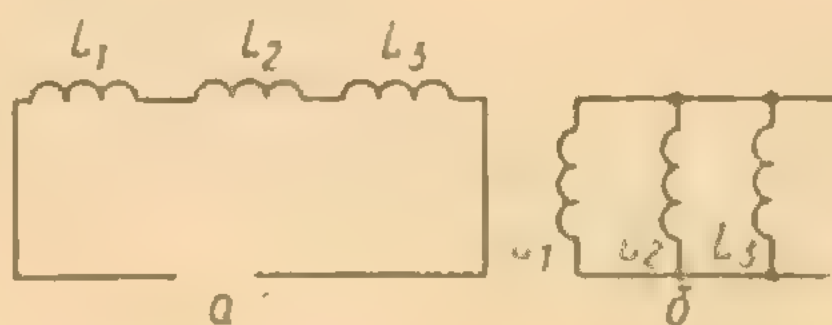


Рис. 5.8. Последовательное (а) и параллельное (б) соединение индуктивностей.



Рис. 5.9. Бифилярная намотка катушки.

Когда катушки соединены параллельно (рис. 5.8, б), их суммарная индуктивность может быть определена из выражения

$$1/L_{\text{сб}} = 1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3. \quad (5.14)$$

Иногда требуется свести к нулю индуктивность катушки, сохранив ее активное сопротивление. В этих случаях применяют *бифилярную намотку* (рис. 5.9). В двух ветвях 1 и 2 этой катушки индуцируются ЭДС противоположного направления, так как в них токи направлены в разные стороны. Таким образом, при любом изменении тока в цепи ЭДС самоиндукции равна нулю.

5.4. ВИХРЕВЫЕ ТОКИ

В электрических приборах и машинах металлические детали иногда движутся в магнитном поле или неподвижные металлические детали пересекаются силовыми линиями меняющегося магнитного поля. При этом в металлических деталях индуцируются ЭДС, под действием которых в массе детали протекают вихревые токи (токи Фуко), замыкаясь в массе и образуя вихревые контуры токов I_v (рис. 5.10, а).

Вихревые токи порождают свои собственные магнитные потоки, которые по правилу Ленца противодействуют магнитному потоку катушки и ослабляют его. Кроме того, они вызывают нагрев сердечника, то есть потери.

Чтобы уменьшить потери энергии, а также ослабить размагничивающее действие вихревых токов, сердечники катушек индуктивностей, а также магнитопроводы электрических машин набирают из отдельных листов электротехнической стали, изолированных друг от друга специальным лаком, бумагой или пленкой окисла (окалиной), проводимость которой мала. Сердечники некоторых катушек (бобин) набирают из отрезков ожеженной железной проволоки. Полоски железа располагают параллельно линиям магнитного потока. Вихревые же токи, протекающие в плоскостях, перпендикулярных направлению магнитного потока, ограничиваются изолирующими прокладками, как показано на рисунке 5.10, б.

Чтобы снизить вихревые токи в проводах, их изготавливают в виде жгута из отдельных жил, изолированных одна от другой.

Вихревые токи находят полезное применение в некоторых измерительных приборах, а также при индукционной плавке металлов и поверхностной закалке деталей токами высокой частоты.

Контрольные вопросы и задания к главе 5.1. 1. Объясните процесс индуцирования ЭДС в проводнике, который перемещается в магнитном поле с помощью внешней силы. 2. Сформулируйте правило правой руки. 3. В чем сущность правила Ленца? 4. Объясните процесс самоиндукции. 5. Объясните устройство

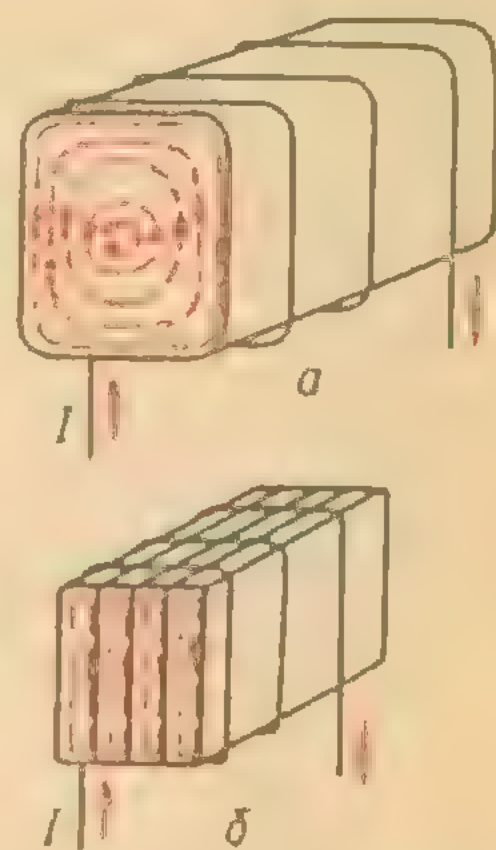


Рис. 5.10. Вихревые токи в сердечнике катушки.

электрозуммера (звонка), а также электромагнитного датчика импульсов для электроизгороди. 6. Как определяется индуктивность однослойной катушки? Как определяется общая индуктивность двух катушек, соединяемых последовательно, параллельно? 8. Как возникают вихревые токи в сплошном стальном сердечнике и как они проявляются? 9. Как предотвращают потери от вихревых токов?

Глава 6. ОДНОФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

6.1. ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Переменными токами (ЭДС) в электрических цепях называют такие токи (ЭДС), которые меняют свое значение или направление во времени. Они могут быть *периодическими* или *непериодическими*. Периодическим называется такой ток (ЭДС), значения которого повторяются через определенные равные промежутки времени, называемые *периодом*.

Периодические переменные токи (ЭДС) могут носить синусоидальный, несинусоидальный или пульсирующий характер (рис. 6.1). Характер несинусоидальных токов (ЭДС) может быть самый различный. Он обуславливается включением в цепь переменного тока различного вида нелинейных сопротивлений.

Любой несинусоидальный и пульсирующий ток (ЭДС) может быть представлен суммой гармонических синусоидальных токов (ЭДС) различной частоты. Для такого анализа используют метод разложения несинусоидальных периодических кривых в ряд Фурье. Пример такого разложения пульсирующего тока в гармонический синусоидальный ряд дан в главе 18. Для выделения синусоидальной составляющей той или иной частоты применяются резонансные *фильтры*.

В данном разделе рассматриваются цепи переменного синусоидального тока.

На рисунке 6.2, а приведен простейший генератор переменного тока. Между полюсами магнита N и S принудительно с постоянной скоростью вращается виток провода 1. Концы витка присоединены к медным, изолированным одно от другого кольцам 2, на которые наложены щетки 3, соединенные с внешней цепью, имеющей сопротивление R .

Значение магнитного потока, который пересекает плоскость витка, меняется в зависимости от положения витка. Когда виток расположен перпендикулярно магнитным силовым линиям, индуцируемая в нем ЭДС

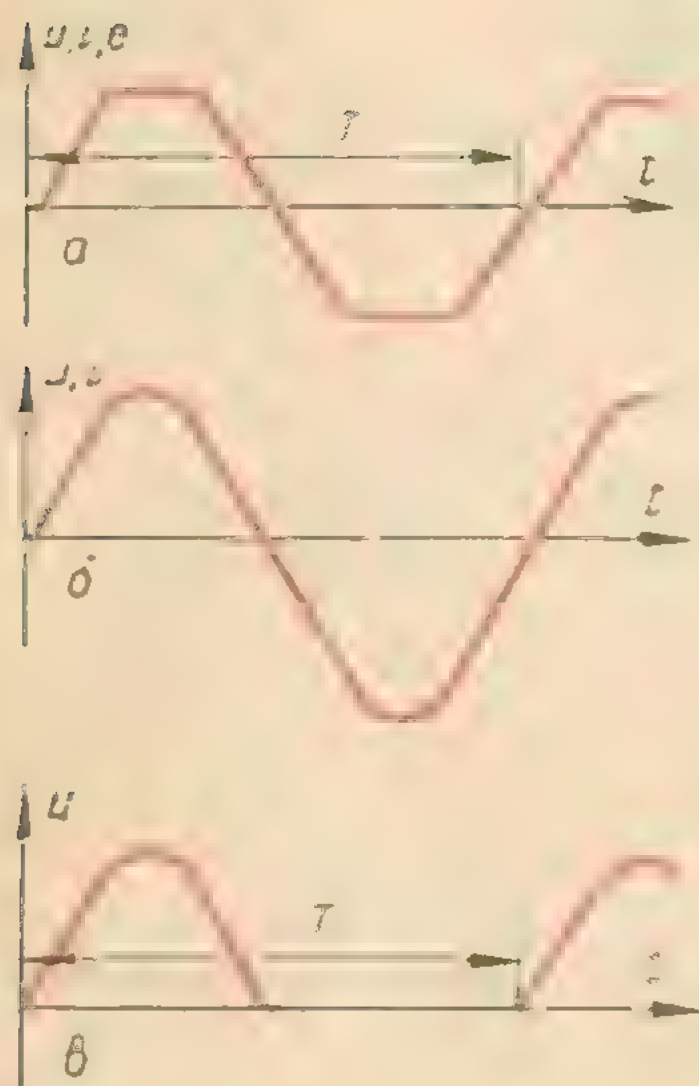


Рис. 6.1. Графики переменного несинусоидального (а), синусоидального (б) и пульсирующего (в) токов:
 T — период колебания

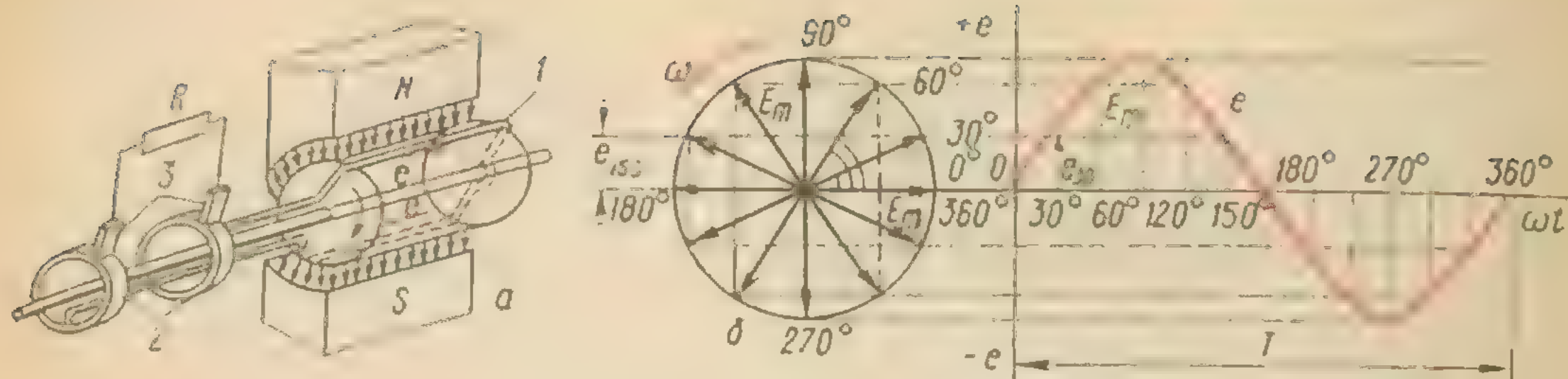


Рис. 6.2. Устройство простейшего генератора переменного тока (а) и кривая мгновенных значений ЭДС (б):

1 — виток провода; 2 — кольца; 3 — щетки; R — сопротивление внешней цепи.

равна нулю, так как обе активные стороны витка в этот момент не пересекают магнитных силовых линий. Мгновенное изменение магнитного потока равно нулю. При вертикальном положении витка мгновенное изменение магнитного потока максимальное. Индуцируемая ЭДС также максимальна. Согласно формуле (5.2), значение ЭДС, индуцируемой в каждой из активных сторон витка,

$$e_1 = Blv \sin \alpha.$$

Суммарная электродвижущая сила в витке

$$e = 2e_1 = 2Blv \sin \alpha,$$

где B — магнитная индукция магнитного поля, Тл; l — длина каждой из активных сторон витка, м; v — линейная скорость движения активных сторон по окружности, м/с; α — угол, образованный плоскостью витка и горизонтальной нейтральной плоскостью.

При равномерном вращении витка в магнитном поле с угловой скоростью

$$\omega = \frac{\alpha}{t} = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

ЭДС

$$e = 2Blv \sin \omega t, \quad (6.1)$$

где ω — угловая частота, показывающая, какой круговой путь совершает виток в секунду; $\alpha = \omega t$ — фаза синусоидального тока; t — время, с; T — период колебания ЭДС, или отрезок времени, за который совершается один полный цикл изменения мгновенных значений ЭДС (или тока, напряжения и др. электрических величин), с.

Размерность угловой частоты

$$[\omega] = 360^\circ / T = 2\pi / T = \text{град/с или рад/с},$$

где 2π — полный центральный угол окружности, выраженный в радианах, причем 2π рад = 360° , а 1 рад = $57^\circ 17'$; 1 рад = 180° , $\frac{\pi}{2}$ рад = 90° и т. д. ($\pi = 3,14$).

Как следует из формулы (6.1), в витке индуцируется синусоидальная электродвижущая сила. Направление индуцируемой ЭДС определяют по правилу правой руки.

Изменение индуцируемой в витке ЭДС по значению и направлению в виде синусоиды (рис. 6.2, б) можно представить себе

следующим образом. В окружности отмечены углы поворота плоскости витка в магнитном поле полюсов. В нейтральной плоскости, когда угол поворота равен 0° , ЭДС в витке равна нулю. При увеличении угла поворота увеличивается число пересекаемых силовых линий и возрастает индуктированная ЭДС. При повороте плоскости витка на 90° индуктируемая ЭДС максимальна. Она отложена справа на диаграмме в точке 90° . Ее направление принято за положительное. При изменении угла от 90 до 180° число магнитных силовых линий, пересекаемых плоскостью витка в единицу времени, уменьшается, снижается и индуктируемая ЭДС. В момент, когда угол поворота составляет 180° , ЭДС равна нулю. В дальнейшем при повороте плоскости витка от 180 до 270° число пересечений снова возрастает, но направление ЭДС меняется, так как меняется направление перемещения активных сторон витка относительно магнитных силовых линий. При повороте на 270° ЭДС максимальная по значению и равна ЭДС при 90° , но противоположна по знаку и т. д.

В простейшей электрической цепи с активным сопротивлением сила электрического тока также меняется по синусоидальному закону в соответствии с изменением ЭДС. Сила тока в цепи в момент, когда ЭДС равна нулю, также равна нулю. Максимальной ЭДС сопутствует максимальная сила тока. Значение переменного тока (ЭДС, напряжения), соответствующее данному моменту времени (мгновению), называют *мгновенным значением тока* (ЭДС, напряжения). Максимальное мгновенное значение переменной величины, которого она достигает в процессе своего изменения, называется *амплитудой величины*.

Если в момент времени $t=0$ ($\omega t=0$) мгновенное значение величины не равно нулю, то формула (например, для тока i) выглядит так:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi), \quad (6.2)$$

где $\omega t + \psi$ — фаза переменного синусоидального тока; ψ — угол, называемый *начальной фазой* переменного синусоидального тока.

Мгновенные значения тока, напряжения, ЭДС и других переменных величин принято обозначать соответствующими строчными символами i , u , e и т. д. Действующие, или эффективные, значения, а также максимальные амплитудные значения обозначают прописными символами I , U , E и I_m , U_m , E_m и т. д.

При расчете цепей переменного тока приходится выполнять арифметические действия с синусоидальными величинами, частоты которых одинаковы, а амплитуды и начальные фазы могут быть разными. Для облегчения действий применяется *метод векторных диаграмм*. Векторной диаграммой синусоидальной величины называют ее графическое изображение при помощи вращающегося вектора. Направление вращения векторов принимают против часовой стрелки. Если, пользуясь рисунком 6.2, а, в плоскости витка изобразить вектор $\vec{E}_m$ (рис. 6.2, б) и представить его вращающимся вместе с рамкой, то в каждый момент времени мгновенное значение ЭДС

будет равно $e = E_m \sin \omega t$, то есть при $\omega t = 0$ $e_0 = 0$, при $\omega t = 30^\circ$ $e_{30} = E_m \sin 30^\circ = E_m/2$ и т. д.

Эти мгновенные величины могут быть получены непосредственно на вертикальной оси диаграммы как проекции на нее вектора $\vec{E}_m$. Если на вертикальной оси нанесен масштаб ЭДС или тока, то для любого момента времени ωt представляется возможным найти мгновенное значение ЭДС, тока.

Когда вектор находится выше оси ωt , мгновенное значение величины принимают положительным; когда же вектор расположен ниже оси ωt , мгновенное значение принимают отрицательным.

Векторы электрических величин дают нам представление не только об их абсолютном значении (об этом судят по длине вектора), но и об их взаимном расположении. Когда речь идет о векторных значениях тока, напряжения, ЭДС, то их обозначают теми же символами, что и ранее, но с точкой наверху: $\dot{I}$, $\dot{U}$, $\dot{E}$.

6.2 ЧАСТОТА КОЛЕБАНИЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Период колебания ЭДС (тока) в генераторе по схеме, изображенной на рисунке 6.2, а, соответствует одному обороту рамки (от 0 до 360°).

Число периодов в секунду (пер/с) называют частотой f переменного тока:

$$f = 1/T. \quad (6.3)$$

За единицу измерения частоты переменного тока принят 1 герц (Гц); 1 Гц = 1 пер/с.

Обычный переменный ток сети имеет частоту 50 Гц, это так называемая *промышленная частота* переменного тока. В радиопередатчиках и приемниках частоты переменного тока, на которых ведется радиопередача, измеряются тысячами, сотнями тысяч и миллионами герц (килогерцами, мегагерцами). Расстояние, которое успевает пройти волна за время одного периода колебания тока, называется длиной волны λ . При 50 Гц длина волны

$$\lambda = vT = v/f = 300\,000 \text{ км/с} \cdot \frac{1}{50} \text{ с} = 6000 \text{ км},$$

где v — скорость распространения электромагнитных волн.

Частота переменного тока в рассмотренном выше генераторе зависит от частоты вращения витка в магнитном поле, а также от числа пар полюсов p . Например, если у генератора одна пара полюсов (рис. 6.3, а), то есть $p = 1$, то для того, чтобы получить 50 Гц, виток должен совершать 50 с⁻¹, или $50 \cdot 60 = 3000$ мин⁻¹.

Если генератор имеет две пары полюсов (рис. 6.3, б), то за один оборот активные участки рамки пройдут дважды под северным полюсом и дважды под южным. Таким образом,

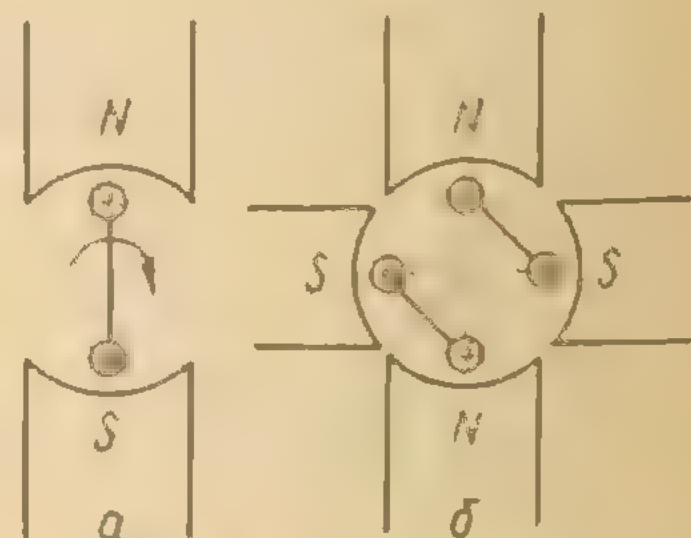


Рис. 6.3. К пояснению зависимости частоты f от числа пар полюсов p :
а — $p = 1$; б — $p = 2$

за один оборот рамки индуктируемая ЭДС совершит два периода колебаний. Чтобы получить 50 Гц, необходима частота вращения 25 с^{-1} , или $25 \cdot 60 = 1500 \text{ мин}^{-1}$.

Частота f переменного тока может быть определена по формуле

$$f = np/60, \quad (6.4)$$

где n — частота вращения, мин^{-1} (об/мин); p — число пар полюсов.

Если нужно получить частоту $f = 50 \text{ Гц}$, то частота вращения

$$n = 60f/p = 3000/p. \quad (6.5)$$

Если число пар полюсов $p = 1$, то частота вращения ротора $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$. При $p = 2$ $n = 1500$; при $p = 3$ $n = 1000$; при $p = 4$ $n = 750 \text{ мин}^{-1}$ и т. д.

6.3. ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Если в цепь переменного синусоидального тока включить прибор, который предназначен для измерения *среднего* значения тока в цепи, то этот прибор зафиксирует нулевое значение. Действительно, в каждый период ток протекает полпериода в одном направлении и полпериода — в другом.

В цепи такого тока не будет происходить электролиза, то есть осаждения металла на катоде в электролитической ванне. В то же время в сопротивлении, включенном в цепь переменного тока, идет непрерывный процесс выделения теплоты независимо от направления тока: и в первый и во второй полупериоды. Поэтому, чтобы судить о силе переменного синусоидального тока, его сравнивают с постоянным током по одинаковому тепловому действию. Полученное путем такого сравнения значение силы переменного тока называют действующим.

Таким образом, *действующее* (эффективное) значение переменного тока численно равно эквивалентной по тепловому действию силе *постоянного тока*, то есть такому току, который за то же время, на том же сопротивлении выделит такое же количество теплоты, что и *переменный ток* одинаковой силы.

В цепи постоянного тока на сопротивлении R за время T при силе тока I выделяется количество теплоты

$$Q = I^2 RT. \quad (6.6)$$

В подобном сопротивлении, включенном в цепь переменного тока, в каждый очень короткий отрезок времени Δt , в течение которого мгновенное значение силы тока i можно считать практически неизменным, выделяется элементарное количество теплоты

$$\Delta Q = i^2 R \Delta t,$$

то есть количество теплоты, пропорциональное произведению $i^2 R$.

На рисунке 6.4 построены кривые i и i^2 для синусоидального

переменного тока. Как видно из графика, несмотря на то что ток i в течение периода меняется по значению и направлению, i^2 меняется только по значению и остается положительным независимо от направления тока i , то есть в первом полупериоде эта величина имеет положительное значение $(+i) \times (+i) = i^2$, во втором полупериоде она также остается положительной: $(-i) \cdot (-i) = +i^2$.

Разделив площадь, ограниченную кривой i^2 и осью ωt , на время T , получим среднюю ординату кривой i^2 за период, которую обозначим $i_{\text{ср}}^2$. Тогда количество теплоты, которое выделится на сопротивлении в цепи переменного тока за время T ,

$$Q_{\sim} = i_{\text{ср}}^2 R T. \quad (6.7)$$

Согласно приведенному выше определению действующего значения переменного тока, $Q_{\sim} = Q_{\sim}$, то есть из формул (6.6) и (6.7) следует, что

$$I^2 R T = i_{\text{ср}}^2 R T,$$

откуда действующее значение переменного тока

$$I = \sqrt{i_{\text{ср}}^2}. \quad (6.8)$$

Действующее значение переменного тока есть *среднеквадратичное* за период значение переменного тока.

Величину i^2 , графически представленную на рисунке 6.4, можно определить аналитически через амплитудное значение I_m^2 .

$$i^2 = I_m^2 \sin^2 \omega t = I_m^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} = \frac{I_m^2}{2} - \frac{I_m^2}{2} \cos 2\omega t,$$

$$\text{где } \sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$$

Среднее значение $\cos 2\omega t$ за период T равно нулю (соответствует сумме площадей, помеченных на рисунке 6.4 знаками $+$ и $-$). Тогда среднее за период значение квадрата силы синусоидального переменного тока

$$i_{\text{ср}}^2 = I_m^2 / 2,$$

а действующее значение синусоидального переменного тока

$$I = \sqrt{i_{\text{ср}}^2} = \sqrt{I_m^2 / 2} = I_m / \sqrt{2} = I_m / 1,414 = 0,707 I_m. \quad (6.9)$$

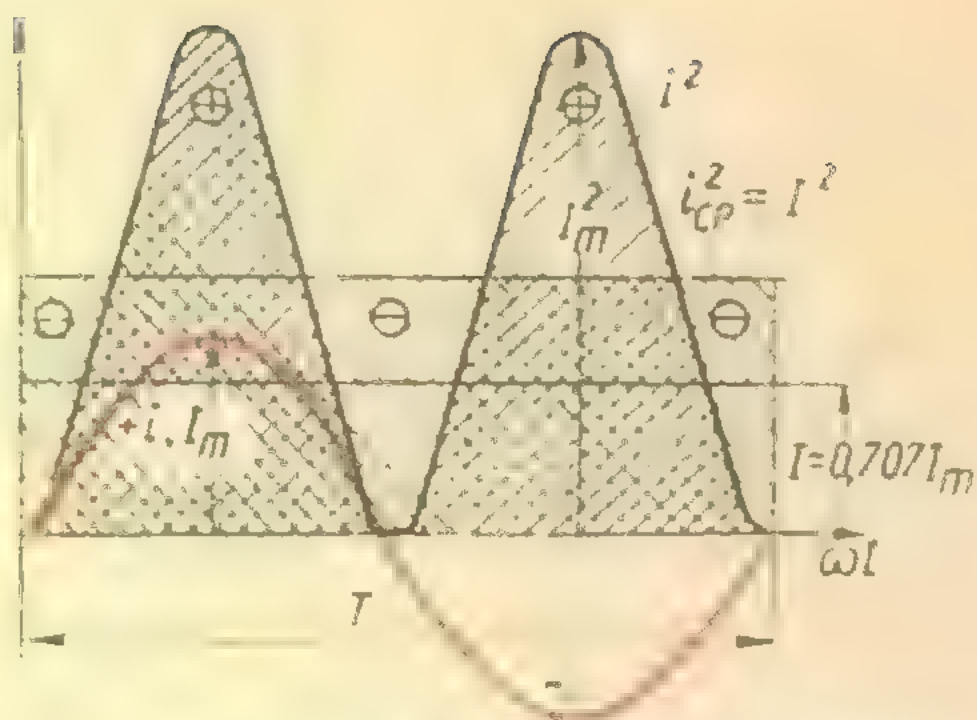


Рис. 6.4. Графики мгновенного значения тока i , квадрата силы тока i^2 и действующего, или среднеквадратичного за период, переменного тока I .

Действующее значение переменного синусоидального напряжения может быть найдено из предыдущего как

$$IR = \frac{I_m}{\sqrt{2}} R$$

или

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707 U_m.$$

Значит, если в сети напряжение $U = 220$ В, то его максимальное (амплитудное) значение

$$U_m = 220 \cdot 1,414 = 311 \text{ В.}$$

Амплитуда напряжения 380 В равна $380 \cdot 1,414 = 538$ В. То обстоятельство, что амплитуда значительно превышает действующее значение, дает преимущество переменному току при использовании люминесцентных или дуговых ламп, которые легче зажигаются на переменном токе.

6.4. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Если в цепь переменного тока включен элемент с активным сопротивлением R (например, нагревательные элементы тепловых приборов, нити накала ламп, катушки с бифилярно выполненной обмоткой и др.), то значение силы тока в каждый момент времени определяют по закону Ома (рис. 6.5, а):

$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t.$$

Значит, ток также носит синусоидальный характер, причем кривые напряжения и тока идут согласованно, так как их фазы ωt равны: напряжение и ток совпадают по фазе. На рисунке

6.5, б приведены кривые мгновенных значений u и i , на рисунке 6.5, в — векторная диаграмма для момента времени $t = 0$. Угол φ сдвига между векторами напряжения и тока равен нулю. Для действующих значений напряжения и тока закон Ома может быть записан так:

$$I = U/R; \quad U = IR;$$

$$R = U/I. \quad (6.10)$$

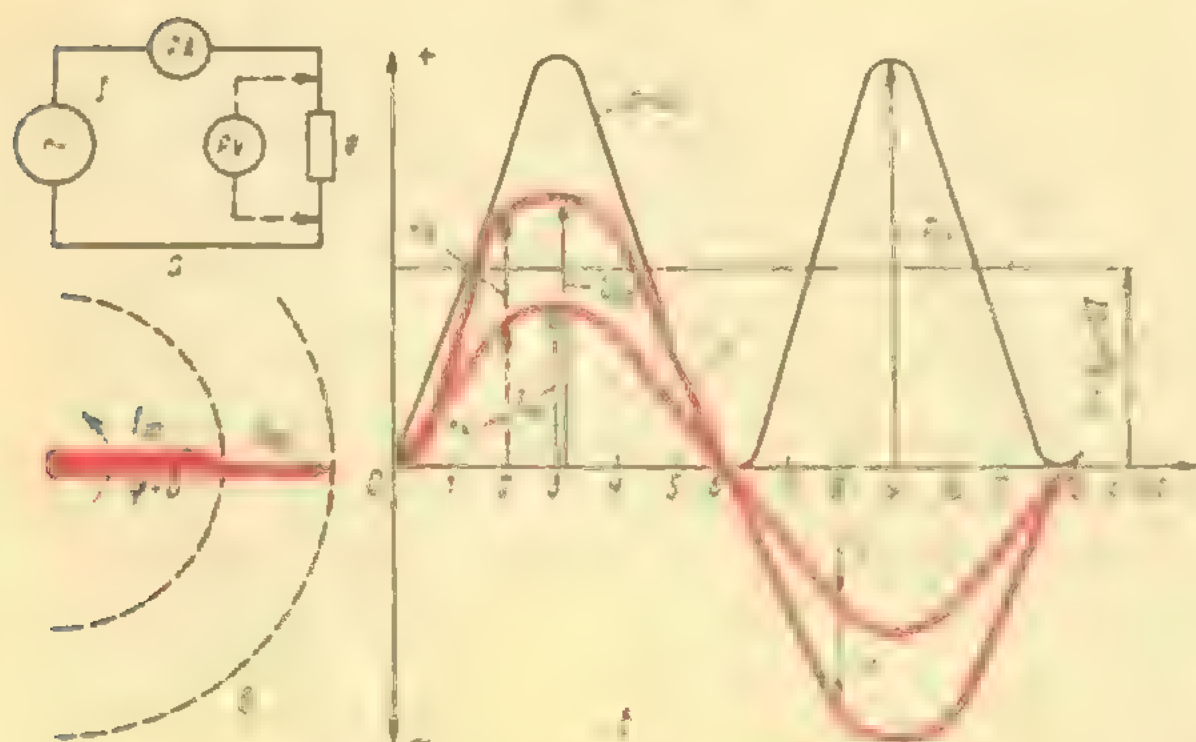


Рис. 6.5. Цепь с активным сопротивлением R : а — схема цепи; б — кривые мгновенных значений напряжения u , тока i и мощности p ; в — векторная диаграмма амплитудных значений тока I_m и напряжения U_m для начального момента времени.

Мгновенная мощность, которая выделяется на активном сопротивлении (например, в ви-

де теплоты), в любой момент времени равна произведению мгновенных значений напряжения и тока:

$$p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t.$$

Поскольку $\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}$, то мгновенная мощность может быть представлена как

$$p = \frac{U_m I_m}{2} - \frac{U_m I_m}{2} \cos 2\omega t = \frac{U_m I_m}{\sqrt{2} \sqrt{2}} - \frac{U_m I_m}{\sqrt{2} \sqrt{2}} \cos 2\omega t = UI - UI \cos 2\omega t. \quad (6.11)$$

Таким образом, мгновенная мощность в любой момент времени состоит из постоянной мощности UI , равной произведению действующих значений напряжения и тока, и переменной мощности $UI \cos 2\omega t$. Эта переменная слагающая, как и всякая гармоническая функция, имеет среднее значение за период, равное нулю. Тогда средняя за период общая мощность равна постоянной слагающей мгновенной мощности:

$$P = UI = I^2 R = U^2 / R. \quad (6.12)$$

Кривую мгновенных значений мощности p можно получить графически (рис. 6.5, б). Для этой цели необходимо определить ряд мгновенных значений мощности (например, для точек 0, 1, 2...12). Их подсчитывают как произведения мгновенных значений напряжения и тока для указанных точек.

Далее, отложив на графике полученные значения мощности, нужно построить по ним кривую мгновенных значений мощности с учетом полученного знака и принятого для мощности масштаба.

Средняя мощность P за период может быть найдена из графика как половина амплитуды P_m :

$$P = P_m / 2$$

или

$$P = U_m I_m / 2. \quad (6.13)$$

То есть результат тот же, что и полученный методом математических преобразований.

Значение активного сопротивления того или иного прибора переменному току может быть намного больше значения сопротивления того же прибора постоянному току. Это связано с так называемым *поверхностным эффектом*, который заключается в том, что переменный ток неравномерно распределяется по сечению проводника. Плотность переменного тока в поверхностных слоях всегда выше, чем во внутренних. Чем больше частота, тем сильнее сказывается поверхностный эффект. Это объясняется тем, что при переменном токе меняющееся магнитное поле индуцирует противодействующую току ЭДС самоиндукции во внутренних слоях проводника, значительно большую, чем во внешних слоях.

В медных и алюминиевых проводах поверхностный эффект при частоте 50 Гц практически ощутим лишь при площади поперечного сечения проводов свыше 25 мм².

6.5. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Индуктивный ток. Если в цепь переменного тока включена идеальная индуктивность, то в момент времени, когда возрастает мгновенное значение силы тока, протекающего от источника, энергия источника расходуется на образование магнитного поля в индуктивности без превращения ее в тепловую или механическую энергию. В момент времени, когда мгновенное значение силы тока убывает, магнитное поле рассеивается, и запасенная в нем энергия отдается обратно источнику.

Покажем это аналитически и графически. Пусть к источнику переменного тока подключена катушка индуктивностью L (рис. 6.6, а). Примем, что ее активное сопротивление R равно нулю. В катушке будет протекать переменный синусоидальный ток

$$i = I_m \sin \omega t.$$

Этот ток сопровождается переменным синусоидальным магнитным потоком, совпадающим с ним по фазе.

ЭДС самоиндукции. Переменный магнитный поток, образующийся в катушке, индуцирует ЭДС самоиндукции e_L , пропорциональную скорости изменения тока (потока), аналогично формуле (5.10):

$$e_L = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}, \quad (6.11)$$

где e_L — ЭДС самоиндукции, В; $\Delta i / \Delta t$ — скорость изменения тока, А/с; L — индуктивность катушки, Г.

Знак минус отражает правило Ленца, которое в данном случае означает, что если мгновенное значение тока увеличивается (то есть его приращение за время Δt имеет положительный знак: $+\Delta i$ — точки 1 и 5 на рисунке 6.6, б), то мгновенное значение ЭДС будет иметь отрицательный знак: $-L(+\Delta i / \Delta t) = -e_L$. Если же мгновенное значение тока уменьшается (то есть его приращение за время Δt имеет отрицательный знак: $-\Delta i$ — точки 3 и 4 на рисунке 6.6, б), то ЭДС имеет положительный знак: $-L(-\Delta i / \Delta t) = +e_L$.

Таким образом, исходя из этих соображений, можно построить кривую мгновенных значений ЭДС самоиндукции на основании имеющейся развернутой диаграммы тока.

Как показано на рисунке 6.6, б, в момент времени, соответствующий точке 1, приращение тока положительное: $+i_2 - (+i_1) = +\Delta i_1$. В момент времени 5 это приращение также положительно: $+i_6 - (+i_5) = +\Delta i_5$. Следовательно, мгновенные значения ЭДС в эти моменты отрицательные: $-e_1$ и $-e_5$. В момент времени 2 приращение тока равно нулю: $\Delta i_2 = i_4 - i_3 = 0$, поэтому и ЭДС e_2 равна нулю, то есть

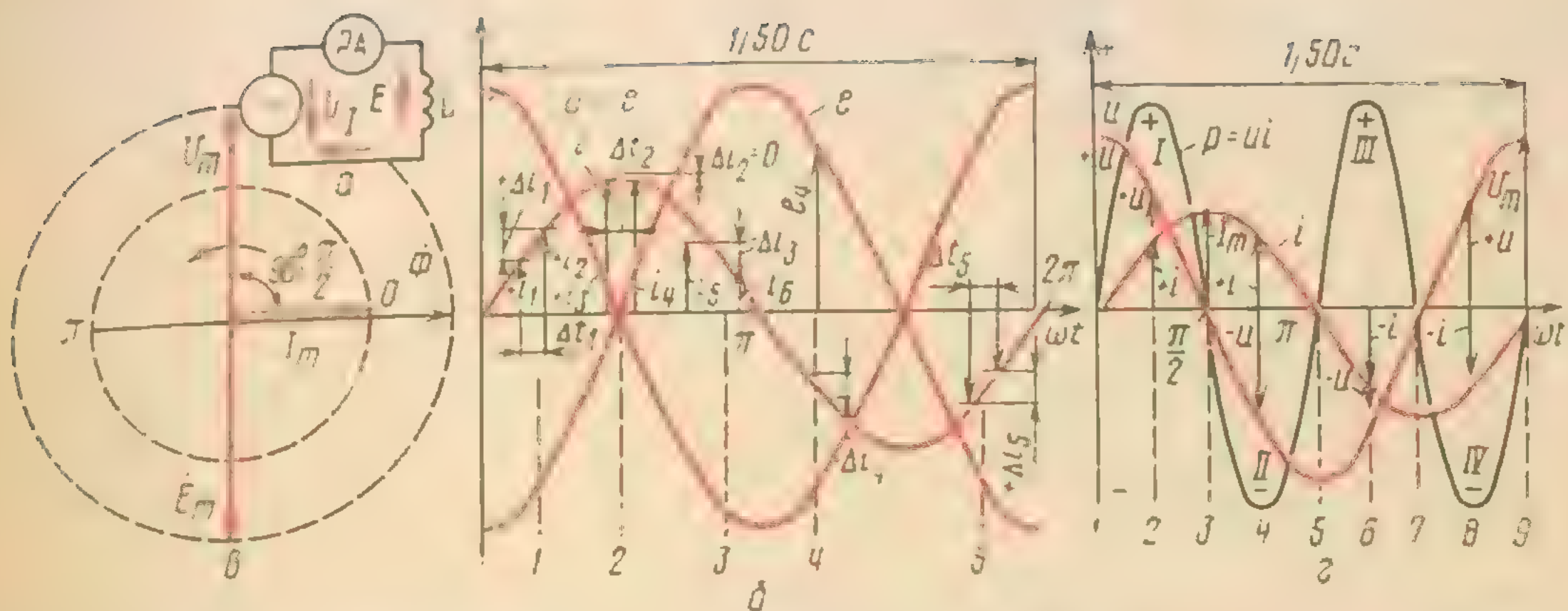


Рис. 6.6. Цепь с индуктивностью L :

a — схема включения; b — кривые мгновенных значений тока i , ЭДС самоиндукции e и напряжения u ; c — векторная диаграмма тока I_m и напряжения U_m для начального момента времени; d — построение кривой мгновенных значений мощности p по кривым тока i и напряжения u .

в этот момент график ЭДС проходит через нуль и меняет свой знак с минуса на плюс. В моменты времени, соответствующие точкам 3 и 4, приращение токов Δi_3 и Δi_4 отрицательно (например, для точки 3: $i_6 - i_5 = \Delta i_3$). В эти моменты времени знаки ЭДС положительны ($+e_3$ и $+e_4$).

Применяя второй закон Кирхгофа для цепи, изображенной на рисунке 6.6, a , и принимая во внимание, что в этой цепи действует напряжение источника u и ЭДС самоиндукции e_L , можно написать:

$$u + e_L = 0 \text{ или } e_L = -u. \quad (6.15)$$

Значит, развернутая диаграмма напряжения будет зеркальным отображением развернутой диаграммы ЭДС, так как только в этом случае в каждый момент времени сумма значений ЭДС и напряжений равна нулю.

Векторная диаграмма. По развернутой диаграмме напряжения и тока можно построить векторную диаграмму их максимальных значений, например для начального момента времени (рис. 6.6, c). Из векторной диаграммы видно, что в цепи с индуктивностью ток отстает от напряжения на угол $\varphi = 90^\circ = \pi/2$ рад. В соответствии с графиком, то есть если ток определяется равенством $i = I_m \sin \omega t$, напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \pi/2)$. Это можно показать и аналитически. А именно: из формул (6.14) и (6.15)

$$u = -e = L \Delta i / \Delta t. \quad (6.16)$$

Чтобы перейти к действующим значениям U и I , в этой формуле необходимо раскрыть значение $\Delta i / \Delta t$. Это представляется возможным сделать с привлечением аппарата тригонометрии.

Если в момент времени t мгновенное значение силы тока $i = I_m \sin \omega t$, то для момента времени $t + \Delta t$ (Δt — весьма малый, близкий к нулю, отрезок времени) ток изменится на весьма малую величину Δi и составит

$$i + \Delta i = I_m \sin \omega(t + \Delta t).$$

Преобразуя это равенство относительно Δi , получим:

$$\begin{aligned}\Delta i &= I_m \sin(\omega t + \omega \Delta t) - i = I_m \sin(\omega t + \omega \Delta t) - I_m \sin \omega t = \\ &= I_m [\sin(\omega t + \omega \Delta t) - \sin \omega t] = \\ &= I_m [\sin \omega t \cdot \cos \omega \Delta t + \cos \omega t \cdot \sin \omega \Delta t - \sin \omega t].\end{aligned}\quad (6.17)$$

В этом выражении угол $\omega \Delta t$ очень незначителен, так как Δt по условию весьма малая величина. Тогда $\cos \omega \Delta t \approx \cos 0 = 1$, $\sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t$. Подставляя эти значения в формулу (6.17), получим:

$$\Delta i = I_m (\sin \omega t \cdot 1 + \cos \omega t \cdot \omega \Delta t - \sin \omega t) = I_m \omega \Delta t \cos \omega t,$$

откуда

$$\Delta i / \Delta t = I_m \omega \cos \omega t = I_m \omega \sin(\omega t + \pi/2).$$

Напряжение на индуктивности

$$u = L \Delta i / \Delta t = I_m \omega L \sin(\omega t + \pi/2) = U_m \sin(\omega t + \pi/2). \quad (6.18)$$

Индуктивное сопротивление. Из формулы (6.18) следует, что максимальное значение напряжения на индуктивности

$$U_m = I_m \omega L.$$

Поделив обе части этого равенства на $\sqrt{2}$, перейдем к действующим значениям тока и напряжения в цепи с индуктивностью.

$$\frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \omega L,$$

то есть

$$U = I \omega L = I X_L$$

или

$$I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{X_L}, \quad (6.19)$$

где $X_L = U/I$ — индуктивное сопротивление.

Размерность индуктивного сопротивления — Ом:

$$[X] = [\omega][L] = \frac{1}{c} \cdot \Gamma = \frac{1}{c} \quad \text{Ом} \cdot c = \text{Ом}.$$

Индуктивное сопротивление в отличие от активного называем *реактивным*, то есть таким, в котором происходит обратимый процесс передачи энергии от источника электрической энергии к катушке индуктивности и обратно. Равенство (6.19) выражает закон Ома для цепи с индуктивной нагрузкой.

Индуктивная реактивная мощность Q_L . Мгновенная индуктивная мощность p_L в катушке в любой момент времени

$$p_L = ui = U_m \sin(\omega t + \pi/2) I_m \sin \omega t = U_m I_m \cos \omega t \cdot \sin \omega t,$$

а учитывая, что

$$2 \sin \omega t \cdot \cos \omega t = \sin 2\omega t,$$

откуда

$$\cos \omega t \cdot \sin \omega t = \sin 2\omega t / 2,$$

получим

$$p_L = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = \frac{U_m I_m}{\sqrt{2} \sqrt{2}} \sin 2\omega t,$$

или

$$p_L = UI \sin 2\omega t. \quad (6.20)$$

Таким образом, мгновенная мощность цепи с индуктивным сопротивлением изменяется с двойной частотой, в течение периода 2 раза достигая положительного максимума (рис. 6.6, z , моменты времени 2 и 6) и 2 раза отрицательного максимума при том же абсолютном значении (моменты времени 4 и 8). В течение полупериодов I и III индуктивность потребляет от генератора мощность на образование магнитного поля. В течение полупериодов II и IV мощность имеет отрицательный знак. В эти полупериоды ток в цепи уменьшается до нуля и запасенная в магнитном поле индуктивной катушки энергия возвращается обратно в источник.

Положительным мгновенное значение мощности p_L в полупериод I получается благодаря тому, что ток $+i$ и напряжение $+u$ в этот момент положительны (обе кривые лежат выше оси ωt). Для полупериода II ток положителен ($+i$), а напряжение отрицательно ($-u$), поэтому мощность имеет отрицательный знак. Для полупериода III ток и напряжение имеют знак минус ($-i - u$) и p_L — положительна и т. д.

Кривую мгновенных значений мощности можно было бы получить также графическим путем. При этом нужно найти мгновенные значения мощности для ряда точек (1, 2, ..., 9) — произведения мгновенных значений u и i для этих точек.

Среднее значение мощности за период в соответствии с рисунком 6.6, z равно нулю, так как при сложении всех положительных и отрицательных значений мгновенной мощности p_L , изменяющейся по синусоиде, получается сумма, равная нулю. Другими словами, в цепи с индуктивностью происходит периодический обмен энергией между генератором и индуктивностью цепи без превращения электрической энергии в тепловую или механическую. Энергия магнитного поля в джоулях, запасаемая за четверть периода,

$$W_m = LI_m^2 / 2, \quad (6.21)$$

где L — индуктивность катушки, Г; I_m — максимальная сила тока, А.

Во время полупериодов II и IV катушка отдает запасенную магнитным полем энергию обратно источнику.

Мера обмена энергией между источником и индуктивной катушкой, затрачиваемой на создание магнитного поля, называется реактивной мощностью и обозначается Q_L .

$$Q_L = UI = I^2 X_L = \omega L I^2, \quad (6.22)$$

где U — действующее значение напряжения, определяемое по показанию вольтметра, В; I — действующее значение реактивного тока, А; ω — угловая частота, рад/с; L — индуктивность катушки, Г.

Реактивную мощность в отличие от активной измеряют в вольт-амперах, называемых *реактивными вольт-амперами*: 1 вольт-ампер реактивный (1 вар) = 1 вольт · 1 ампер.

6.6. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНОЙ И ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ

Временная и векторная диаграммы. Реальная катушка индуктивности обычно имеет и активное сопротивление, которым нельзя пренебречь. На рисунке 6.7, а показана цепь катушки, индуктивность которой L , а активное сопротивление R . На рисунке 6.7, б изображены кривые мгновенных значений напряжения u и тока i в цепи R и L , а на рисунке 6.7, в — взаимное расположение векторов напряжения U_m и тока I_m сдвинутых относительно один другого на угол φ . Если в цепи с R и L проходит синусоидальный ток $i = I_m \sin \omega t$, то мгновенное значение активной составляющей напряжения может быть определено как $u_a = Ri = RI_m \sin \omega t$. Мгновенное значение напряжения на индуктивном сопротивлении в соответствии с формулой (6.18)

$$u_L = X_L I_m \sin(\omega t + \pi/2). \quad (6.23)$$

Мгновенное же значение напряжения, приложенного ко всей цепи, равно алгебраической сумме мгновенных значений напряжений на активном и индуктивном сопротивлениях:

$$u = u_a + u_L = RI_m \sin \omega t + X_L I_m \sin(\omega t + \pi/2). \quad (6.24)$$

Так как оба слагаемых этой суммы — синусоидальные величины, изменяющиеся с одинаковой частотой ω , то результирующее напряжение u тоже синусоидально и имеет ту же частоту.

Это результирующее напряжение u представлено на рисунке 6.7, б. Векторная диаграмма амплитудных значений напряжения и тока для рассматриваемой цепи приведена на рисунке 6.7, в.

Анализ схем с несколькими сопротивлениями в цепи удобно проводить на векторных диаграммах действующих значений величин, которые могут быть измерены приборами, например вольтметром и амперметром (рис. 6.7, а). Для перехода к диаграмме амплитудных величин каждый вектор действующего значения следует увеличить в $\sqrt{2}$ раз, так как $U = \sqrt{2}U'$, а $I_m = \sqrt{2}I$.

Порядок построения векторной диаграммы для схемы 6.7, а таков.

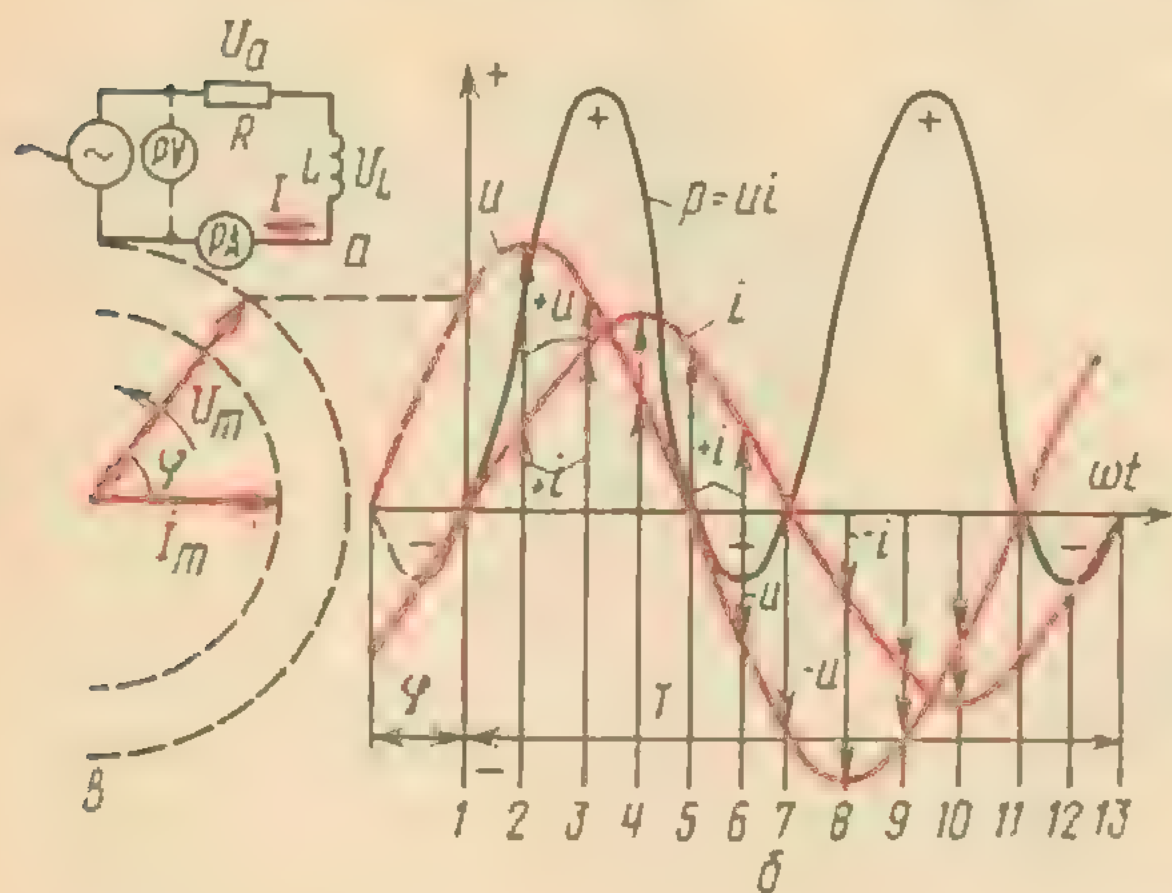


Рис. 6.7. Цепь с активным сопротивлением R и индуктивностью L :

а — схема включения; б — кривые мгновенных значений напряжения u , тока i и мощности p ; в — векторная диаграмма амплитудных значений тока I_m и напряжения U_m для начального момента времени.

Общим для обоих сопротивлений R и X_L в этой схеме является ток, действующее значение которого измеряют амперметром $РА$. Откладываем этот ток в определенном, удобном для нас масштабе (рис. 6.8, а) по горизонтали, так как начальная фаза тока $i = I_m \sin \omega t$ равна нулю (рис. 6.7, б). Напряжение U совпадает по фазе с током, поскольку оно приложено к участку цепи, имеющему только активное сопротивление R . Поэтому вектор $\dot{U}_R$ откладываем вдоль вектора $\dot{I}$. Масштаб напряжения также выбираем удобным для построения.

Напряжение U_L опережает ток I по фазе на угол $\pi/2$, так как оно приложено к участку цепи, имеющему только индуктивное сопротивление. Поэтому вектор $\dot{U}_L$ отложим в направлении, перпендикулярном вектору $\dot{I}$. При этом масштаб вектора $\dot{U}_L$ должен быть равен масштабу $\dot{U}_R$. Складывая затем геометрически $\dot{U}_R$ и $\dot{U}_L$, получим вектор действующего значения общего напряжения $\dot{U}$, приложенного к цепи с R и X_L .

Треугольники напряжений и сопротивлений. На векторной диаграмме (рис. 6.8, а) векторы $\dot{U}_R$, $\dot{U}_L$ и $\dot{U}$ образуют прямоугольный треугольник, который называют *треугольником напряжений*.

По теореме Пифагора для этого треугольника

$$U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2}. \quad (6.25)$$

Если все стороны треугольника напряжений разделить на силу тока I , то получится *треугольник сопротивлений* (рис. 6.8, б). Из этого треугольника

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (6.26)$$

где Z — полное сопротивление всей цепи, Ом.

Закон Ома для цепи с R и L . Если известно напряжение U , приложенное к исследуемой цепи (оно может быть измерено вольтметром PV на рисунке 6.7, а), а также ток в цепи I (он измеряется амперметром $РА$), то полное сопротивление всей цепи

$$Z = U/I,$$

отсюда

$$I = U/Z = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}. \quad (6.27)$$

Формула (6.27) является выражением закона Ома для цепи с индуктивной и активной нагрузкой, с последовательным соединением индуктивного и резистивного элементов.

Пользуясь векторными диаграммами, можно написать следующие

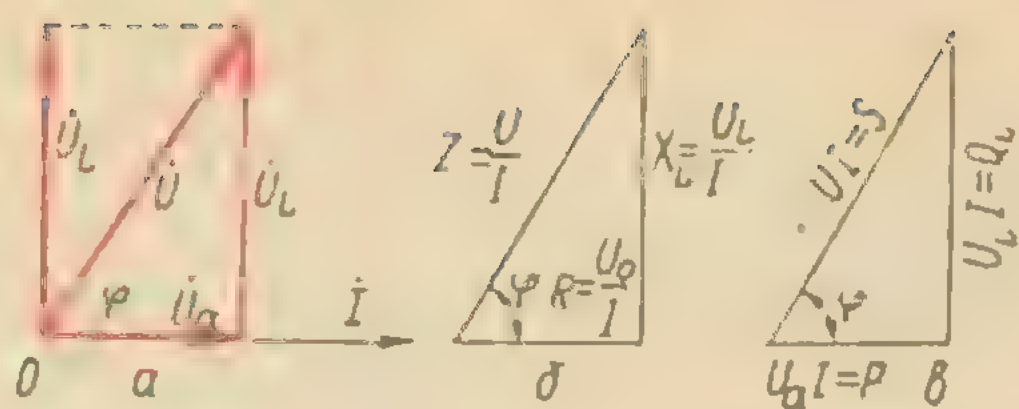


Рис. 6.8. Векторная диаграмма действующих значений тока I и напряжения U (а), треугольники сопротивлений (б) и мощностей (в).

соотношения между составляющими напряжения и найти значение угла φ . Так, из рисунка 6.8, а

$$\cos\varphi = U_a/U; U_a = U\cos\varphi; U_L = U\sin\varphi. \quad (6.28)$$

Из треугольника сопротивлений

$$\cos\varphi = R/Z; R = Z\cos\varphi; X_L = Z\sin\varphi. \quad (6.29)$$

В цепи с параллельным включением активного и индуктивного сопротивлений аналогично уравнению (6.28)

$$\cos\varphi = I_a/I; I_a = I\cos\varphi; I_L = I\sin\varphi. \quad (6.30)$$

Пример 6.1. Определить полное сопротивление, ток и угол сдвига фаз между напряжением сети и током в цепи, если активное сопротивление цепи $R = 50$ Ом, индуктивность катушки, включенной последовательно с активным сопротивлением, $L = 0,5$ Г, частота тока $f = 50$ Гц, напряжение $U = 220$ В.

Решение. Индуктивное сопротивление

$$X_L = \omega L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,5 = 157 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{2500 + 24649} = 165 \text{ Ом.}$$

Ток в цепи

$$I = U/Z = 220/165 = 1,34 \text{ А.}$$

Угол сдвига фаз находим следующим образом:

$$\cos\varphi = R/Z = 50/165 = 0,3; \sin\varphi = \sqrt{1 - 0,3^2} = 0,955; \varphi \approx 73^\circ.$$

Треугольник мощностей. Можно получить график мгновенных значений мощности, которую потребляет цепь с активным и индуктивным сопротивлением. С этой целью для ряда моментов времени (1, 2, ..., 13) определяют мгновенные значения тока i и напряжения u (рис. 6.7, б), а затем, перемножив их, находят мгновенные значения мощности p .

Как видно из диаграммы, мощность не является синусоидальной величиной. Значению энергии за период времени T соответствует площадь, заключенная между кривой мощности и осью времени. В моменты 5–17 и 11–13 энергия имеет отрицательное значение и должна быть отнесена к энергии, которая возвращается из магнитного поля катушки в сеть (к генератору). Энергия, соответствующая площади, ограниченной кривой и расположенной выше оси времени, является той энергией, которая поступает из генератора в цепь. Разность энергии со знаком плюс и минус равняется активной энергии, необратимо расходуемой на активном сопротивлении цепи.

Мгновенное значение мощности в цепи с активным и индуктивным сопротивлениями можно также определить аналитически:

$$\begin{aligned} p = ui &= U_m \sin(\omega t + \varphi) I_m \sin \omega t = U_m I_m (\sin \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi) \sin \omega t = \\ &= \sqrt{2} U \sqrt{2} I (\sin^2 \omega t \cos \varphi + \cos \omega t \sin \varphi \sin \omega t) = \\ &= 2UI \left(\frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \cos \varphi + \frac{\sin 2\omega t}{2} \sin \varphi \right) = \end{aligned}$$

$$= UI[\cos\varphi - (\cos 2\omega t \cos\varphi - \sin 2\omega t \sin\varphi)] = UI[\cos\varphi - \cos(2\omega t + \varphi)] = \\ = UI\cos\varphi - UI\cos(2\omega t + \varphi).$$

Второй член полученного выражения описывается периодической кривой, изменяющейся с двойной частотой по сравнению с частотой тока и напряжения. Как было показано выше (см. п. 6.3), при таком характере кривой ее среднее значение за период равно нулю.

Поэтому, переходя к средним значениям, получим *среднюю* мощность цепи, которую называют ее *активной* мощностью:

$$P = UI\cos\varphi. \quad (6.31)$$

Характер мощностей и соотношение между ними в схеме с активным и индуктивным сопротивлениями можно установить, если все стороны треугольника напряжений умножить на действующее значение тока I . При этом образуется *треугольник мощностей* (рис. 6.8, в). Из этого треугольника активная мощность, измеряемая, как известно, в ваттах или киловаттах,

$$P_a = U_a I = UI\cos\varphi = S\cos\varphi, \quad (6.32)$$

то есть результат тот же, что и при аналитическом определении.

Реактивная мощность, измеряемая, как указывалось выше, в вольт-амперах реактивных (вар) или киловольт-амперах реактивных (квар),

$$Q_L = U_L I = UI\sin\varphi = S\sin\varphi. \quad (6.33)$$

Полная мощность

$$S = UI = \sqrt{U^2 I^2} = \sqrt{(IU_a)^2 + (IU_L)^2} = \sqrt{P^2 + Q_L^2}. \quad (6.34)$$

Полную мощность измеряют в вольт-амперах (В·А) или киловольт-амперах (кВ·А).

Косинус φ ($\cos\varphi$) в цепи с индуктивностью в практике часто называют *отстающим*, или *положительным*.

На активном сопротивлении выделяется активная мощность $P = U_a I = I^2 R$, а индуктивное сопротивление определяет значение реактивной мощности, как

$$Q_L = U_L I = I^2 \omega L. \quad (6.35)$$

В практике активную мощность измеряют ваттметром, а полную мощность подсчитывают как произведение показаний вольтметра и амперметра. Зная эти две величины, можно рассчитать реактивную мощность.

Величину $\cos\varphi$ называют также *коэффициентом мощности*. Практически в электроустановках $\cos\varphi$ определяют, пользуясь показаниями ваттметра (или счетчика с пересчетом киловатт-часов в киловатты), вольтметра и амперметра, или измеряют специальным прибором *фазометром*. Отношение показаний ваттметра к произведению показаний вольтметра на показания амперметра дает значение коэффициента мощности:

$$\cos\varphi = P/UI = P/S. \quad (6.36)$$

Пример 6.2. Однофазный электрический двигатель, коэффициент полезного действия которого $\eta = 0,8$, потребляет из сети напряжением $U = 220$ В с $\cos\varphi = 0,85$ ток $I = 30$ А. Определить потребляемую из сети активную мощность P , полезную мощность $P_{\text{ф}}$ двигателя, циркулирующую в сети реактивную мощность Q_L и полную мощность S .

Решение. Активная мощность, потребляемая двигателем из сети:

$$P = UI \cos\varphi = 220 \cdot 30 \cdot 0,85 = 5600 \text{ Вт} = 5,6 \text{ кВт.}$$

Полезная мощность двигателя

$$P_{\text{ф}} = P\eta = 5,6 \cdot 0,8 = 4,48 \text{ кВт.}$$

Реактивная мощность

$$Q_L = UI \sin\varphi = UI \sqrt{1 - \cos^2\varphi} = 220 \cdot 30 \cdot 0,52 = 3430 \text{ вар} = 3,4 \text{ квар.}$$

Полная мощность

$$S = UI = 220 \cdot 30 = 6600 \text{ В} \cdot \text{А} = 6,6 \text{ кВ} \cdot \text{А},$$

или иначе

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{5,6^2 + 3,4^2} = 6,6 \text{ кВ} \cdot \text{А}.$$

Пример 6.3. Ваттметр показывает 1500 Вт, вольтметр — 380 В, амперметр — 50 А. Определить $\cos\varphi$, реактивную мощность, активный и реактивный токи.

Решение. Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI} = \frac{1500}{380 \cdot 50} = 0,79.$$

Реактивная мощность

$$Q_L = UI \sin\varphi = 380 \cdot 50 \cdot 0,61 = 1160 \text{ вар},$$

где

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos^2\varphi} = \sqrt{1 - 0,625} = 0,61.$$

Активный ток

$$I_a = I \cos\varphi = 50 \cdot 0,79 = 39,5 \text{ А},$$

Реактивный ток

$$I_L = I \sin\varphi = 30,5 \text{ А}.$$

6.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДРОССЕЛЬ.

УПРАВЛЯЕМЫЙ ДРОССЕЛЬ. МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ

Электрический дроссель — это катушка индуктивности, включаемая в цепь с целью ограничения силы переменного тока или предохранения цепи постоянного тока от появления в ней составляющей переменного тока. Полное сопротивление дросселя (6.26)

$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2},$$

где R — активное сопротивление дросселя; ωL — индуктивное сопротивление дросселя.

В цепи постоянного тока частота тока $f = 0$ и полное сопротивление Z равно активному сопротивлению R . В цепи переменного тока полное сопротивление будет тем больше, чем больше частота тока.

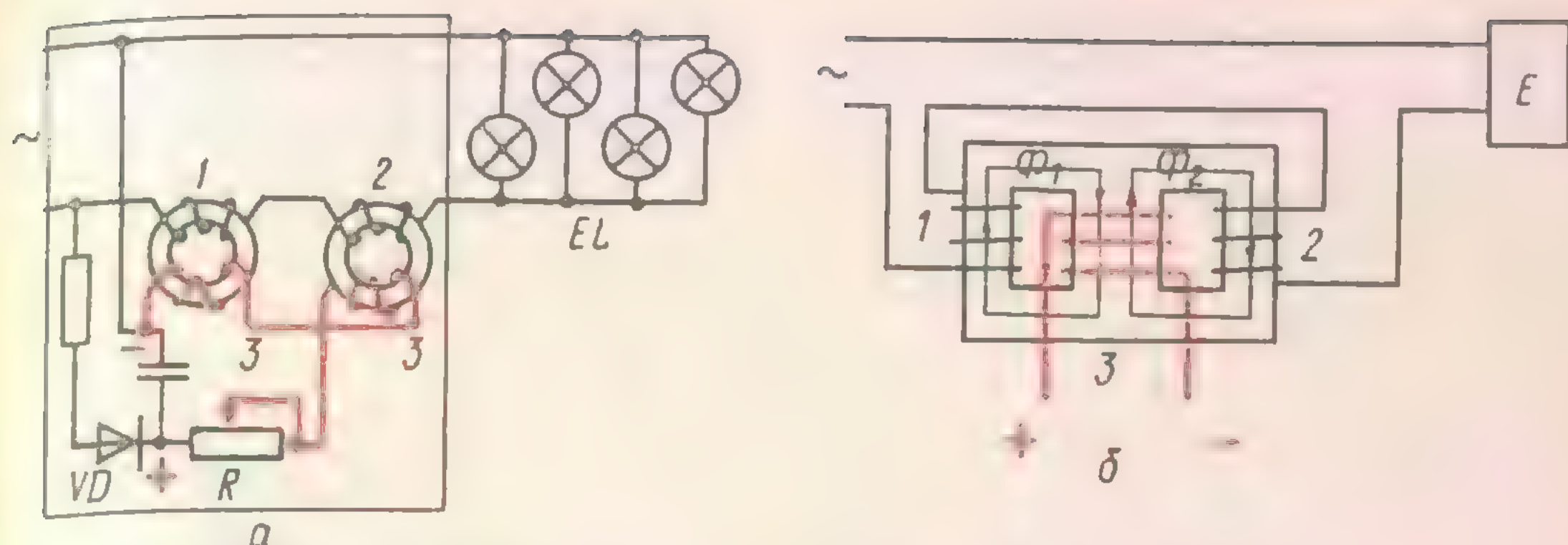


Рис. 6.9. Магнитные усилители:

а — схема управления системой освещения при помощи магнитного усилителя, составленного из двух управляемых дросселей; б — схема магнитного усилителя на III-образном сердечнике; 1 и 2 — рабочие обмотки, 3 — обмотка управления, E — нагрузка; VD — выпрямитель; EL — лампа накаливания.

Управляемый дроссель, кроме обмотки индуктивности, имеет обмотку подмагничивания, которая присоединяется к источнику постоянного тока. Два управляемых дросселя, включенные по схеме, изображенной на рисунке 6.9, а, составляют магнитный усилитель. Рабочие обмотки 1 и 2 магнитного усилителя могут быть соединены последовательно, как показано на рисунке, или параллельно. Обмотки же подмагничивания 3, включенные на источник постоянного тока, должны быть соединены так, чтобы ЭДС, наводимые в них рабочими обмотками, были противоположно направлены, что исключает возможность протекания переменного трансформируемого тока через источник постоянного тока.

Если в обмотке подмагничивания ток очень мал (полностью введено сопротивление R), то индуктивность рабочих обмоток максимальная, а ток в цепи ламп накаливания EL (нагрузка) минимальный. При повышении тока подмагничивания (уменьшение сопротивления R) до момента полного насыщения сердечника магнитная проницаемость сердечников понижается, в связи с этим уменьшается индуктивность рабочих обмоток 1 и 2, то есть становится меньше полное сопротивление первичной цепи и, значит, ток нагрузки возрастает. Сила постоянного тока в управляющих катушках значительно меньше, чем тока в цепи с силовой нагрузкой. Поэтому в магнитном усилителе происходит управление большими мощностями в силовой цепи при помощи малых токов в цепи управления.

Магнитный усилитель. На рисунке 6.9, б приведена схема магнитного усилителя на III-образном сердечнике. Магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 рабочих обмоток, расположенных на крайних стержнях, направлены так, что в среднем сердечнике они вычитаются один из другого. На этом сердечнике помещена обмотка управления 3.

Магнитные усилители в целях повышения коэффициента усиления, то есть отношения мощности первичной (рабочей) цепи к мощности цепи управления, снабжают также дополнительными обмотками обратной связи и смещения.

6.8. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

Емкостной ток. С изменением напряжения на обкладках конденсатора, включенного в цепь переменного тока (рис. 6.10, а), изменяется его заряд. Приращение заряда Δq , который поступает в конденсатор за очень малый промежуток времени Δt , равно произведению силы тока i в данный момент времени на единицу времени Δt :

$$\Delta q = i \Delta t. \quad (6.37)$$

Но, как рассматривалось выше,

$$q = Cu, \quad (6.38)$$

где q — электрический заряд конденсатора, Кл; C — емкость конденсатора, Ф; u — напряжение на обкладках конденсатора, В.

Из выражения (6.38) следует, что приращение заряда Δq при увеличении напряжения на обкладках конденсатора на Δu будет равно

$$\Delta q = C \Delta u. \quad (6.39)$$

Согласно формулам (6.37) и (6.39)

$$i \Delta t = C \Delta u,$$

или

$$i = C \frac{\Delta u}{\Delta t}, \quad (6.40)$$

то есть переменный ток в цепи с емкостью пропорционален скорости изменения приложенного к конденсатору напряжения.

Пользуясь формулой (6.40) и учитывая, что цепь включена на синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, можно построить кривую мгновенных значений тока (рис. 6.10, в). В первую

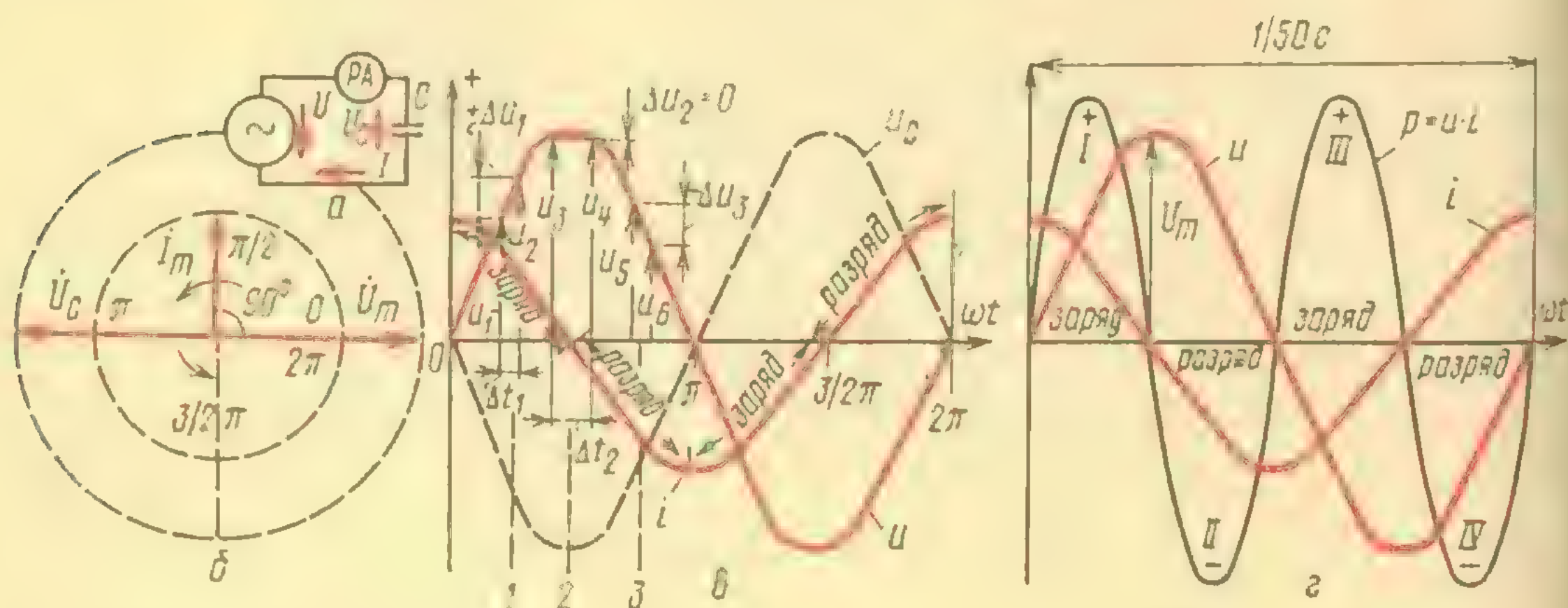


Рис. 6.10. Цепь с конденсатором C :

а — схема включения; б — векторная диаграмма для начального момента времени; в — кривые мгновенных значений напряжения u и тока i ; г — построение кривой мгновенных значений мощности P по кривым тока i и напряжения u .

четверть периода приращение напряжения имеет положительный знак. Например, для момента времени 1: $u_2 - u_1 = +\Delta u_1$. В соответствии с формулой (6.40) мгновенное значение тока в этот момент времени также имеет положительный знак. В момент времени 2, когда кривая напряжения проходит через свой максимум, приращение напряжения за отрезок Δt_2 времени $\Delta u_2 = 0$. Ток в этот момент времени также равен нулю: $i = C \frac{0}{\Delta t} = 0$, то есть кривая тока в момент времени 2 проходит через нуль. Конденсатор при этом обладает максимальным зарядом. В момент времени 3 приращение напряжения имеет отрицательный знак, так как оно нарастает в отрицательном направлении: $u_6 - u_5 = -\Delta u_3$. Ток для этого момента времени также отрицателен:

$$i = C \frac{-\Delta u}{\Delta t} = -i_3.$$

Рассуждая подобным образом, исследуют процесс в каждый момент времени.

Для любого момента времени напряжение и ток могут быть подсчитаны как

$$\begin{aligned} u &= U_m \sin \omega t; \\ i &= I_m \sin(\omega t + \pi/2). \end{aligned} \quad (6.41)$$

Чтобы получить соотношения между действующими значениями тока и напряжения в цепи с емкостью, в формуле (6.40) необходимо раскрыть величину $\Delta u / \Delta t$.

Пусть в момент времени t мгновенное значение напряжения $u = U_m \sin \omega t$, тогда для момента времени $t + \Delta t$ мгновенное напряжение

$$u + \Delta u = U_m \sin \omega(t + \Delta t).$$

Отсюда

$$\begin{aligned} \Delta u &= U_m \sin(\omega t + \omega \Delta t) - u = U_m [\sin(\omega t + \omega \Delta t) - \sin \omega t] = \\ &= U_m (\sin \omega t \cos \omega \Delta t + \cos \omega t \sin \omega \Delta t - \sin \omega t). \end{aligned}$$

Поскольку

$$\cos \omega \Delta t \approx \cos 0 = 1 \text{ и } \sin \omega \Delta t \approx \omega \Delta t, \text{ то}$$

$$\Delta u = U_m (\sin \omega t + \cos \omega t \omega \Delta t - \sin \omega t) = U_m \omega \Delta t \cos \omega t,$$

откуда

$$\Delta u / \Delta t = U_m \omega \cos \omega t. \quad (6.42)$$

Подставляя в формулу (6.40) вместо $\Delta u / \Delta t$ его значение из (6.42), получим:

$$i = U_m \omega C \cos \omega t = U_m \omega C \sin(\omega t + \pi/2). \quad (6.43)$$

Следовательно, ток в цепи с емкостью опережает напряжение на 90° , или $\pi/2$ радиан. Векторная диаграмма для начального момента времени приведена на рисунке 6.10, б.

Теперь проследим процесс зарядки и разрядки конденсатора.

Если в первую четверть периода конденсатор заряжается, то во вторую четверть периода, когда напряжение уменьшается от максимального значения до нуля, конденсатор разряжается и посылает ток навстречу приложенному напряжению. Когда напряжение проходит через нуль, ток в цепи достигает своего максимального значения. С момента перехода напряжения через нуль вновь начинается процесс заряда конденсатора, ток совпадает с напряжением по направлению, то есть остается отрицательным по знаку. С увеличением напряжения на обкладках конденсатора ток постепенно убывает. В момент, когда напряжение, достигнув своего максимального отрицательного значения, начинает уменьшаться, конденсатор, полностью зарядившись, начинает разряжаться.

Емкостное сопротивление. Из формул (6.41) и (6.43) имеем:

$$I_m = U_m \omega C.$$

Поделим обе части равенства на $\sqrt{2}$:

$$\frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \omega C,$$

то есть

$$I = U \omega C = \frac{U}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U}{X_C} \text{ или } U = I X_C = \frac{I}{\omega C}, \quad (6.44)$$

где I — действующее значение силы тока, А; U — действующее значение напряжения, В;

C — емкость конденсатора, Ф; ω — угловая частота тока, рад/с; $X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$ — реактивное емкостное сопротивление конденсатора.

Емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте напряжения, приложенного к конденсатору, и емкости конденсатора, то есть чем больше частота и чем больше емкость конденсатора, тем меньше значение емкостного сопротивления (и наоборот).

Размерность этого сопротивления

$$[X_C] = \left[\frac{1}{\omega C} \right] = \frac{1}{\frac{1}{\text{с}} \cdot \frac{\text{А} \cdot \text{с}}{\text{В}}} = \frac{\text{В}}{\text{А}} = \text{Ом}.$$

Емкостное сопротивление носит реактивный характер: в моменты, когда мгновенное значение напряжения увеличивается, конденсатор запасает заряд (заряжается), напряжение на его обкладках повышается. При уменьшении мгновенных значений напряжения конденсатор разряжается и отдает запасенный заряд обратно генератору.

Формула (6.44) выражает закон Ома для цепи с емкостной нагрузкой.

Пример 6.4. Определить силу тока в цепи с конденсатором $C = 10$ мкФ ($10 \cdot 10^{-6}$ Ф), если частота переменного тока $f = 50$ Гц, а напряжение $U = 220$ В.

Решение. Емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{314 \cdot 10 \cdot 10^{-6}} = 318 \text{ Ом}.$$

$$I = \frac{220}{318} \approx 0,69 \text{ А.}$$

Емкостная реактивная мощность Q_C . Мгновенная мощность p_C в каждый момент времени

$$\begin{aligned} p_C = ui &= U_m \sin \omega t I_m \sin(\omega t + \pi/2) = U_m \sin \omega t I_m \cos \omega t = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t. \end{aligned} \quad (6.45)$$

Следовательно, мгновенная мощность — синусоидальная величина, изменяющаяся с двойной частотой по сравнению с частотой тока (напряжения). Кривую мгновенных значений этой мощности можно построить графическим путем. Рассматривая полученную развернутую диаграмму мощности (рис. 6.10, 2), можно отметить следующее. Мгновенная мощность, как и в цепи с индуктивностью, колеблется с двойной частотой. В полупериоды I и III мгновенная мощность имеет положительный знак (а при индуктивности — отрицательный). Фактический смысл этого явления заключается в том, что в эти полупериоды конденсатор заряжается — ток совпадает по направлению с напряжением (по знаку). В конденсаторе запасается энергия электрического поля:

$$W_\phi = CU_m^2/2, \quad (6.46)$$

где C — емкость конденсатора, Ф; U_m — максимальное значение напряжения, приложенного к конденсатору, В.

В полупериоды II и IV, когда напряжение уменьшается от максимального значения до нуля, конденсатор разряжается, отдавая запасенную энергию обратно генератору. Энергия, полученная цепью с конденсатором от генератора за период $T = 1/150$ с, равна нулю. Мощность, которая характеризует эту энергию, является *реактивной*:

$$Q_C = UI = \omega CU^2. \quad (6.47)$$

Ее так же, как и Q_L , измеряют в вольт-амперах реактивных (вар).

Реактивная энергия как в цепи с индуктивностью, так и в цепи с емкостью циркулирует между источником тока и токоприемником, не выделяясь и не превращаясь в другие формы энергии на индуктивном или емкостном сопротивлении, но реактивный ток нагружает линию и вызывает в ней потери на нагрев проводов.

6.9. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНОЙ И ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКАМИ

Векторная диаграмма. Общий ток I в такой цепи (рис. 6.11, а) вызывает падение напряжения U_a на активном сопротивлении R , совпадающее по фазе с током, и падение напряжения U_C на

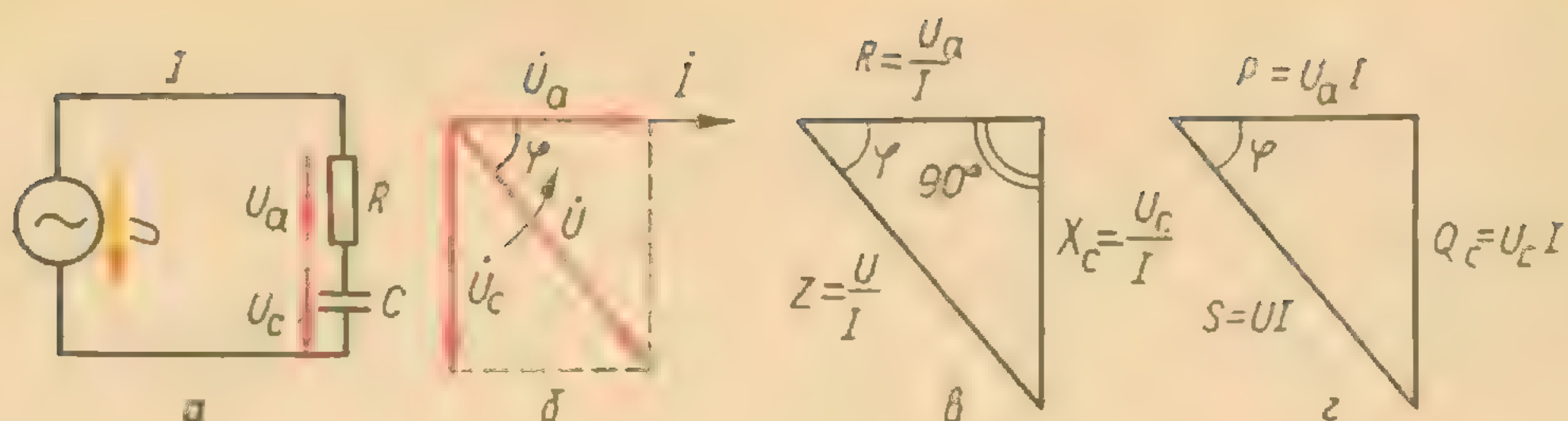


Рис. 6.11. Цепь с активной R и емкостной C нагрузками:
 а — схема цепи; б — векторная диаграмма тока и напряжений; в — треугольник сопротивлений; г — треугольник мощностей.

емкостном сопротивлении X_C . Напряжение U_C отстает от тока на 90° , или на $\pi/2$. По закону Кирхгофа общее напряжение в цепи равно геометрической сумме напряжений на отдельных ее участках, т. е. $\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_c$. Из векторной диаграммы (рис. 6.11, б) модуль общего напряжения

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_c^2}. \quad (6.48)$$

Закон Ома для цепи с R и C . Выделив на векторной диаграмме треугольник напряжений U , U_a , U_c и разделив каждое из них на ток I , перейдем к треугольнику сопротивлений (рис. 6.11, в), из которого полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}. \quad (6.49)$$

По закону Ома для рассматриваемой цепи

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}. \quad (6.50)$$

В цепи с активным и емкостным сопротивлениями ток опережает напряжение на угол φ . Этот угол может быть найден из выражений

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{U_c}{U_a} = \frac{X_C}{R}; \quad \cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{R}{Z}. \quad (6.51)$$

Пример 6.5. Определить полное сопротивление, силу тока и угол сдвига фаз в цепи переменного тока частотой $f = 50$ Гц и напряжением $U = 220$ В, в которую последовательно включены емкость $C = 20$ мкФ и сопротивление $R = 40$ Ом.

Решение. Емкостное сопротивление

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 20} \approx 40 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление

$$Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} = \sqrt{40^2 + 40^2} \approx 56,6 \text{ Ом}.$$

Сила тока в цепи

$$I = U/Z = 220/56,6 \approx 3,9 \text{ А}.$$

Угол сдвига фаз между током и напряжением

$$\operatorname{tg} \varphi = X_C/R = 40/40 = 1; \quad \varphi = 45^\circ.$$

Треугольник мощностей. Если в цепи последовательно включены активное и емкостное сопротивления, то напряжение на емкостном сопротивлении

$$U_c = \frac{I}{\omega C} = IX_c.$$

Вектор напряжения $\dot{U}_c$ отстает от вектора тока $\dot{I}$ на 90° (рис. 6.11, б). Между генератором и емкостью происходит обмен реактивной мощностью:

$$Q_c = U_c^2 / X_c = \omega C U_c^2. \quad (6.52)$$

Соотношения между мощностями в рассматриваемой цепи можно выявить, построив треугольник мощностей (рис. 6.11, г).

Полная мощность S в цепи равна геометрической сумме активной и реактивной мощностей, а ее абсолютное значение из треугольника мощностей

$$S = \sqrt{P^2 + Q_c^2} = \sqrt{(U I)^2 + (U_c I)^2} = \sqrt{I^2 (U^2 + U_c^2)} = IU, \quad (6.53)$$

где U — общее напряжение сети; I — сила тока, потребляемого из сети.

Активная мощность в этом случае

$$P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi. \quad (6.54)$$

Коэффициент мощности $\cos \varphi$ в цепи с емкостью в практике часто называют *опережающим* или *отрицательным*.

6.10. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С АКТИВНОЙ, ИНДУКТИВНОЙ И ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКАМИ

Векторная диаграмма. В такой цепи (рис. 6.12, а) протекает общий ток I , вызывающий падение напряжения на ее элементах.

Векторная диаграмма рассматриваемой цепи приведена на рисунке 6.12, б. Вектор общего напряжения $\dot{U}$ равен геометрической сумме векторов падений напряжений $\dot{U}_a$, $\dot{U}_L$ и $\dot{U}_c$. Из векторной диаграммы значение общего напряжения

$$U = \sqrt{U_a^2 + (U_L - U_c)^2}. \quad (6.55)$$

Из треугольника сопротивлений (рис. 6.12, в) полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2} = \sqrt{R^2 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}. \quad (6.56)$$

Закон Ома для рассматриваемой цепи:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}}. \quad (6.57)$$

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi = R/Z. \quad (6.58)$$

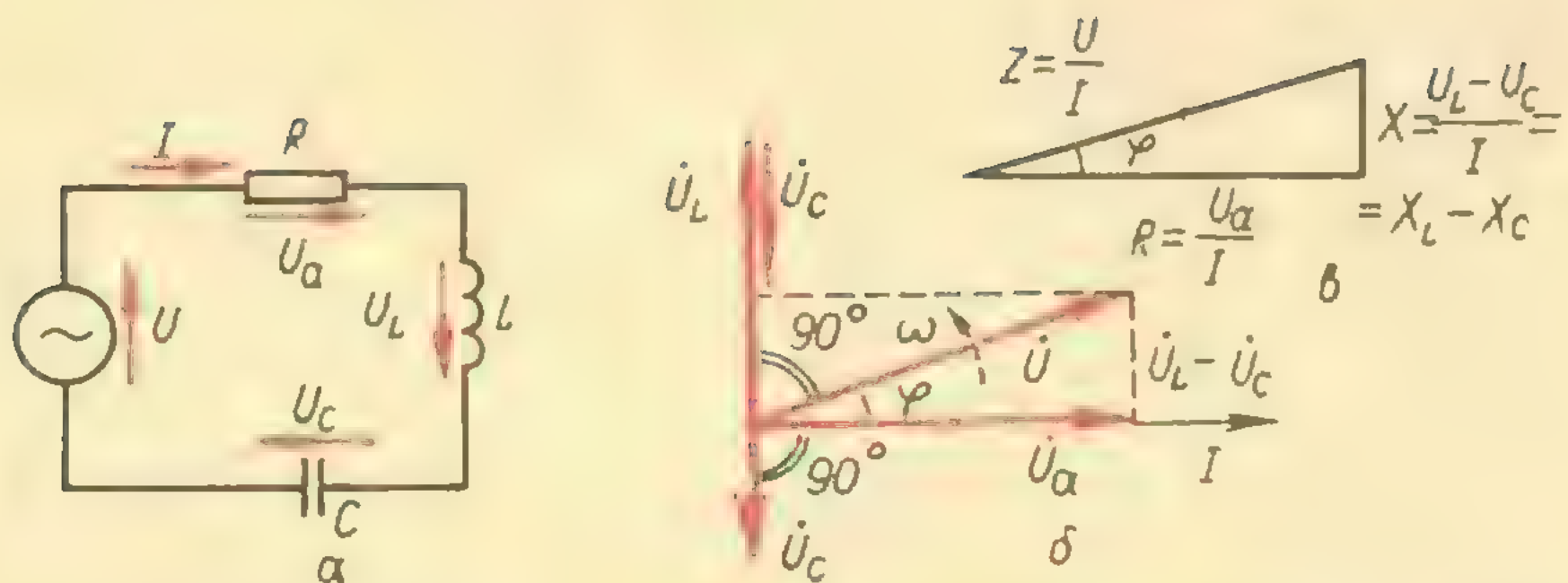


Рис. 6.12. Цепь с последовательным включением активной R , индуктивной L и емкостной C нагрузок:

a — схема цепи; b — векторная диаграмма тока и напряжений на элементах схемы; c — треугольник сопротивлений.

Резонанс напряжений. Соответствующим подбором значений L и C можно добиться такого результата, когда

$$X_L = X_C \text{ или } \omega L - \frac{1}{\omega C} = 0,$$

то есть когда емкостное сопротивление будет равно индуктивному. Сила тока в цепи при этом будет максимальной, ограниченной только активным сопротивлением R :

$$I = U/R.$$

Этот случай в электрической цепи с последовательным соединением сопротивлений называется *резонансом напряжений*.

Резонанс напряжений в электросистемах иногда возникает непредвиденно и приводит к тому, что на отдельных установках возникают перенапряжения, в несколько раз превышающие рабочие напряжения. В таких случаях может быть повреждена изоляция.

Явление резонанса широко используется в электро- и радиотехнике. В частности, при настройке приемника на волну (частоту) радиостанции вращают конденсатор переменной емкости до тех пор, пока контур приемника, состоящий из L и C , не настроится в резонанс на частоту, с которой работает радиостанция.

Пример 6.6. В сеть напряжением $U = 220$ В и частотой $f = 50$ Гц включены последовательно активное сопротивление $R = 50$ Ом, индуктивность $L = 510$ мГ и емкость $C = 50$ мкФ. Определить полное сопротивление Z цепи, силу тока I в цепи, активную U_R , емкостную U_C и индуктивную U_L составляющие напряжения, угол φ сдвига фаз между током и напряжением.

Решение. Полное сопротивление цепи

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{50^2 + (160 - 64)^2} = 108,5 \text{ Ом},$$

где

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,510 = 160 \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{10^6}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 50} = 64 \text{ Ом}.$$

Сила тока в цепи

$$I = U/Z = 220/108,5 = 2,03 \approx 2 \text{ A.}$$

Составляющие напряжения

$$U_R = RI \approx 50 \cdot 2 = 100 \text{ B; } U_L = X_L I \approx 160 \cdot 2 = 320 \text{ B; } U_C = X_C I \approx 64 \cdot 2 = 128 \text{ B}$$

Угол сдвига между током и общим напряжением в цепи

$$\varphi = 62^\circ 32',$$

так как

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L - X_C}{R} = \frac{160 - 64}{50} = 1,92.$$

6.11. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНО СОЕДИНЕННЫМИ ПРИЕМНИКАМИ ЭНЕРГИИ

Векторная диаграмма (случай 1). Рассмотрим цепь с двумя параллельными ветвями, в каждую из которых включен приемник энергии, обладающий активным и индуктивным сопротивлениями — соответственно R_1 и L_1 и R_2 и L_2 (рис. 6.13, а). Требуется найти общий ток I , потребляемый цепью, который представляет собой геометрическую сумму токов в ветвях I_1 и I_2 : $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$.

В этой схеме напряжение U источника общее для обеих ветвей цепи. Поэтому векторную диаграмму начинаем строить с вектора напряжения $\dot{U}$. Затем под углом φ_1 , который можно определить по значению

$$\cos \varphi = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_1^2}},$$

в сторону отставания (по часовой стрелке от вектора $\dot{U}$), откладываем вектор тока $\dot{I}_1$. Аналогично под углом φ_2 к $\dot{U}$ откладываем вектор $\dot{I}_2$. Вектор общего тока $\dot{I}$ определяем как геометрическую сумму векторов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$. Проектируя векторы тока на горизонтальную ось (с ней совмещен вектор напряжения $\dot{U}$), находим векторы активных составляющих токов $\dot{I}_{a1}$ и $\dot{I}_{a2}$ в ветвях с R_1 и R_2 и общий активный ток $\dot{I}_a$. На вертикальной оси получаем соответственно реактивные составляющие токи ветвей $\dot{I}_{p1}$ и $\dot{I}_{p2}$ и общий реактивный ток $\dot{I}_p$.

Из построенной диаграммы можно вывести следующие соотношения. Общий активный ток

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2. \quad (6.59)$$

Общий реактивный ток

$$I_p = I_{p1} + I_{p2} = I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2. \quad (6.60)$$

Полный ток

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_{p1} + I_{p2})^2}. \quad (6.61)$$

Активная составляющая полного тока $I_a = I \cos \varphi$.

Активная мощность, потребляемая всей схемой,

$$P = UI_a = UI \cos \varphi = U(I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2). \quad (6.62)$$

Этот метод расчета при большом числе параллельных ветвей очень неудобен. В таких случаях пользуются *методом проводимостей*. Рассмотрим этот метод применительно к схеме, изображенной на рисунке 6.13, а.

Токи в первой и во второй ветвях схемы могут быть определены как

$$I_1 = U/Z_1 \text{ и } I_2 = U/Z_2, \quad (6.63)$$

где $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ и $Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2}$ — полные сопротивления параллельных ветвей.

Величины, обратные полным сопротивлениям, то есть $1/Z_1$ и $1/Z_2$, называют полными проводимостями и обозначают Y_1 и Y_2 :

$$Y_1 = 1/Z_1 \text{ и } Y_2 = 1/Z_2 \text{ или } Z_1 = 1/Y_1 \text{ и } Z_2 = 1/Y_2.$$

Заменяя в формулах (6.63) величину Z величиной $1/Y$, получим:

$$I_1 = UY_1 \text{ и } I_2 = UY_2. \quad (6.64)$$

Активные составляющие этих токов

$$I_{a1} = I_1 \cos \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{R_1}{Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2} = UG_1$$

$$I_{a2} = I_2 \cos \varphi_2 = UG_2, \quad (6.65)$$

где $G_1 = R_1/Z_1^2$ и $G_2 = R_2/Z_2^2$ — активные проводимости первой и второй ветвей.

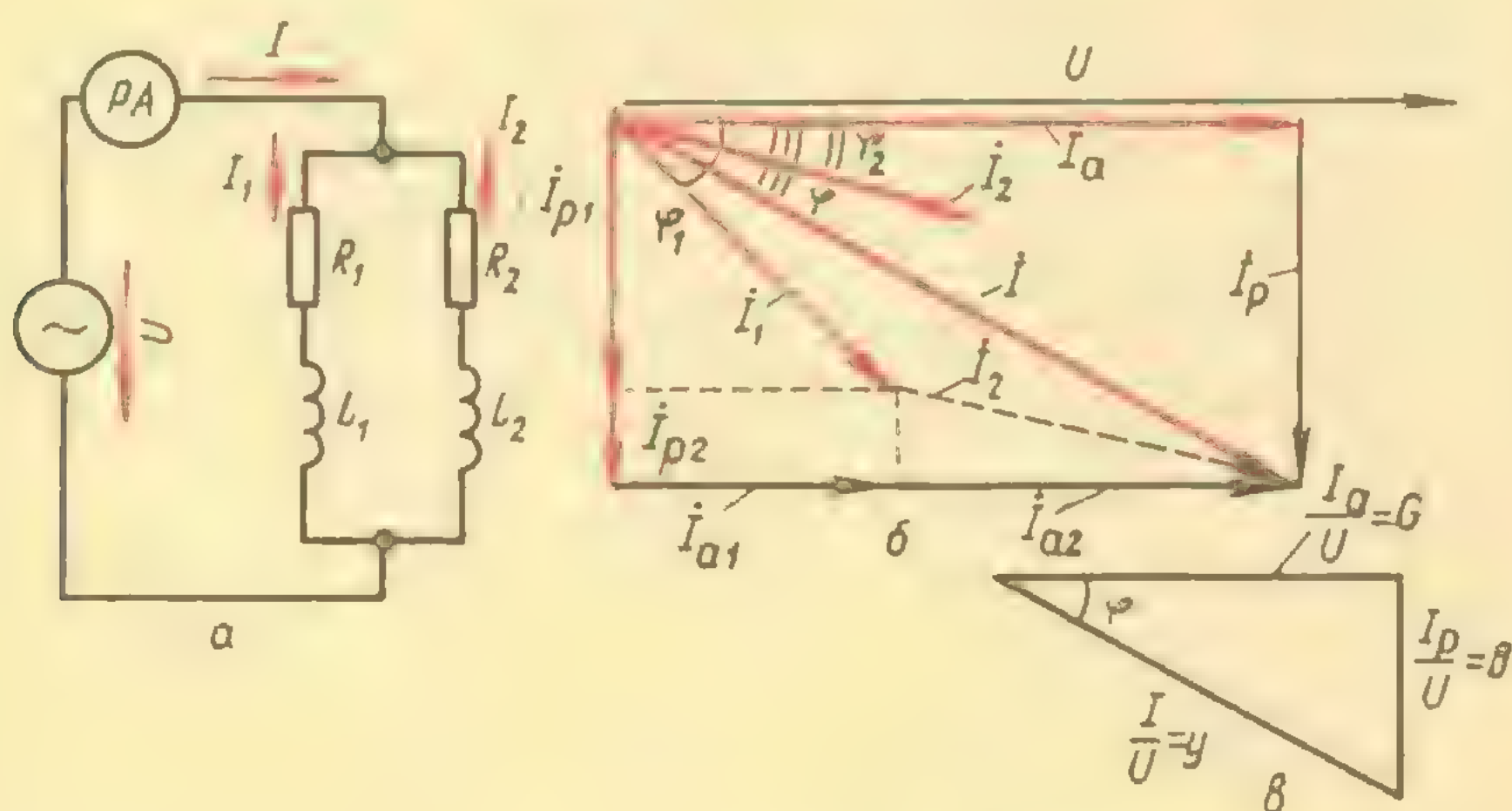


Рис. 6.13. Цепь с двумя параллельными ветвями, состоящими из активных R_1 и R_2 и индуктивных L_1 и L_2 нагрузок:
а — схема цепи; б — векторная диаграмма напряжения и токов; в — треугольник проводимостей.

Реактивные составляющие токов в первой и второй ветвях схемы

$$I_{p1} = I_1 \sin \varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{X_1}{Z_1} = U \frac{X_1}{Z_1^2} = UB_1$$

$$I_{p2} = I_2 \sin \varphi_2 = UB_2,$$

где $B_1 = X_1 / Z_1^2$ и $B_2 = X_2 / Z_2^2$ — реактивные проводимости первой и второй ветвей.

Общие токи в ветвях

$$I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} = \sqrt{U^2 G_1^2 + U^2 B_1^2} = U \sqrt{G_1^2 + B_1^2};$$

$$I_2 = \sqrt{I_{a2}^2 + I_{p2}^2} = \sqrt{U^2 G_2^2 + U^2 B_2^2} = U \sqrt{G_2^2 + B_2^2}. \quad (6.66)$$

Сопоставляя формулы (6.64) и (6.66), можно заметить:

$$Y_1 = \sqrt{G_1^2 + B_1^2} \text{ и } Y_2 = \sqrt{G_2^2 + B_2^2}, \quad (6.67)$$

то есть активная, реактивная и полная проводимости связаны между собой как стороны прямоугольного треугольника. Действительно, *треугольник проводимостей* (рис. 6.13, в) можно получить из треугольника токов I , I_a и I_p (рис. 6.13, б), если каждую из его сторон разделить на общее напряжение U .

Продолжая расчет токов в схеме, показанной на рисунке 6.13, а, получим активную и реактивную составляющие общего тока:

$$I_a = I_{a1} + I_{a2} = UG_1 + UG_2 = U(G_1 + G_2) = UG;$$

$$I_p = I_{p1} + I_{p2} = UB_1 + UB_2 = U(B_1 + B_2) = UB,$$

где $G = G_1 + G_2$ и $B = B_1 + B_2$ — соответственно активная и реактивная проводимости всей цепи.

Общий ток может быть найден как

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{(UG)^2 + (UB)^2} = U \sqrt{G^2 + B^2} = UY. \quad (6.68)$$

где $Y = \sqrt{G^2 + B^2}$ — полная проводимость всей цепи.

Активную P , реактивную Q и полную S мощности всей цепи можно определить как

$$\left. \begin{aligned} P &= UI_a = UUG = U^2 G; \\ Q &= UI_p = UUB = U^2 B; \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{U^4 G^2 + U^4 B^2} = U^2 \sqrt{G^2 + B^2} = U^2 Y. \end{aligned} \right\} \quad (6.69)$$

Векторная диаграмма (случай 2). Рассмотрим теперь случай параллельного соединения двух ветвей (рис. 6.14, а), в одну из которых включены активное сопротивление и индуктивность, а в другую — активное сопротивление и емкость.

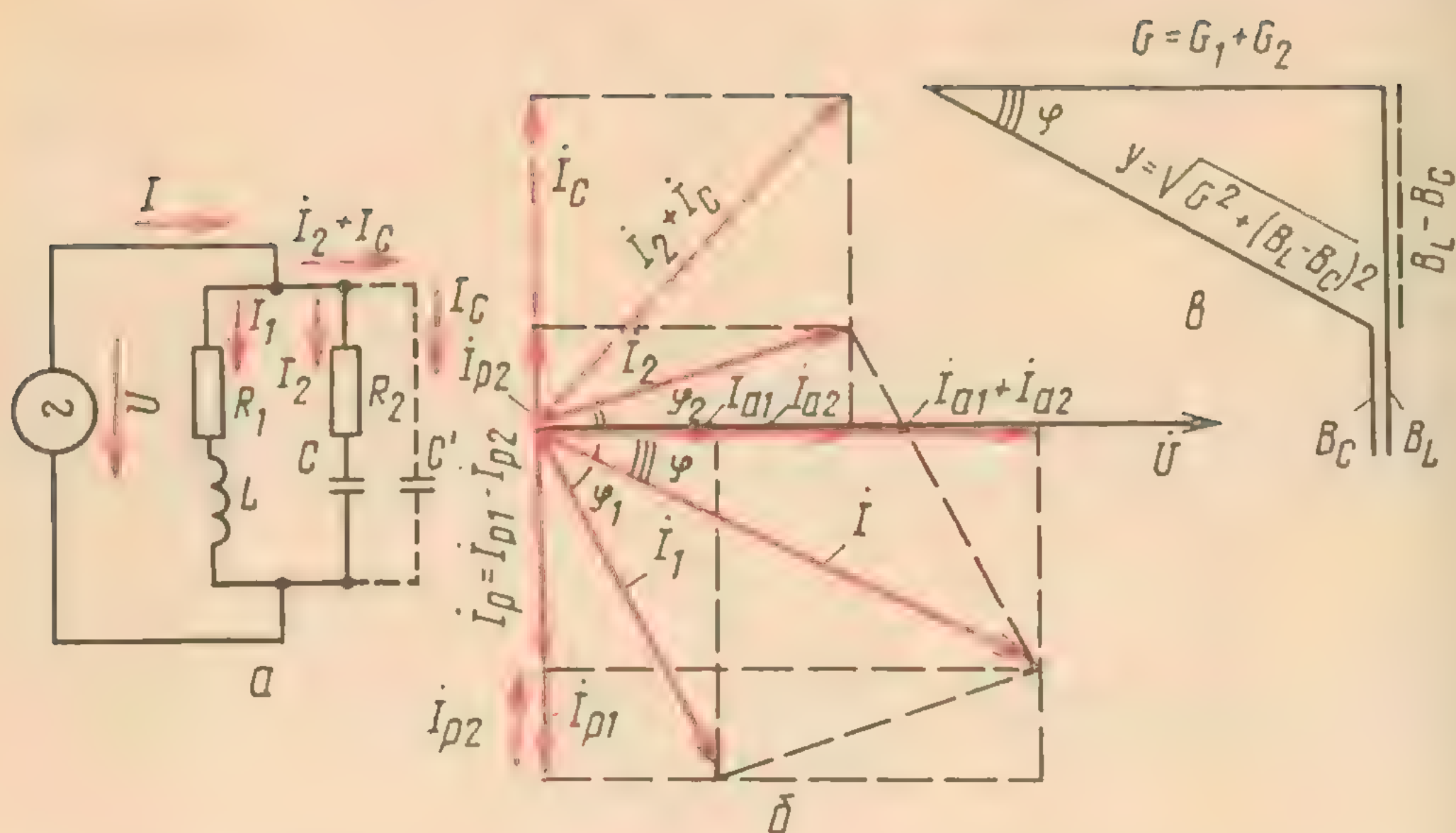


Рис. 6.14. Цепь из двух параллельных ветвей, в одну из которых включены активная и индуктивная, а в другую — активная и емкостная нагрузки:
 а — схема цепи; б — векторная диаграмма напряжения и токов; в — треугольник проводимостей.

Векторную диаграмму следует начинать строить с вектора напряжения $\dot{U}$. Затем определить $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$, причем $\cos \varphi_1$ будет отстающим (в цепь включена индуктивность), а $\cos \varphi_2$ — опережающим (в цепь включена емкость):

$$\cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} = \frac{R_1}{\sqrt{R_1^2 + X_L^2}} \quad ; \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2} = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + X_C^2}}.$$

По значениям $\cos \varphi_1$ и $\cos \varphi_2$ определяют углы φ_1 и φ_2 , а затем под этими углами к напряжению откладывают соответствующие им векторы токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$. Вектор общего тока в цепи $\dot{I}$ равен геометрической сумме векторов токов $\dot{I}_1$ и $\dot{I}_2$.

Как видно из векторной диаграммы, общий ток

$$I = \sqrt{(I_{a1} + I_{a2})^2 + (I_{p1} - I_{p2})^2},$$

где $I_{p1} - I_{p2} = I_p$ — реактивный ток в общей ветви.

Выделив на векторной диаграмме (рис. 6.14, б) треугольник токов $\dot{I}$, $\dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2}$ и $\dot{I}_p = \dot{I}_{p1} - \dot{I}_{p2}$ и поделив их на общее для них напряжение U , получим треугольник проводимостей Y , G , $B_L - B_C$ (рис. 6.14, в), в котором B_L — реактивная проводимость ветви с индуктивностью B_C — реактивная проводимость ветви с емкостью.

Из этого треугольника следует, что

$$Y = \sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (B_L - B_C)^2},$$

то есть полная проводимость равна корню квадратному из суммы

квадратов результирующих активных и реактивных проводимостей. Общий ток в неразветвленном участке

$$I = UY = U\sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (B_L - B_C)^2}. \quad (6.70)$$

Угол сдвига тока I относительно напряжения U может быть найден из треугольника проводимостей по значению тангенса:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{B_L - B_C}{G_1 + G_2}.$$

Резонанс токов. Рассмотрим случай, когда $B_L = B_C$, $\operatorname{tg} \varphi = 0$ и угол $\varphi = 0$. Практически этого можно достигнуть, если параллельно первым двум ветвям дополнительно подключить конденсатор C' (рис. 6.14, а) такой емкости, чтобы сила емкостного тока в новой ветви $I_C = I_p$. Тогда реактивный индуктивный и реактивный емкостный токи полностью скомпенсируют друг друга. В общей ветви, как видно из векторной диаграммы, будет протекать только ток

$$I' = I_{a1} + I_{a2},$$

то есть лишь активный ток.

Из формулы (6.70) общий ток

$$I = U\sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (0)^2} = U(G_1 + G_2) = UG.$$

Явление, которое возникает в подобном случае, носит название *резонанса токов*. При резонансе токов оказываются равными реактивные индуктивная Q_L и емкостная Q_C мощности, так как

$$Q_L = U^2 B_L \text{ и } Q_C = U^2 B_C.$$

Из рисунков 6.6, з и 6.10, з, видно, что в отрезке времени, когда мгновенное напряжение возрастает от нуля до максимального как положительного, так и отрицательного значений, мгновенная мощность в цепи с индуктивностью (рис. 6.6, з и 6.10, з, полупериоды II и IV) имеет отрицательное значение, а в цепи с емкостью (рис. 6.10, з, полупериоды I и III) — положительное значение, то есть цепь с индуктивностью в этот момент отдает энергию в сеть, а цепь с емкостью потребляет энергию, поскольку конденсаторы заряжаются.

Таким образом, при резонансе токов наблюдается колебательный процесс перехода энергии магнитного поля индуктивности в энергию электрического поля конденсатора и обратно, а энергия от источника расходуется только в сопротивлениях R_1 и R_2 .

Явление компенсации реактивной мощности используют для улучшения коэффициента мощности $\cos \varphi$ в электроустановках.

6.12. УБЫТКИ ОТ НИЗКОГО $\cos \varphi$ И КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Коэффициент активной мощности и потери энергии. В наиболее распространенных приемниках электрической энергии — асинхронных двигателях, трансформаторах, сварочных аппаратах и других — реактивный

ток является индуктивным и его вектор отстает по фазе от вектора напряжения. Он необходим для создания вращающегося магнитного поля у электрических машин и переменного магнитного потока трансформаторов.

Коэффициент мощности в сетях с чисто активной нагрузкой $\cos \varphi = 1$ (лампы накаливания, нагревательные приборы); в сетях со смешанной нагрузкой (двигатели и лампы накаливания с преобладанием мощности последних) $\cos \varphi$ обычно составляет 0,95...0,98; в сетях с преобладанием силовой нагрузки он может снизиться до 0,8...0,7, а иногда и до 0,4...0,3.

Коэффициент мощности особенно сильно уменьшается при работе двигателей и трансформаторов вхолостую или при большой недогрузке.

Если в сети есть индуктивный ток, мощности генераторов, трансформаторных подстанций и сетей используются не полностью. С уменьшением $\cos \varphi$ значительно возрастают потери энергии на нагрев проводов и обмоток электрических аппаратов.

Например, если активная мощность, оставаясь постоянной, обеспечивается током 100 А при $\cos \varphi = 1$, то с понижением $\cos \varphi$ до 0,8 и той же мощности сила тока I в сети возрастает в 1,25 раза ($I_a = I \cos \varphi$, $I = I_a / \cos \varphi = 100 / 0,8 = 125$ А). Потери на нагрев проводов сети и обмоток генератора (трансформатора) $P_{\text{нагр}} = I^2 \cdot R_c$ пропорциональны квадрату тока, то есть они увеличиваются в $1,25^2 = 1,56$ раза. При $\cos \varphi = 0,5$ сила тока в сети при той же активной мощности $I = 100 / 0,5 = 200$ А, а потери в сети возрастают уже в 4 раза (!). Повышаются потери напряжения в сети, что нарушает нормальную работу других потребителей. Счетчик потребителя во всех случаях отсчитывает одно и то же количество расходуемой активной энергии в единицу времени, но в последнем случае генератор дает в сеть ток, сила которого в 2 раза больше, чем в первом. Нагрузка же генератора (тепловой режим) определяется не активной мощностью потребителей, а полной мощностью (в киловольт-амперах), то есть произведением напряжения на силу тока, протекающего по обмоткам.

Следует помнить и о том, что при низком $\cos \varphi$ потери в сети могут стать недопустимо большими, что вызовет необходимость замены существующих проводов проводами увеличенной площади сечения, то есть приведет к перерасходу дорогостоящего металла и средств.

Повышение $\cos \varphi$. Для повышения $\cos \varphi$ электрических установок, то есть уменьшения угла φ сдвига фаз между током и напряжением, применяют ряд мер: 1) заменяют мало загруженные двигатели двигателями меньшей мощности; 2) понижают напряжение на обмотках мало нагруженных двигателей; 3) выключают двигатели и трансформаторы, работающие на холостом ходу; 4) включают в сеть специальные компенсирующие устройства, являющиеся генераторами опережающего (емкостного) тока. В последнем случае на мощных районных подстанциях устанавливают *синхронные компенсаторы* — синхронные перевозбужденные электродвигатели, а также используют конденсаторы для индивидуальной или групповой компенсации.

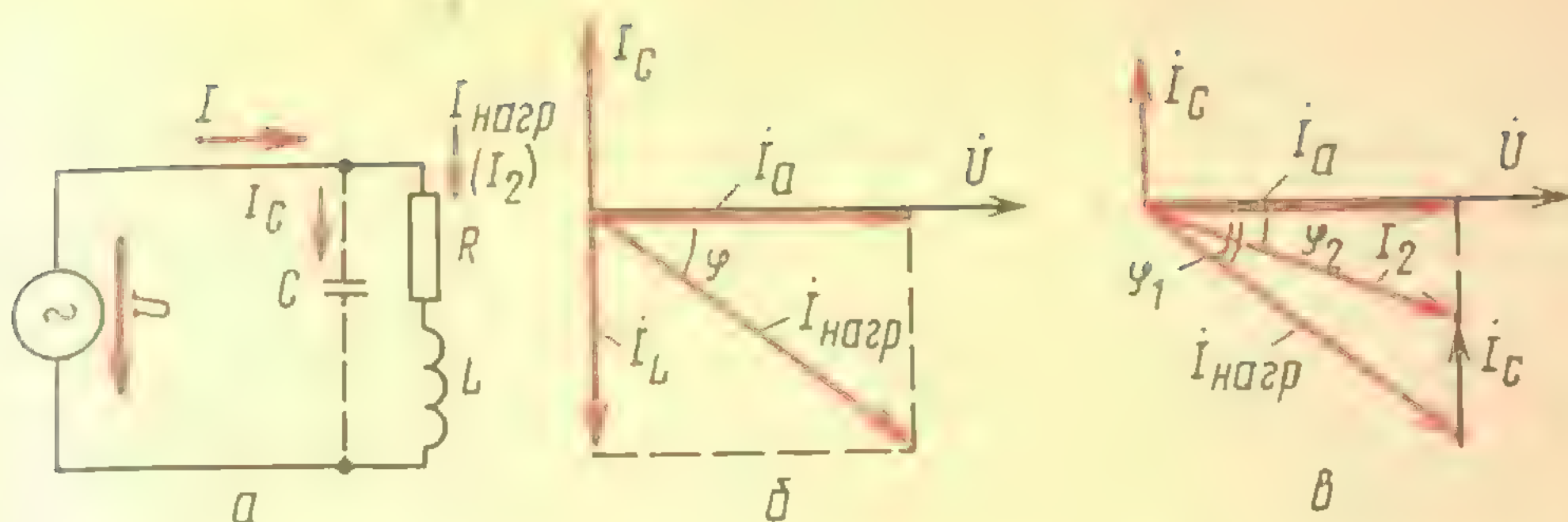


Рис. 6.15. Включение конденсатора для компенсации реактивной мощности (улучшения $\cos \varphi$):
 а — схема; б — векторная диаграмма полной компенсации; в — векторная диаграмма частичной компенсации.

Выбор емкости конденсаторов для компенсации реактивной мощности можно пояснить при помощи схемы, изображенной на рисунке 6.15, а, где нагрузка, состоящая из R и L , вызывает угол φ сдвига фаз между напряжением и током.

Для компенсации угла сдвига фаз включают емкость C (группу конденсаторов) параллельно нагрузке. Полная компенсация (доведение φ до 0° , а $\cos \varphi$ до 1) будет достигнута (рис. 6.15, б), если емкостный ток через конденсаторы будет равен индуктивному, то есть

$$I_C = I_L,$$

$$I_L = I_{\text{нагр}} \sin \varphi.$$

Емкостный ток

$$I_C = U / X_C = \omega C U,$$

где U — напряжение сети, В; ω — угловая частота переменного тока, равная $2\pi f = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 314$; C — емкость конденсаторов, Ф.

Отсюда емкость компенсирующих устройств (конденсаторов)

$$C = \frac{I_C}{\omega U} = \frac{I_{\text{нагр}} \sin \varphi U}{\omega U U} = \frac{S \sin \varphi}{\omega U^2} = \frac{P \tan \varphi}{\omega U^2}. \quad (6.71)$$

Если необходима частичная компенсация сдвига фаз (рис. 6.15, в), то емкостный ток

$$I_C = I_a \tan \varphi_1 - I_a \tan \varphi_2 = \frac{P}{U} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = U \omega C,$$

откуда

$$C = \frac{P}{\omega U^2} (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2). \quad (6.72)$$

где P — активная мощность нагрузки, Вт.

Пример 6.7. Освещение в помещении выполнено люминесцентными лампами ЛБ-40 (мощность лампы 40 Вт, потребляемая из сети лампой и дросселем мощность 50 Вт). В цепи такой лампы $\cos \varphi = 0,5$. Напряжение сети $U = 220$ В. Определить емкость конденсатора для компенсации реактивной мощности в цепи каждой лампы.

Определяем значение $\operatorname{tg}\varphi$:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{\sqrt{1 - \cos^2\varphi}}{\cos\varphi} = \frac{\sqrt{1 - 0,5^2}}{0,5} = \frac{\sqrt{0,75}}{0,5} = \frac{0,866}{0,5} = 1,73$$

Определяем емкость конденсатора:

$$C = \frac{P \operatorname{tg}\varphi}{\omega U^2} = \frac{50 \cdot 1,73}{314 \cdot 220^2} = \frac{86,5}{15,2 \cdot 10^4} = 5,7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$$

или 5,7 мкФ.

Выбираем конденсатор емкостью 4 мкФ или 6 мкФ серии Д11, предназначенной для пускорегулирующих аппаратов люминесцентных ламп при 50 и 60 Гц. Диэлектриком здесь служит полипропиленовая пленка.

Коэффициент реактивной мощности. Поскольку компенсация реактивной мощности имеет большое народнохозяйственное значение, она поощряется применением шкалы скидок с тарифа на электроэнергию. При этом энергоснабжающая организация определяет наиболее целесообразную для энергосистемы реактивную мощность для каждого крупного потребителя в часы максимума нагрузок в энергосистеме. Эта разрешаемая реактивная мощность характеризуется коэффициентом реактивной мощности

$$\operatorname{tg}\varphi_s = Q_s / P_m,$$

где P_m — заявленная потребителем (договором с энергосистемой) мощность, участвующая в максимуме нагрузки энергосистемы, кВт.

Между $\cos\varphi$ и $\operatorname{tg}\varphi$ имеется следующее соотношение:

$\cos\varphi$	1,00	0,99	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9
$\operatorname{tg}\varphi$	0	0,14	0,20	0,25	0,29	0,33	0,36	0,40	0,43	0,45	0,48

Реактивная мощность в процентах от активной составляет $Q\% = 100 \operatorname{tg}\varphi$.

Скидки и надбавки на тариф формируются следующим образом. Если, например, потребителю установлен экономический $\operatorname{tg}\varphi_s = 0,3$ и он его обеспечивает в часы максимума нагрузки в системе, то он получает скидку в размере 5% от тарифа. Если же $\operatorname{tg}\varphi_s$ равен 0,4 или 0,1, то скидка составляет лишь 1%. За $\operatorname{tg}\varphi_s = 0,5$ и более начисляются возрастающие надбавки к тарифу. А при $\operatorname{tg}\varphi_s = 0,45$ или 0,15 скидка не выплачивается. В последнем случае скидку не выплачивают по той причине, что затраты на компенсацию реактивной мощности становятся технико-экономически неоправданными.

Контрольные вопросы и задания к главе 6. 1. Каково соотношение между периодом и частотой тока? 2. Как формируется синусоидальный переменный ток в модели генератора? 3. Дайте определение и покажите графически мгновенное, амплитудное (максимальное) и действующее значения ЭДС, тока, напряжения. 4. Какой характер носит ток в цепях с активной, индуктивной и емкостной нагрузками, при синусоидальной ЭДС? 5. Объясните физическую сущность активного и реактивного тока. 6. Как определить полное сопротивление цепи с активной, индуктивной и емкостной нагрузками? 7. Напишите выражение закона Ома для цепей с активной, индуктивной и емкостной нагрузками, а также для цепи со смешанной нагрузкой, включенной последовательно или параллельно. 8. Дайте определение коэффициенту мощности для различных видов нагрузки. 9. Покажите на векторной диаграмме, как определить КПД и коэффициент мощности нагрузки. 10. Объясните явление резонанса напряжений и резонанса токов. 11. Каково различие между коэффициентами активной и реактивной мощности? 12. Расскажите о компенсации реактивной мощности.

7.1. ГЕНЕРИРОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Система трехфазного переменного тока была предложена в 1888 г. выдающимся русским электротехником М. О. Доливо-Добровольским. Основное преимущество трехфазного тока перед однофазным заключается в простоте получения вращающегося магнитного поля, использование свойств которого лежит в основе принципа действия и конструкции широко применяемых трехфазных электрических машин — асинхронных и синхронных двигателей и генераторов.

Система трехфазного тока, кроме того, дает экономию материала проводов линий передач. В самом деле, мощность при однофазном токе $P_{1\phi} = UI \cos \varphi$ передается по двум проводам, а мощность при трехфазном токе $P_{3\phi} = \sqrt{3} UI \cos \varphi$ — по трем проводам. То есть увеличение мощности в $P_{3\phi} / P_{1\phi} = \sqrt{3} = 1,73$ раза (на 73%) требует увеличения общей площади сечения проводов в $3/2 = 1,5$ раза (на 50%).

Ранее при рассмотрении принципиальной схемы генератора переменного тока было принято, что проводник вращается в неизменяющемся ни по значению, ни по направлению магнитном поле. Но в конечном счете совершенно безразлично, перемещается ли проводник в стационарном (не меняющемся) магнитном поле или магнитное поле перемещается относительно неподвижного проводника. Значит, в реальном генераторе магнит можно расположить на *роторе* и вращать его, а обмотку, в которой индуцируется ЭДС, разместить на *статоре* — неподвижной части машины. Тогда полученный переменный ток можно отводить в сеть непосредственно, то есть обойтись без недостаточно надежного скользящего контакта кольца-щеткой, что является существенным улучшением конструкции генератора переменного тока.

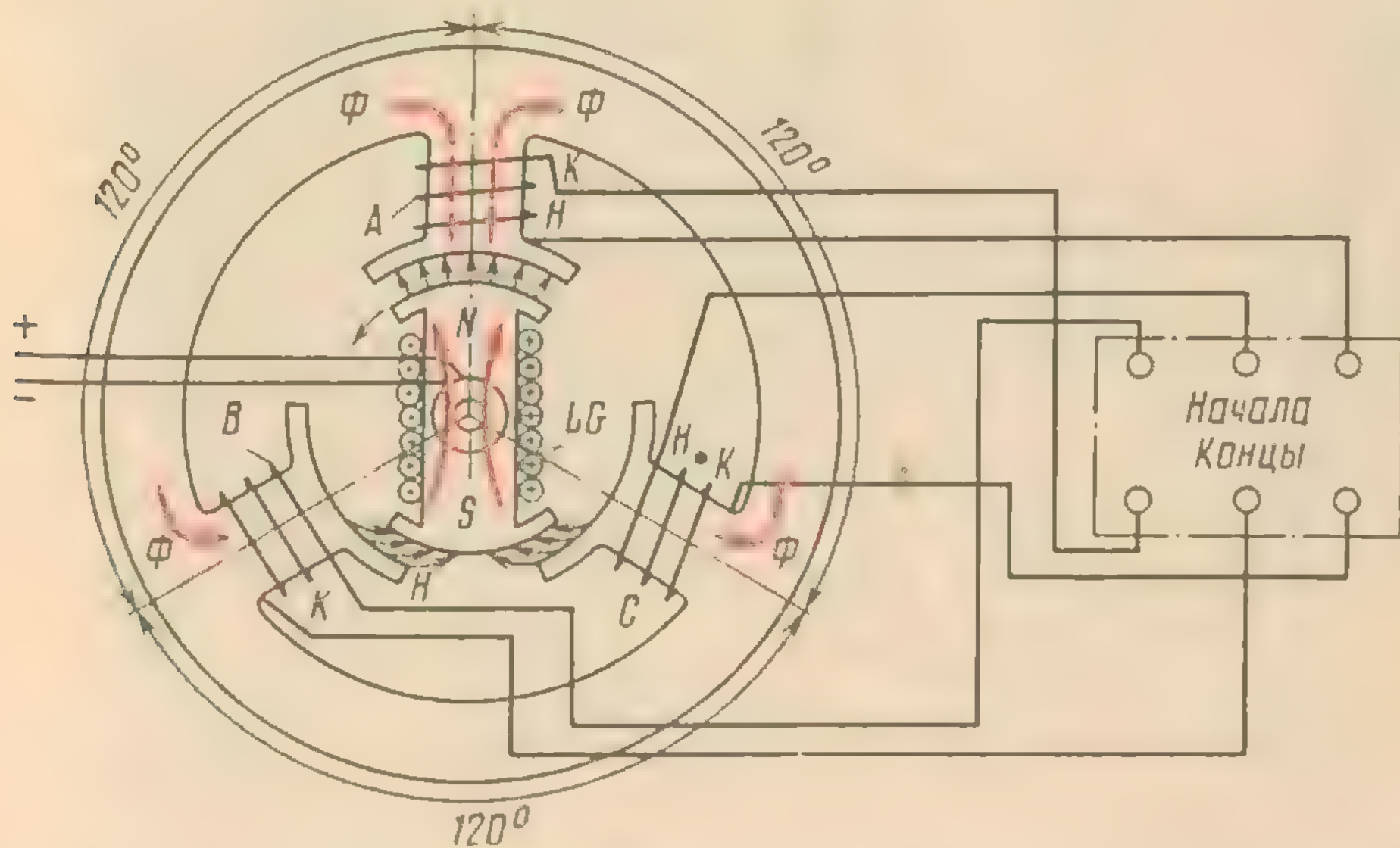


Рис. 7.1. Принципиальная схема генератора трехфазного тока:

A, B, C — статорные обмотки — фазы (якорь); LG — обмотка вращающегося электромагнита (индуктора); H и K — начала и концы обмоток.

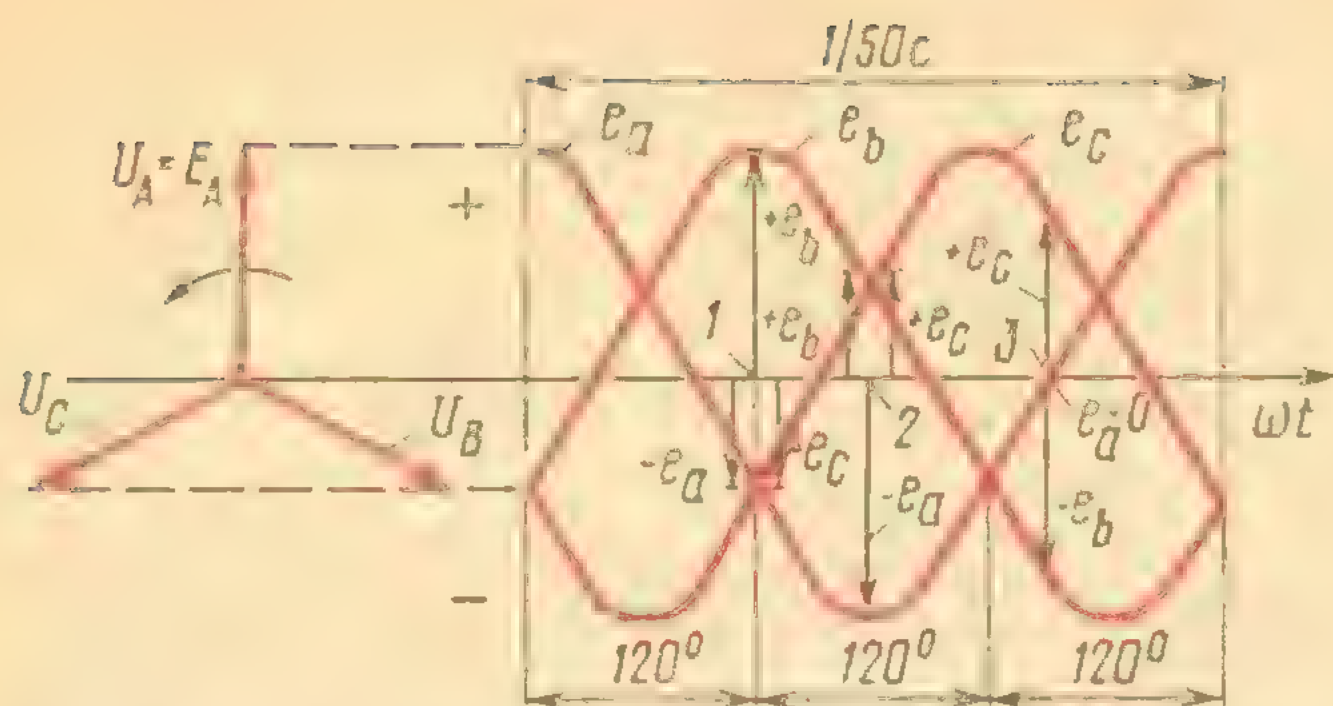


Рис. 7.2. Совместная диаграмма ЭДС e_A , e_B , e_C , генерируемых в трех фазах A , B , C обмоток генератора.

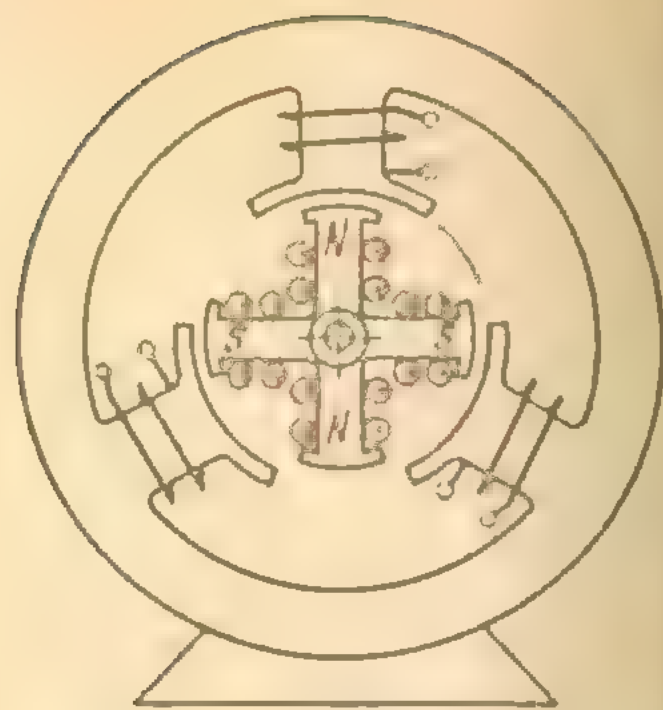


Рис. 7.3. Схема устройства генератора при числе пар полюсов $p=2$.

Для усиления магнитного поля на роторе размещают обмотку и через два кольца и щетки подводят к ней постоянный ток от аккумуляторов, выпрямителей или от небольшого по мощности в сравнении с мощностью основного генератора дополнительного генератора постоянного тока.

На рисунке 7.1 приведена принципиальная схема генератора трехфазного переменного тока. На статоре расположены три обмотки. В каждой индуцируется однофазный ток, который может быть использован независимо от токов, получаемых в других обмотках. Но в этом случае на каждую обмотку генератора надо два провода, то есть всего шесть проводов. Эти обмотки принято называть *фазами*: фаза A , фаза B , фаза C . Они сдвинуты по отношению одна к другой на 120° . При вращении электромагнита LG в обмотках статора индуцируются равные по значению и частоте ЭДС. Но эти ЭДС сдвинуты одна относительно другой на 120° . Например, положительный максимум ЭДС (наводимый силовыми линиями, исходящими из северного полюса) в фазе A возникнет в момент, показанный на рисунке 7.1. Положительный максимум ЭДС в фазе B будет наведен в тот момент, когда ротор повернется на угол 120° , а в фазе C — на угол 240° и т. д. (рис. 7.2).

Частота f колебаний ЭДС связана с частотой n вращения ротора и числом пар полюсов p формулой $f = \frac{np}{60}$.

Для генератора, показанного на рисунке 7.1, $p=1$. Чтобы получить частоту $f=50$ Гц, нужно вращать ротор с частотой

$$n = \frac{60f}{p} = \frac{50 \cdot 60}{1} = \frac{3000}{1} = 3000 \text{ мин}^{-1}.$$

На рисунке 7.3 изображена схема генератора, у которого число пар полюсов $p=2$. В этой машине за один оборот ротора в каждой обмотке (фазе) статора совершается два полных колебания ЭДС.

Чтобы частота в сети составила $f=50$ Гц, ротор должен вращаться с частотой

$$n = \frac{3000}{p} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ мин}^{-1}.$$

Направление индуцируемой ЭДС в каждый момент определяют по правилу правой руки.

На доску зажимов генератора выводят три начала и три конца (см. рис. 7.1) фазных обмоток. Каждая пара H и K представляет собой отдельный источник переменного однофазного тока.

7.2. СОЕДИНЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ ТОКА

Если имеются два источника однофазного тока, каждый из которых дает 220 В, то их можно использовать или отдельно, как показано на рисунке 7.4, а, или, соединив их, как показано на рисунке 7.4, б. В первом случае необходимы четыре провода, а во втором случае только три, но потребитель получает в свое распоряжение два напряжения: 220 В и 440 В.

Таким образом, система, показанная на рисунке 7.4, б, имеет два существенных преимущества: три провода вместо четырех и два напряжения вместо одного.

Аналогичное, экономически целесообразное соединение мы можем использовать в системе трех однофазных токов, сдвинутых друг относительно друга и меняющихся по одному и тому же закону. В каждое мгновение алгебраическая сумма трех ЭДС равна нулю. Обратимся к диаграмме ЭДС, генерируемых в трех фазах (см. рис. 7.2). Для точки 1 (120°) ЭДС e_b в фазе B максимальна и положительна (направлена вверх от нулевой линии ординат). ЭДС в фазах A и C соответственно e_a и e_c имеют отрицательное значение, и каждая из них, как видно из рисунка, в 2 раза меньше по абсолютному значению, чем e_b . Складывая все три ЭДС, получим нуль. Аналогично для точки 2 ЭДС e_a в фазе A имеет максимальное отрицательное значение, а ЭДС e_b и e_c положительны, но их абсолютные значения в 2 раза меньше, чем абсолютное значение e_a . Складывая все три ЭДС, получаем в результате нуль. Для точки 3 ЭДС $e_a = 0$, а ЭДС e_b и e_c равны по значению, но противоположны по знаку. В сумме они дают нуль.

Тот же результат мы получим от геометрического сложения векторов трех ЭДС, если представим себе три однофазные ЭДС в виде звезды одинаковых по длине векторов $\vec{E}$, сдвинутых один относительно другого на угол 120° и вращающихся с частотой 50 с^{-1} . В каждый момент времени геометрическая сумма их будет равна нулю. К вектору $\vec{E}_b$ приложены вектор $\vec{E}_c$ и вектор $\vec{E}_a$, сумма их равна нулю (получился замкнутый треугольник) (рис. 7.5, а). Это положение векторов соответствует моменту 1 на диаграмме (см. рис. 7.2). Спроектировав на вертикальную ось все три вектора, получим картину ЭДС, ранее взятую из диаграммы для точки 1. Повернув векторы на угол

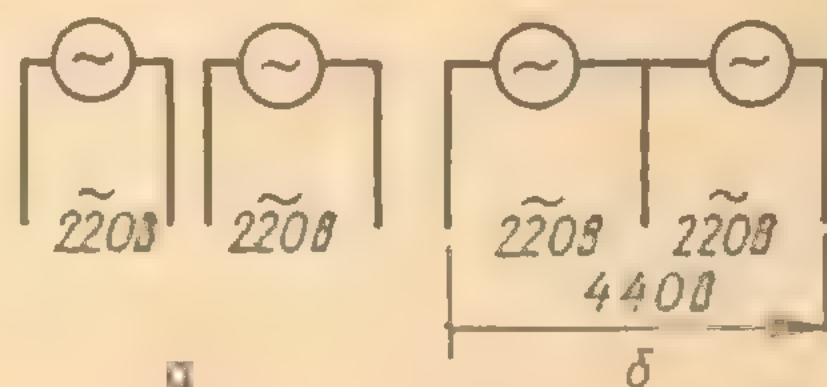


Рис. 7.4. Схемы передачи энергии от двух однофазных источников тока при помощи четырех (а) и трех (б) проводов.

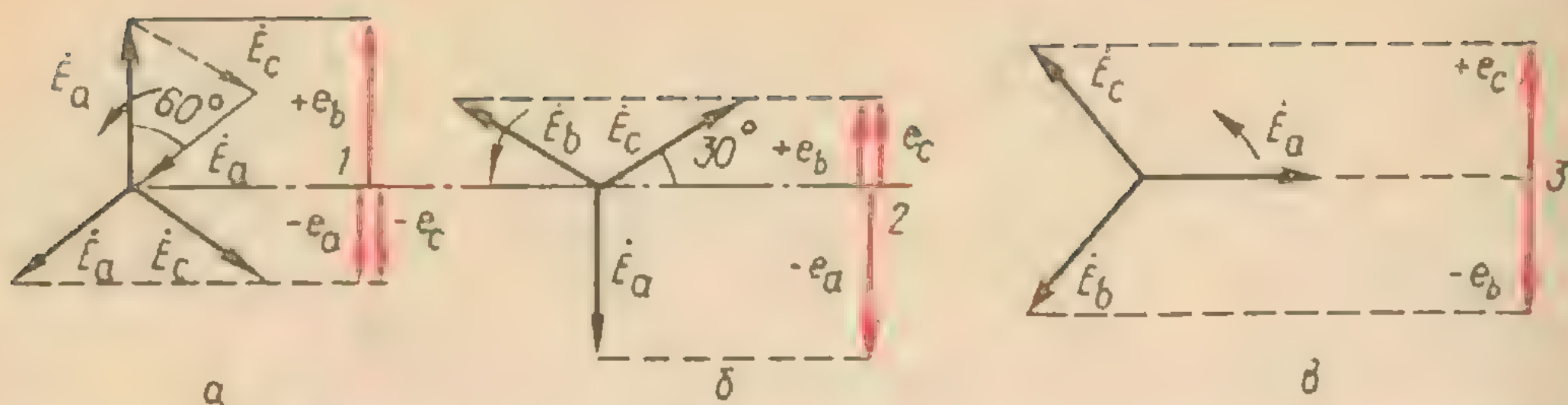


Рис. 7.5. Сложение векторов действующих (E) и мгновенных (e) значений ЭДС.

60° , придем к диаграмме векторов на рисунке 7.5, б. Их проекции на вертикальную ось повторяют картину ЭДС, взятую из диаграммы рисунка 7.2 для точки 2. Повернув звезду векторов еще на угол 90° , придем к диаграмме на рисунке 7.5, в, соответствующей картине значений ЭДС для точки 3 на диаграмме рисунка 7.2.

Аналогично будут изменяться и токи в трех фазах, если нагрузки на каждой из них равны между собой. И в каждый момент их алгебраическая сумма будет равна нулю. Если нагрузки в фазах активные, то звезда токов совпадает со звездой ЭДС (рис. 7.6, а). Когда в каждую фазу включено чисто индуктивное сопротивление, ток в каждой фазе отстает от ЭДС на 90° (рис. 7.6, б). Если нагрузка емкостная, токи в фазах опережают ЭДС на 90° (рис. 7.6, в).

Поскольку алгебраическая сумма токов в трех фазах

$$i_a + i_b + i_c = 0, \quad (7.1)$$

в каждый момент времени сумма токов в двух любых фазах равна по абсолютному значению, но противоположна по знаку току в третьей фазе. Следовательно, из равенства (7.1) можно заключить:

$$i_a = -i_b - i_c; i_a + i_b = -i_c; i_b + i_c = -i_a \text{ и т. д.} \quad (7.2)$$

То есть ток, который в любой момент вытекает из какой-либо фазы, равен сумме токов, возвращающихся в две другие фазы, и наоборот. Так, для точки 1 (см. рис. 7.2) ток в фазе В идет во внешнюю цепь, а по фазам А и С возвращается к источнику и т. д.

Рассмотренные выше зависимости между ЭДС (напряжениями) и

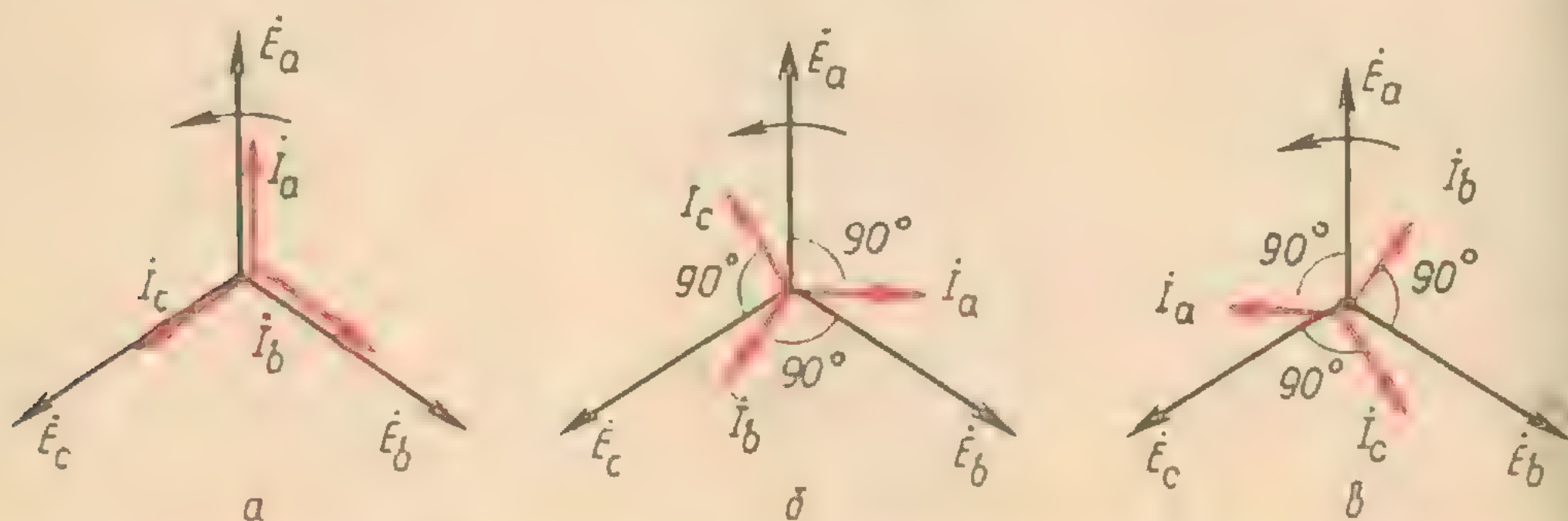


Рис. 7.6. Векторные диаграммы ЭДС и токов в трехфазной системе при активной (а), индуктивной (б) и емкостной (в) нагрузках.

токами для трехфазной системы позволяют соединять фазы в этих системах по специальным схемам, получившим название «звезда» и «треугольник».

7.3. СОЕДИНЕНИЕ ФАЗ ЗВЕЗДОЙ

На рисунке 7.7 приведена схема соединения фаз генератора звездой. Условное обозначение этой схемы γ . Концы K всех трех фаз объединяют в общую точку, называемую нейтральной (нулевой). Если от генератора отводят только три провода — A , B , C , то такую систему называют *трехфазной трехпроводной*. Если отводят также четвертый, *нейтральный*, провод N , то систему называют *трехфазной четырехпроводной*. Нейтральную точку генератора, а следовательно, и нейтральный провод заземляют. Ток в нейтральном проводе равен геометрической сумме действующих значений токов в трех фазах:

$$I_n = I_a + I_b + I_c. \quad (7.3)$$

Следовательно, ток в нейтральном проводе появляется только тогда, когда фазы нагружены неравномерно. По абсолютному значению ток I_n всегда меньше тока любой из фаз, если нагрузка включена во все фазы. Поэтому площадь сечения нейтрального провода принимают меньшей площади сечения фазных проводов.

Только в том случае, когда нагрузка включена между одной из фаз и нейтральным проводом, а к другим фазам нагрузка не подключена, ток в нагруженной фазе равен току в нейтральном проводе.

Напряжение между любой из фаз и нейтральным проводом называют *фазным* и обозначают символом U_ϕ . Оно равно напряжению между началом каждой из фаз и ее концом (рис. 7.8).

Напряжение между фазными проводами называют *линейным* и обозначают символом U . Оно равно геометрической разности двух фазных напряжений (рис. 7.7):

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Абсолютное значение линейного напряжения может быть определено из треугольника векторов ΔAC . Основание этого треугольника AC

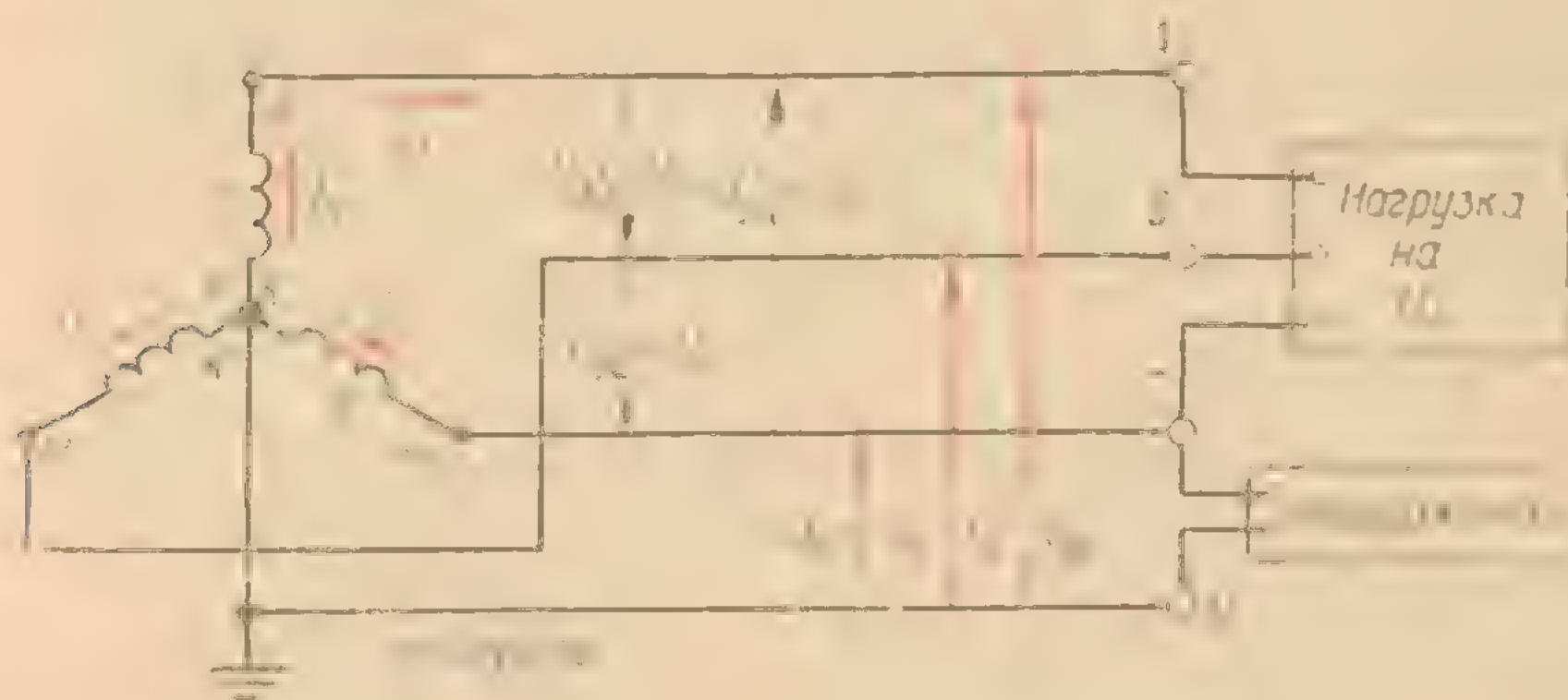


Рис. 7.7. Схема соединений обмоток генератора звездой.

равно линейному напряжению:

$$U_{\Delta} = U_{\phi} = 2 \sqrt{U^2 - \left(\frac{U_{\phi}}{2}\right)^2} = 2 \sqrt{\frac{3U_{\phi}^2}{4}} = \sqrt{3} U_{\phi} \quad (7.1)$$

то есть

$$U_{\Delta}/U_{\phi} = \sqrt{3}. \quad (7.2)$$

Таким образом, в трехфазной четырехпроводной системе образуется два напряжения: U_{ϕ} — фазное и U_{Δ} — линейное. Линейное напряжение больше, чем фазное, в $\sqrt{3} = 1,73$ раза. Ток I_{Δ} в линейном проводе равен по значению и направлению току I_{ϕ} в фазной обмотке.

Принятые в нашей стране стандартные значения напряжений потребителей сетей приведены в таблице 7.1. Как видно из таблицы, напряжение источника электроснабжения (генератора или вторичной стороны трансформатора) берут всегда на 5% больше номинального сетевого напряжения с учетом того обстоятельства, что до 5% напряжения будет потеряно в трансформаторе (генераторе) и в линии. А к установкам потребителей необходимо подать электроэнергию номинального напряжения.

В сельском хозяйстве наибольшее распространение получила трехфазная четырехпроводная система 380/220 В, то есть система с линейным $U_{\Delta} = 380$ В и фазным $U_{\phi} = 220$ В напряжениями. Три фазы с напряжением между ними 380 В используют для питания электрических двигателей и трехфазных нагревательных приборов, а напряжение между фазой и нейтральным проводом 220 В — для питания источников света и бытовых электроприборов. Напряжение 220/127 В применяется там, где осталось старое оборудование на данное напряжение или преобладает осветительная нагрузка.

Напряжение 36 В применяется для стационарного местного освещения и ручных переносных ламп в помещениях с повышенной опасностью. Но при особо неблагоприятных условиях в отношении опасности поражения током (при работе в резервуарах, котлах, в силосных башнях) для ручных переносных ламп применяется напряжение 12 В.

В связи с ростом единичной и средней мощности электроприемников и ростом производственных площадей, а следовательно,

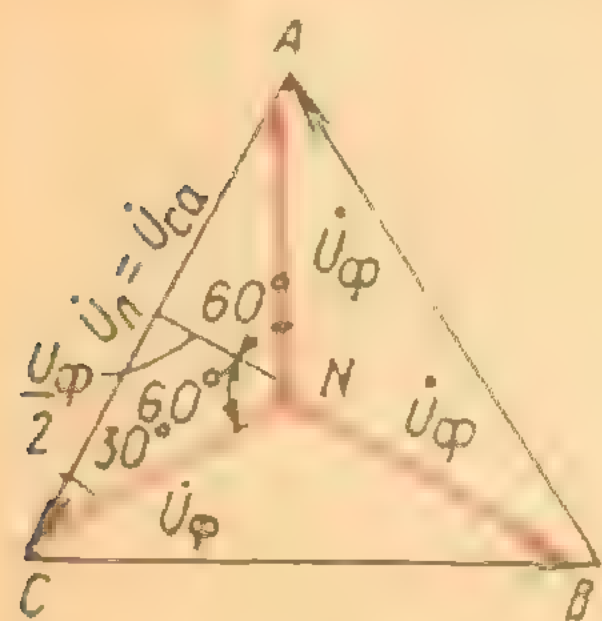


Рис. 7.8. Диаграмма линейных и фазных напряжений при соединении фаз звездой.

и увеличением протяженности внутренних проводов в стандарт наряду с напряжением 380 В введено напряжение 660 В, равное $\sqrt{3} \cdot 380$. Это позволяет применять одни и те же двигатели, соединяя их обмотки в треугольник при 380 В в сети или в звезду при 660 В в сети. Это облегчает внедрение напряжения 660 В. Пропускная же способность сети при напряжении 660 В выше в $\sqrt{3}$ раза, чем при 380 В, а потери электроэнергии в сети при одном и том же расходе металла на провода ниже в 3 раза. Улучшается также качество напряжения, упрощается схема и возрастает надежность электроснабжения.

Стандартные напряжения в потребительских сетях

Номинальные напряжения сетей и приемников энергии $U_n / U_{\text{н}}$, В	Напряжения на зажимах генераторов $U_n / U_{\text{ф}}$, В	Напряжения первичных обмоток повышающих трансформаторов U_n , В	Напряжения вторичных обмоток понижающих трансформаторов $U_n / U_{\text{ф}}$, В
220 / 127	230 / 133	220	230 / 133
380 / 220	400 / 230	380	400 / 230
660 / 380	690 / 400	660	690 / 400

Электрические установки напряжением 660 В создают большую опасность прикосновения к токоведущим частям, чем установки напряжением 380 В. С этим фактором необходимо считаться, используя это напряжение лишь в тех электрических установках, где можно обеспечить гарантированную защиту от прикосновения к токоведущим частям электродвигателей. Поэтому не рекомендуется использовать напряжение 660 В в осветительных установках, где обеспечить гарантированную защиту от прикосновения к токоведущим частям трудно. Напряжение 660 В не допускается использовать в бытовых, административных и конторских помещениях.

7.4. СОЕДИНЕНИЕ ФАЗ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

При соединении фазных обмоток трехфазного генератора треугольником (условное обозначение Δ) начало H_1 первой фазы соединяют с концом K_2 второй, начало H_2 второй — с концом K_3 третьей, начало H_3 третьей — с концом K_1 первой (рис. 7.9).

Фазные обмотки генератора образуют замкнутый контур с малым внутренним сопротивлением. Но при симметричных ЭДС (равных по величине, сдвинутых на одинаковый угол одна относительно другой) в фазах и при отключенной внешней цепи ток в этом контуре равен нулю, так как сумма трех симметричных ЭДС в любой момент времени нулю. При таком соединении напряжения между линейными проводами равны напряжениям на фазных обмотках:

$$U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = U_{\text{ф}}.$$



Рис. 7.9. Схема соединения обмоток генератора треугольником.

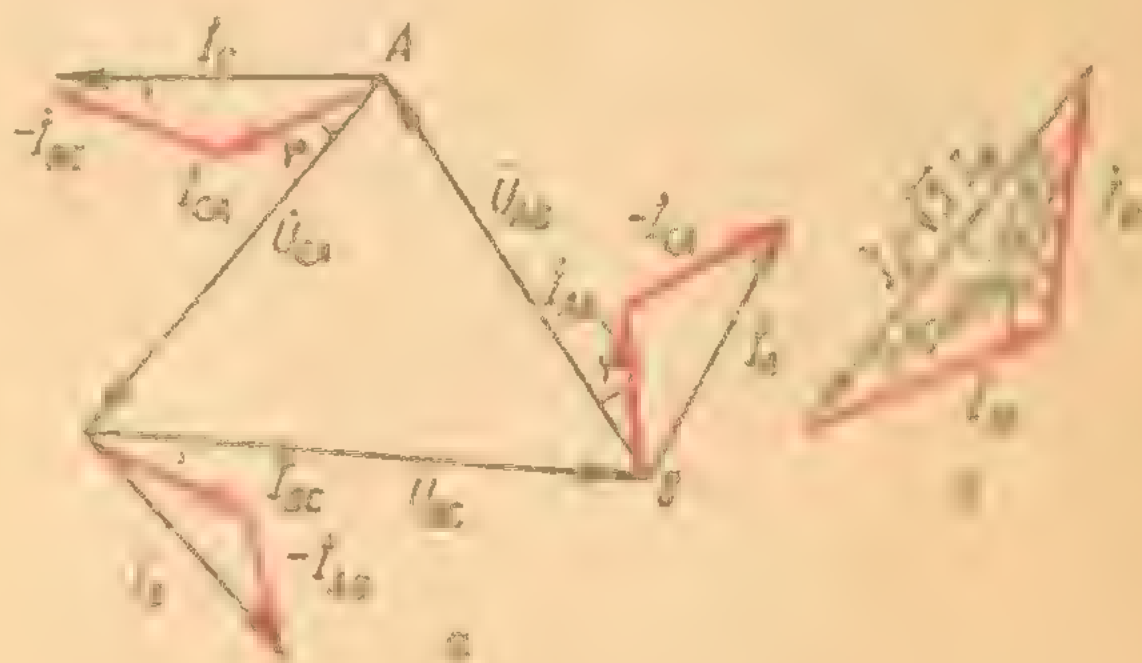


Рис. 7.10. Векторная диаграмма токов и напряжений при соединении фаз треугольником (а); к определению отношения линейного и фазного токов (б).

Если все три фазы генератора нагружены совершенно одинаково то по линейным проводам проходят равные токи. Каждый из этих линейных токов есть результат геометрической суммы токов в двух смежных фазах. Так, вектор линейного тока I_L равен геометрической разности векторов в фазах I_{CA} и I_{BA} (рис. 7.10, а). Векторы фазных токов сдвинуты один относительно другого на угол 120° (рис. 7.10, б).

Из рисунка 7.10, б следует, что абсолютное значение линейного тока

$$I_L = I_\phi \cos 30^\circ + I_\phi \cos 30^\circ = 2I_\phi \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} I_\phi. \quad (7.6)$$

7.5. ВКЛЮЧЕНИЕ НАГРУЗКИ В ТРЕХФАЗНУЮ СЕТЬ

Трехфазную нагрузку, как и обмотки генератора, можно включать в звезду и треугольник.

Так, трехфазные электрические двигатели рассчитаны на соединение обмоток в зависимости от напряжения сети звездой или треугольником.

Если в сети нет нейтрального провода и, таким образом, потребитель имеет в своем распоряжении три линейных напряжения, можно искусственно создать фазные напряжения. Для этой цели три одинаковых сопротивления (нагрузки) включают в сеть по схеме «звезда». Каждая из этих нагрузок окажется включенной на фазное напряжение (рис. 7.11):

$$U_\phi = U_L / \sqrt{3}.$$

Соединение обмоток генератора по схеме «треугольник» применяют главным образом на передвижных электростанциях небольшой мощности с ограниченной по протяженности сетью (например, для питания электростригальных агрегатов и др.).

В четырехпроводной трехфазной системе нейтральный провод надежно заземлен на электростанции, на ответвлениях сети и через определенные расстояния по линии. Этот провод используется для заземления металлических корпусов токоприемников у потребителя (см. гл. 29).

На рисунке 7.12 приведена схема включения в трехфазную четырехпроводную сеть осветительной и силовой нагрузок. Осветительная

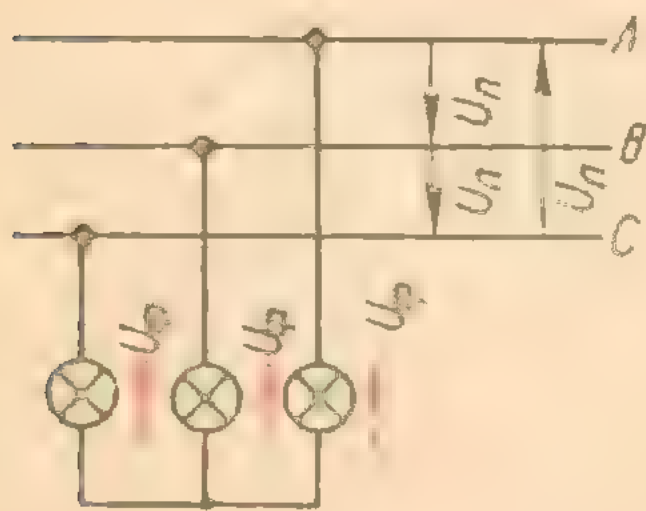


Рис. 7.11. Включение трех равных по сопротивлению приемников электроэнергии по схеме «звезда».

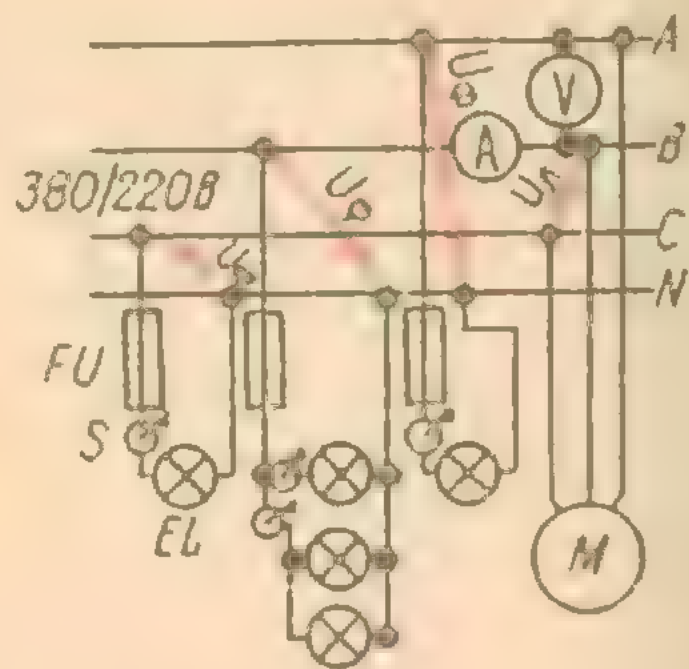


Рис. 7.12. Схема включения в трехфазную четырехпроводную сеть осветительных (220 В) и силовой (380 В) нагрузок.

нагрузка включена на фазное напряжение 220 В. Обычно стремятся равномерно загрузить однофазной нагрузкой все три фазы. С этой целью по одной улице населенного пункта для освещения прокладывают фазу с нейтральным проводом, по другой — вторую фазу и нейтральный провод, по третьей — третью и нейтральный провод и т. д. Сильную нагрузку (электродвигатели, трансформаторы), а также мощные нагревательные трехфазные приборы включают на линейное напряжение

7.6. МОЩНОСТЬ ТРЕХФАЗНОГО ТОКА

Мощность трехфазной системы равна сумме мощностей отдельных фаз. При симметричных и равных по значению напряжениях и токах

$$P = 3U_{\phi}I_{\phi}\cos\varphi, \quad (7.7)$$

где P — мощность трехфазной системы, Вт; U_{ϕ} — фазное напряжение, В; I_{ϕ} — фазный ток, А; φ — угол сдвига фаз напряжения и тока.

При соединении в звезду $I_{\phi} = I_{\text{л}}$, а $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\phi}$ или $U_{\phi} = U_{\text{л}}/\sqrt{3}$, и равенство (7.7) принимает вид:

$$P = 3\frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}I_{\text{л}}\cos\varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}\cos\varphi. \quad (7.8)$$

При соединении в треугольник

$$I_{\phi} = I_{\text{л}}/\sqrt{3} \quad \text{и} \quad U_{\text{л}} = U_{\phi}.$$

Аналогично

$$P = 3U_{\text{л}}\frac{I_{\text{л}}}{\sqrt{3}}\cos\varphi = \sqrt{3}U_{\text{л}}I_{\text{л}}\cos\varphi = \sqrt{3}UI\cos\varphi, \quad (7.9)$$

где U и I — значения напряжения и силы тока в сети, измеренные соответственно вольтметром, включенным между двумя линейными проводами, и амперметром, включенным в рассечку линейного провода.

Пример 7.1. Определить мощность генератора трехфазного тока, если линейное напряжение $U_{\text{л}} = 380$ В, линейный ток $I_{\text{л}} = 50$ А, а $\cos\varphi = 0,85$.

Решение. Искомая мощность $P = \sqrt{3} \cdot 380 \cdot 50 \cdot 0,85 = 28\,000$ Вт = 28 кВт.

Пример 7.2. Мощность на валу трехфазного электродвигателя $P_{\text{в}} = 11$ кВт, коэффициент полезного действия $\eta = 0,82$, коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,8$. Двигатель подключен к трехфазной сети напряжением $U = 220$ В. Определить ток, потребляемый электродвигателем из сети при полной нагрузке, напряжения, которые приложены к обмоткам двигателя, соединенным звездой.

Мощность, потребляемая двигателем из сети,

$$P = P_{\text{в}}/\eta = 11\,000/0,82 = 13\,500 \text{ Вт.}$$

Линейный ток

$$I_{\text{л}} = \frac{P}{\sqrt{3}U\cos\varphi} = \frac{13\,500}{\sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0,8} = 44 \text{ А}$$

Фазное напряжение

$$U_{\phi} = U_{\text{л}}/\sqrt{3} = 220/\sqrt{3} = 127 \text{ В.}$$

7.7. НЕСИММЕТРИЧНЫЕ СИСТЕМЫ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКОВ И ИХ НЕДОСТАТКИ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НЕСИММЕТРИЧНОЙ СИСТЕМЫ

Несимметрия напряжений и токов в трехфазной системе возникает по разным причинам и характеризует качество электроэнергии. Длительные эксплуатационные режимы несимметрии, например, напряжений, возникают от неравномерной нагрузки фаз. Кратковременные же несимметрии возникают при различных коротких замыканиях (см. п. 12.1). Всякую несимметричную систему можно представить состоящей из трех составляющих — прямой, обратной и нулевой последовательностей. При этом векторы прямой, или основной, последовательности вращаются против часовой стрелки, обратной — по часовой стрелке, а фазные векторы нулевой последовательности параллельны друг другу.

Существует аналитический и графический методы разложения несимметричной системы в симметричные составляющие. Если, например, система векторов $\dot{A}$, $\dot{B}$, $\dot{C}$ несимметрична (рис. 7.13), то вектор $\dot{A}_1$ прямой и вектор $\dot{A}_2$ обратной последовательностей находят по формулам

$$\dot{A}_1 = (\dot{A} + a\dot{B} + a^2\dot{C})/3, \quad \dot{A}_2 = (\dot{A} + a^2\dot{B} + a\dot{C})/3.$$

Здесь символ a является оператором поворота вектора на угол 120° против часовой стрелки, а умножение на a^2 соответствует повороту на 240° .

Вектор $\dot{A}_0$ нулевой последовательности $\dot{A}_0 = (\dot{A} + \dot{B} + \dot{C})/3$.

Несимметрия векторов $\dot{A}$, $\dot{B}$, $\dot{C}$ на рисунке 7.13 характерна для напряжений при двухфазном коротком замыкании (см. рис. 12.1). Их можно разложить на прямую и обратную последовательности. На рисунке 7.14 показаны симметричные составляющие других несимметричных систем.

Несимметрия фазных напряжений существенно влияет на работу осветительных и силовых установок. Так, в электродвигателях, кроме

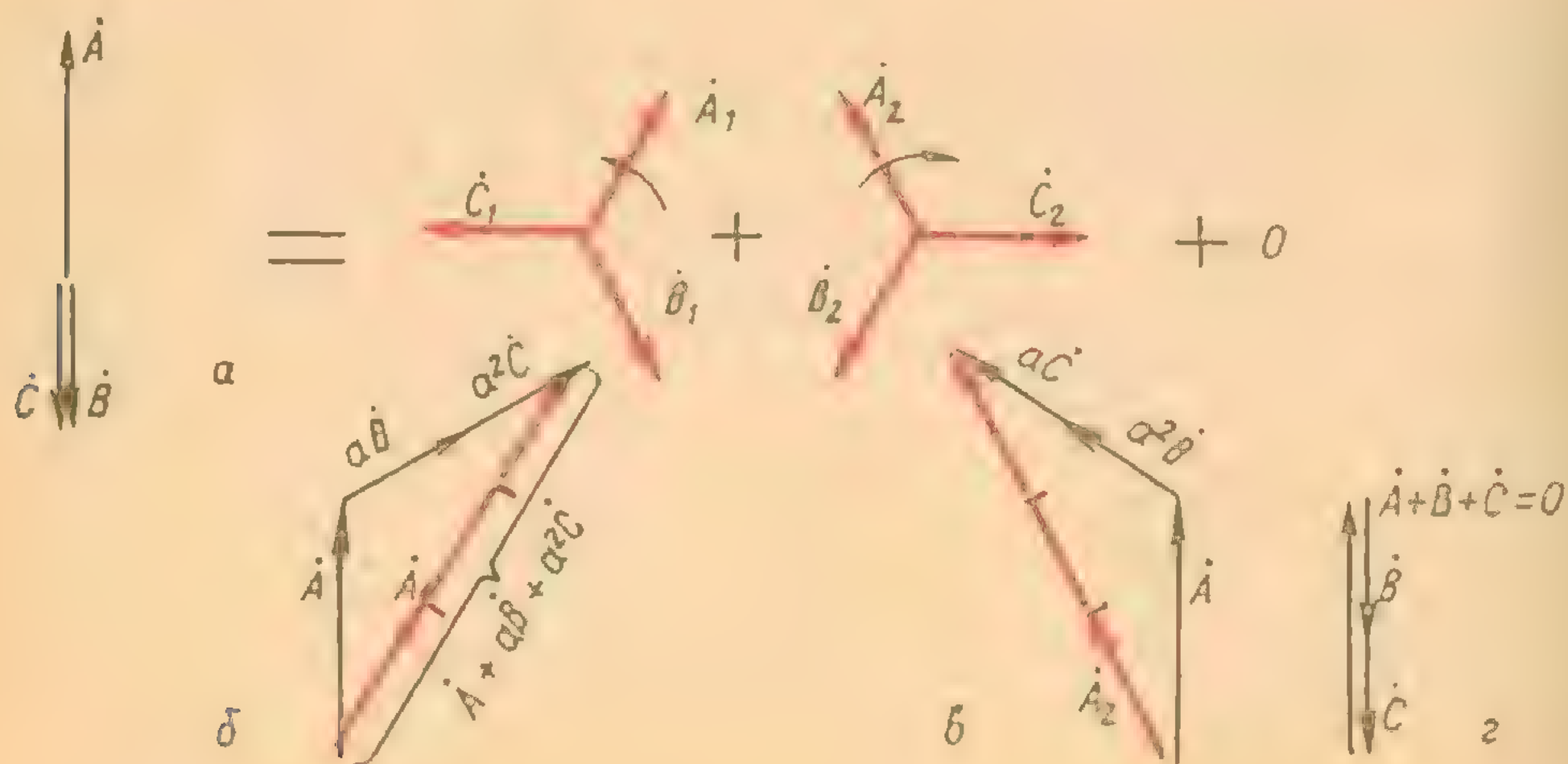
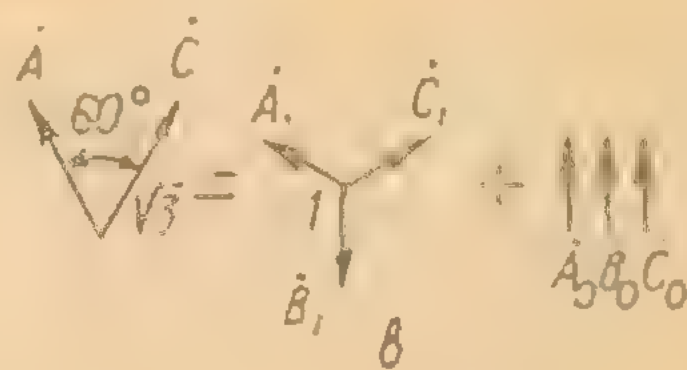
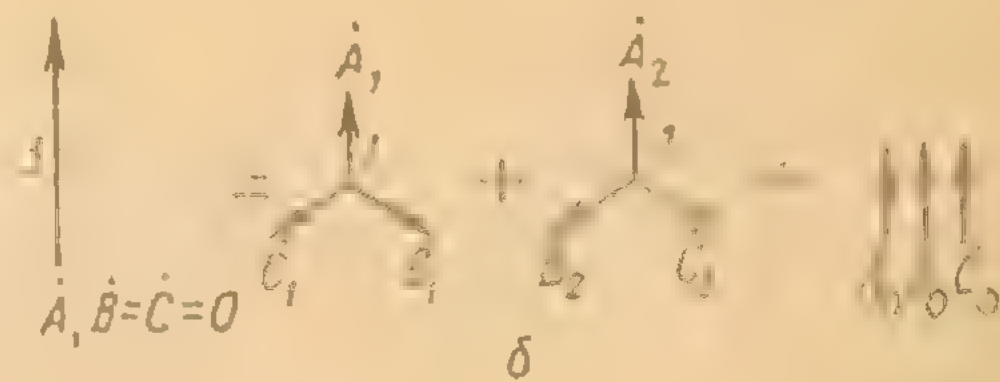
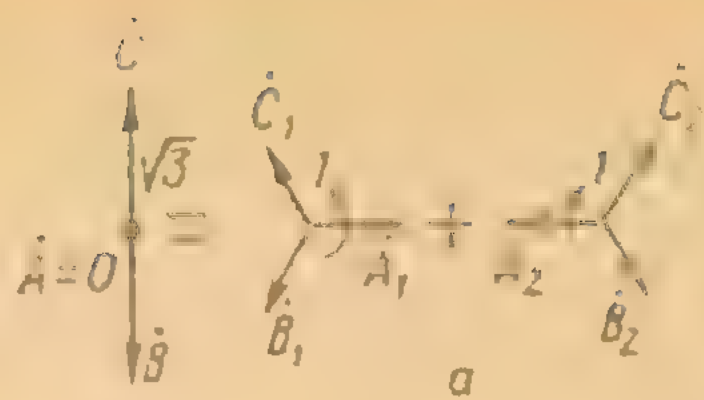


Рис. 7.13. Симметричные составляющие несимметричной трехфазной системы (а) и порядок нахождения последовательностей прямой (б), обратной (в), нулевой (г).

рис. 7.14. Симметричные составляющие различных несимметричных систем:

— токи двухфазного короткого замыкания, разложенные на симметричные составляющие токи прямой и обратной последовательностей; β — токи однофазного короткого замыкания, разложенные на трехфазные симметричные токи прямой, обратной и нулевой последовательностей; α — напряжение на трехфазной системе при однофазном замыкании, разложенное на симметричные напряжения прямой и нулевой последовательностей.



нормального вращающегося поля от прямой последовательности, появляется обратное поле, которое уменьшает вращающий момент и мощность двигателя, снижает его срок службы. Поэтому необходимо бороться с несимметрией в сетях. С этой целью применяют понижающие трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда — зигзаг», следят за равномерной нагрузкой фаз и используют другие меры.

7.8. ОБРЫВ НУЛЕВОГО ПРОВОДА И НАПРЯЖЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

Обрыв нулевого провода приводит к нарушению нормальной работы энергоприемников, работающих в отдельных фазах (в однофазном режиме). Так, если отношение мощностей в фазах составляет $S_A : S_B : S_C = 4 : 2 : 1$, то отношение полных сопротивлений составляет $Z_A : Z_B : Z_C = 1 : 2 : 4$, так как $S_A = U_{\phi}^2 / Z_A$. В нормальном режиме токи в фазах связаны соотношением $I_A : I_B : I_C = U_A / 1 : U_B / 2 : U_C / 4 = 4 : 2 : 1$. Если коэффициенты мощности в фазах равны, то можно графически найти и ток в нулевом проводе (рис. 7.15). Он будет равен геометрической сумме $I_N = I_A + I_B + I_C$. Если, например, $I_A = 40$ А, $I_B = 20$ А, $I_C = 10$ А, то, как следует из рисунка 7.15, б, $I_N = 25$ А.

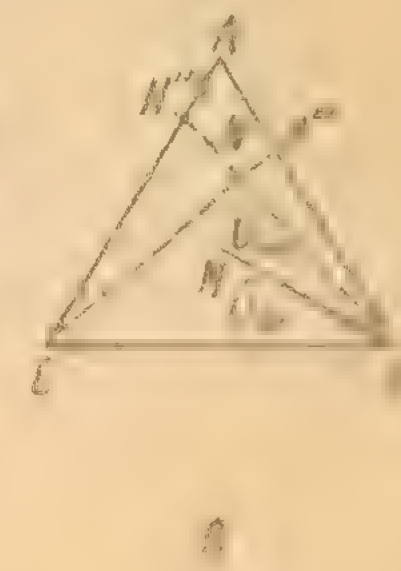
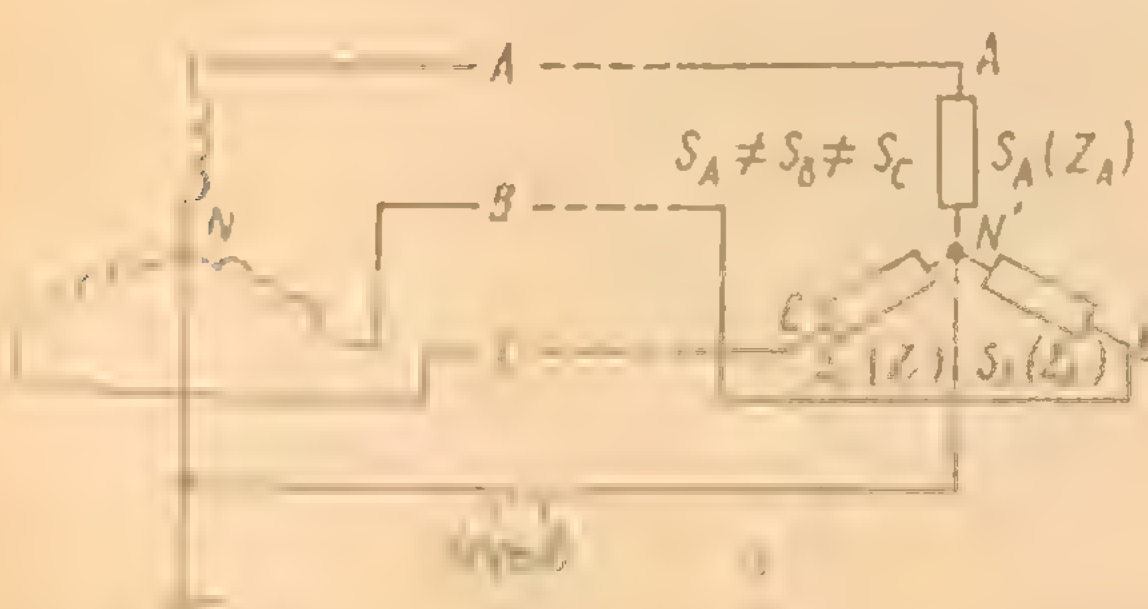


Рис. 7.15. Схема при несимметричной нагрузке (а), определение тока в исправном нулевом проводе (б), определение напряжения смещения нейтрали при обрыве нулевого провода (в).

При обрыве нулевого провода по первому закону Кирхгофа $I_A + I_B + I_C = 0$. Так как сопротивления нагрузки в фазах остались примерно теми же, что и до обрыва (их изменением от нагрева можно пренебречь), на каждом из этих сопротивлений будет новое значение фазного напряжения, зависящее от сопротивления фазы и тока в ней.

Для определения этих новых фазных напряжений можно также воспользоваться графическим способом. Проведем два опыта. Сначала заменим сопротивление Z_B на переменное сопротивление, значение которого можно изменять от 0 до бесконечности. Если $Z_B = 0$, то есть фаза B замкнута на нейтральную точку N , то эта точка будет совпадать с точкой B . Если же $Z_B = \infty$, что будет в случае обрыва фазы B , то точка N окажется на линии вектора напряжения $\vec{U}_B$ и поделит этот вектор на две части, пропорциональные значениям Z_A и Z_C . При всех промежуточных режимах, в том числе и при Z_B , эта точка будет лежать на траектории BN'' .

Теперь оборвем фазу C . Нейтраль сопротивлений окажется в точке N''' . Напряжения $U_{AN} : U_{BN} = Z_A : Z_B = 1 : 2$. При других режимах при изменении сопротивления в фазе C нейтраль нагрузки будет находиться на траектории CN''' . Место пересечения траекторий BN'' и CN''' будет искомой точкой N' . Напряжение между этой точкой и центром тяжести треугольника напряжений, который имеет потенциал земли [так как на подстанции (рис. 7.15, а) центр треугольника этих напряжений соединен с землей], носит название напряжения смещения нейтрали $U_{NN'}$. Это напряжение может оказаться между землей, на которой стоит человек или животное, и зануленным корпусом установки. Наиболее опасное его значение будет при обрыве нулевого провода в сети и отсутствии повторного заземления между установкой и местом обрыва. В нашем случае, сравнивая $U_{NN'}$ с фазным напряжением, найдем $U_{NN'} \approx \frac{2}{5} U_\phi$.

Напряжение смещения нейтрали может быть и при исправном нулевом проводе, но при значительной несимметрии нагрузки, когда по нулевому проводу протекает большой ток. В этом случае напряжение смещения нейтрали равно произведению этого тока на сопротивление нулевого провода до ближайшего заземления.

В связи с тем, что животные чрезвычайно чувствительны к напряжению (коровы, например, ощущают уже напряжение 2...4 В между ногами или мордой и ногами и снижают отдачу молока), для предотвращения вредного последствия этого воздействия применяют схемы заземлений с выравниванием потенциалов путем заложения в грунт у поверхности земли сеток из стального провода или шин (в коровниках, на доильных площадках и т. д.).

Контрольные вопросы и задания к главе 7. 1. Объясните преимущества системы трехфазного тока перед системой однофазного тока. 2. Как соединяются обмотки трехфазного генератора? 3. Покажите на векторной диаграмме соотношение между линейным и фазным напряжениями, а также между линейными и фазными токами. 4. Как определяется мощность трехфазной нагрузки? 5. Во сколько раз уменьшится потребляемая мощность, если трехфазную нагрузку переключить со схемы «треугольник» в схему «звезда»? 6. Покажите на схеме, как подключено питание и как подключаются однофазные и трехфазные потребители энергии к трехфазной, четырехпроводной системе. 7. Как возникает несимметрия напряжений и токов в трехфазных системах? 8.

Глава 8. ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ И ГРАФИКИ ИХ НАГРУЗКИ

8.1. ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ОТ ИСТОЧНИКОВ К ПОТРЕБИТЕЛЯМ

Энергосистемы. Электрическая энергия вырабатывается на электрических станциях, располагаемых, как правило, у источников первичной энергии. Электростанции связаны между собой и с потребителями электрическими сетями, которые объединяют их в *централизованно управляемые энергетические системы* (энергосистемы). Нагрузку на электростанции распределяют так, чтобы получить наиболее дешевую электроэнергию. Например, если запас воды на гидравлической станции (ГЭС) большой, то ее нагружают на полную мощность, а тепловую (ТЭС) разгружают, экономя топливо. Или же за счет ТЭС удовлетворяют постоянную (базисную) нагрузку в течение суток, а ГЭС включают в часы, когда нагрузка возрастает.

Благодаря энергосистемам не только повышается экономичность электроснабжения, но и значительно увеличивается его надежность, возрастает общая полезная выработка электроэнергии и т. д.

Электрическая система — это часть энергосистемы, объединяющая генераторы, распределительные устройства, трансформаторные подстанции, электрические линии и токоприемники электрической энергии.

Электрическая сеть — это часть электрической системы, в которую входят трансформаторные подстанции и линии различных напряжений. Электрические сети по назначению делят на распределительные и питающие.

Питающей называют электрическую сеть, по которой электроэнергию подводят к распределительным пунктам или районным трансформаторным подстанциям (рис. 8.1). Эта сеть состоит из линий электропередачи (ЛЭП), которые не имеют подключенных потребителей.

Высоковольтная распределительная сеть (ВРС) служит для передачи электрической энергии от источника (электростанции ЭС, районной трансформаторной подстанции РТП) к потребительским трансформаторным подстанциям ТП. Чаще для ВРС используют напряжение 10 кВ, реже (при больших расстояниях) — 20 и 35 кВ. Линии 6 кВ выполняют главным образом в тех случаях, когда системы с этим напряжением уже имеются или когда тщательный технико-экономический анализ показывает целесообразность применения именно 6 кВ.

Распределение энергии по потребителям осуществляется по *радиальным, магистральным (кольцевым) или смешанным* схемам. На рисунке 8.2 показаны радиальная одиночная разомкнутая линия, обычно

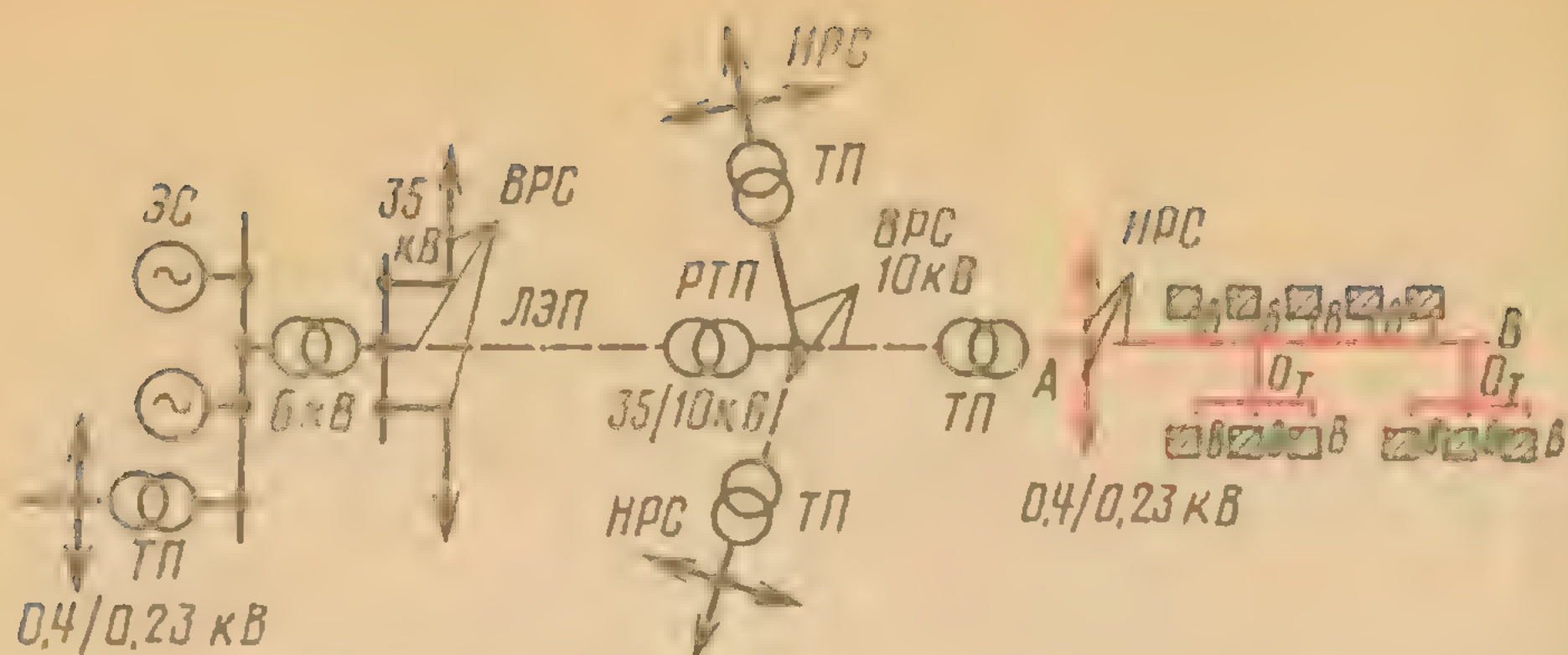


Рис. 8.1. Схема передачи электрической энергии от источника до потребителя:

ЭС — электростанция; ТП — потребительская трансформаторная подстанция 10/0,4 кВ; РТП — районная трансформаторная подстанция 35/10 кВ; ВРС и НРС — высоковольтные распределительные и потребительские сети 380/220 В; ЛЭП — линия электропередачи; От — отвод; В — ввод.

применяемая для питания отдельных, обособленных потребителей 3-й категории (а), радиальная сдвоенная кабельная линия для питания потребителей 2-й и 3-й категорий (б), радиальная, питаемая от двух самостоятельных источников линия, для потребителей 1-й категории (в) и две схемы магистральных петлевых линии для питания потребителей 3-й категории (г) и потребителей 2-й и 1-й категорий (д). Могут быть и другие видоизменения магистральных схем.

По распределительной сети (рис. 8.1) напряжением до 1000 В (НРС) электрическую энергию передают от понизительных подстанций к потребителям. Такие сети используют обычно внутри населенного пункта, по улице которого прокладывают линию АВ, а от нее к домам, расположенным на одной стороне улицы, идут вводы В, а к домам на другой стороне улицы — отводы От.

Сети могут быть воздушными или кабельными (подземными). Потребительские сети внутри помещений называют внутренними проводками.

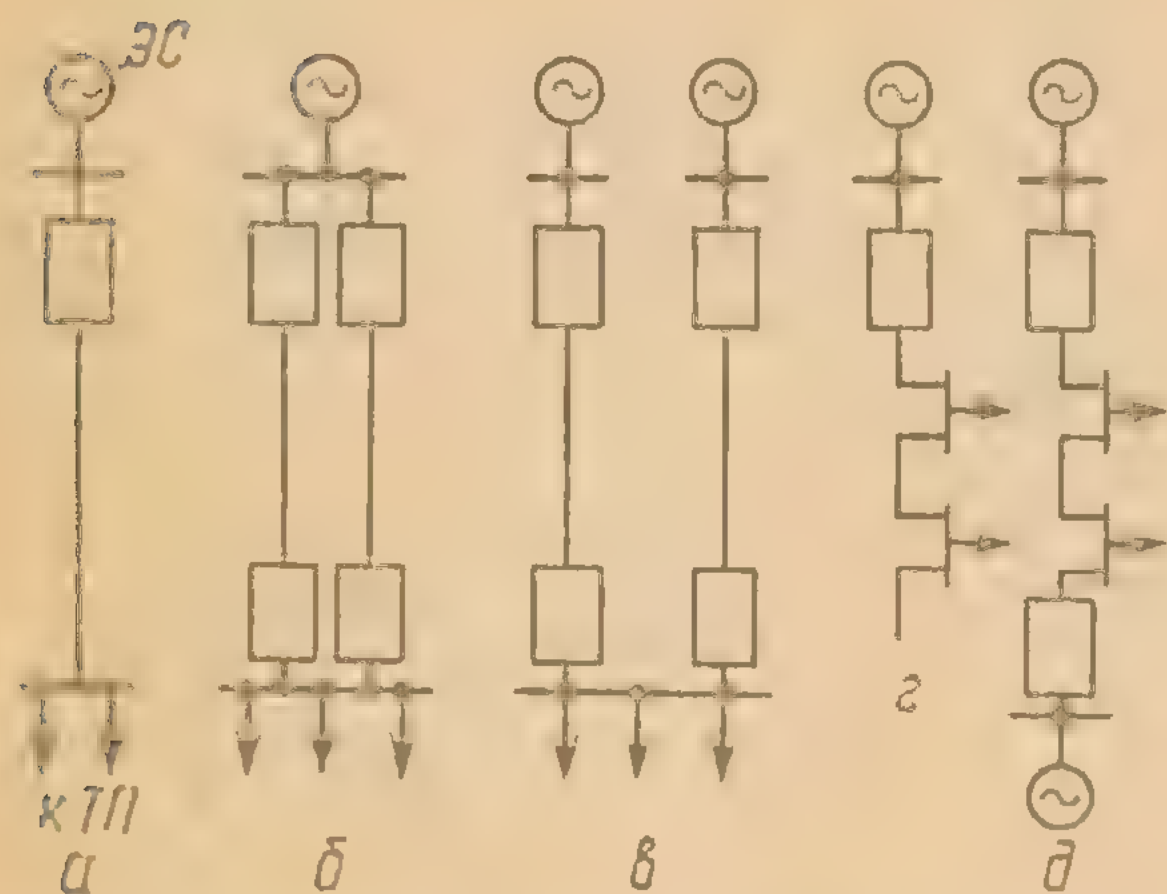


Рис. 8.2. Радиальные (а, б, в) и магистральные (г, д) схемы распределительных электрических сетей 10 кВ.

Номинальное напряжение электрической линии зависит от расстояния, на которое передается электрическая энергия. Чем больше расстояние, тем выгоднее применять более высокое напряжение, на котором передается электрическая энергия. С увеличением напряжения значительно снижаются потери энергии в проводах и расход металла на провода. Пропускная способность сетей пропорциональна квадрату степени увеличения напряжения (см. п. 7.3).

8.1. Передаваемая мощность и целесообразное напряжение

Передаваемая мощность на одну цепь, МВт	Расстояния передачи, км	Номинальное напряжение линии, кВ
До 3	До 15	10
До 5	До 30	20
5...15	30...60	35
15...50	50...150	110
100...300	150...250	220
300...400	200...300	330
500...700	600...1000	400
700...900	800...1200	500
1800...2200	1200...2000	750

В таблице 8.1 приведены значения некоторых принятых стандартом СССР высоких напряжений и даны сугубо ориентировочные сведения о том, на какие расстояния и при каких мощностях целесообразно передавать электроэнергию на данном напряжении.

К крупным сельскохозяйственным предприятиям подводится напряжение 35 или 20 кВ, а к средним — 10 кВ. В первом случае целесообразно использовать трансформаторы напряжением 35/0,4 кВ.

Напряжение 20 кВ имеет некоторые преимущества перед напряжением 35 и 10 кВ, если надо иметь разветвленную сеть внутри хозяйства. Аппараты и кабели на 20 кВ дешевле, чем на 35 кВ, потери электроэнергии в сетях, трансформаторах и другом электрооборудовании при 20 кВ меньше, чем при 10 кВ.

8.2. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Общая схема электрических соединений электростанций мощностью до 100 кВ·А (схема коммутации) приведена на рисунке 8.3, а.

К основным элементам электростанции относят первичный двигатель, генератор и распределительное устройство.

Первичные двигатели на электростанциях — это главным образом гидравлические, паровые, газовые турбины и двигатели внутреннего сгорания.

Генератор переменного тока приводится во вращение первичным двигателем. Возбудителем основного генератора обычно служит генератор постоянного тока, мощность которого составляет до 1% мощности генератора. Он дает напряжение постоянного тока для питания обмотки возбуждения LG генератора.

В цепи обмотки возбуждения LE возбудителя включен регулировочный реостат R , при помощи которого изменяют ток в этой обмотке и регулируют напряжение на щетках якоря возбудителя, что в свою очередь приводит к изменению интенсивности магнитного силового поля полюсов ротора генератора и, следовательно, значения напряжения на зажимах генератора трехфазного переменного тока.

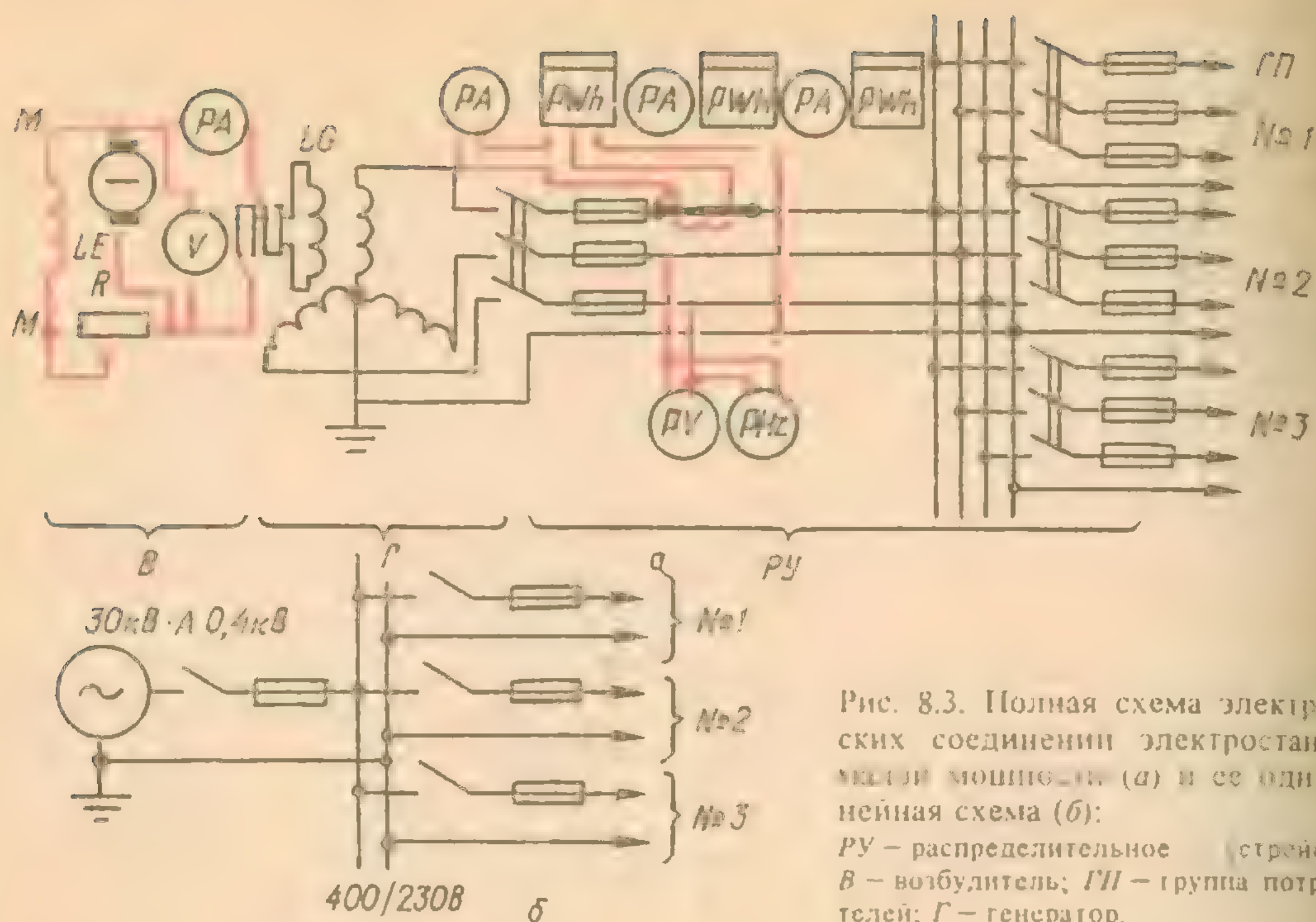


Рис. 8.3. Полная схема электрических соединений электростанции: многолинейная (а) и ее однолинейная схема (б): РУ — распределительное устройство; В — возбуждатель; ГП — группа потребителей; Г — генератор.

Распределительное устройство, объединяющее коммутационную аппаратуру, то есть аппаратуру для изменения схем соединений в электроустановках (включения, выключения, переключения и т. п.), измерительные приборы и защитные устройства, позволяет независимо распределять электроэнергию между потребителями, защищать генератор от замыканий в сети, измерять электрические величины и вести контроль и учет энергии, расходуемой отдельными группами потребителей.

По форме изображения различают однолинейные и трехлинейные схемы электроустановок.

На однолинейных схемах все три фазы силовой цепи показывают одной линией. Это допустимо в связи с тем, что все три фазы обычно имеют одинаковую аппаратуру и аналогичные схемы ее включения. Однолинейными схемами с нанесением на них всех элементов первичных цепей (генераторов, трансформаторов, реакторов, разъединителей) пользуются при расчете токов короткого замыкания, разработке схем вторичных цепей, конструировании распределительных устройств. Такие схемы для всей установки называются *принципиальными однолинейными*. Если на однолинейной схеме указаны также контрольно-измерительные приборы, устройства защиты, управления и сигнализации, то такие схемы называют *полными однолинейными*.

Трехлинейные схемы, на которых изображены все три фазы, выполняют для отдельных частей электростанции или подстанций при изображении вторичных цепей, например релейной защиты генератора или трансформатора. Их также называют *принципиальными схемами вторичных цепей*. На рисунке (8.3, б) показана

однолинейная схема электростанции, полная схема которой приведена на рисунке 8.3, а.

Монтажные схемы, разрабатываемые наряду с указанными выше, являются основным руководством при монтаже и эксплуатации, в частности при определении повреждений, а также при испытаниях и проверках всех вторичных цепей. На монтажной схеме изображают все приборы, реле, устройства, соединительные провода и кабели. Все приборы и аппараты на этих схемах размещают таким образом, чтобы они соответствовали действительному их расположению на щитах и панелях.

8.3. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

По виду энергии, используемой первичным двигателем, электростанции делят на тепловые, гидравлические и др.

Тепловые электростанции могут работать на твердом (уголь, торф), жидком (мазут, нефть), газовом (естественный или искусственный газ) и атомном топливе. В качестве первичных двигателей здесь применяют паровые турбины, двигатели внутреннего сгорания, газовые турбины, а на наиболее мощных — только паровые турбины. Паротурбинные электростанции подразделяют на конденсационные (КЭС) и теплофикационные (теплоэлектроцентрали — ТЭЦ).

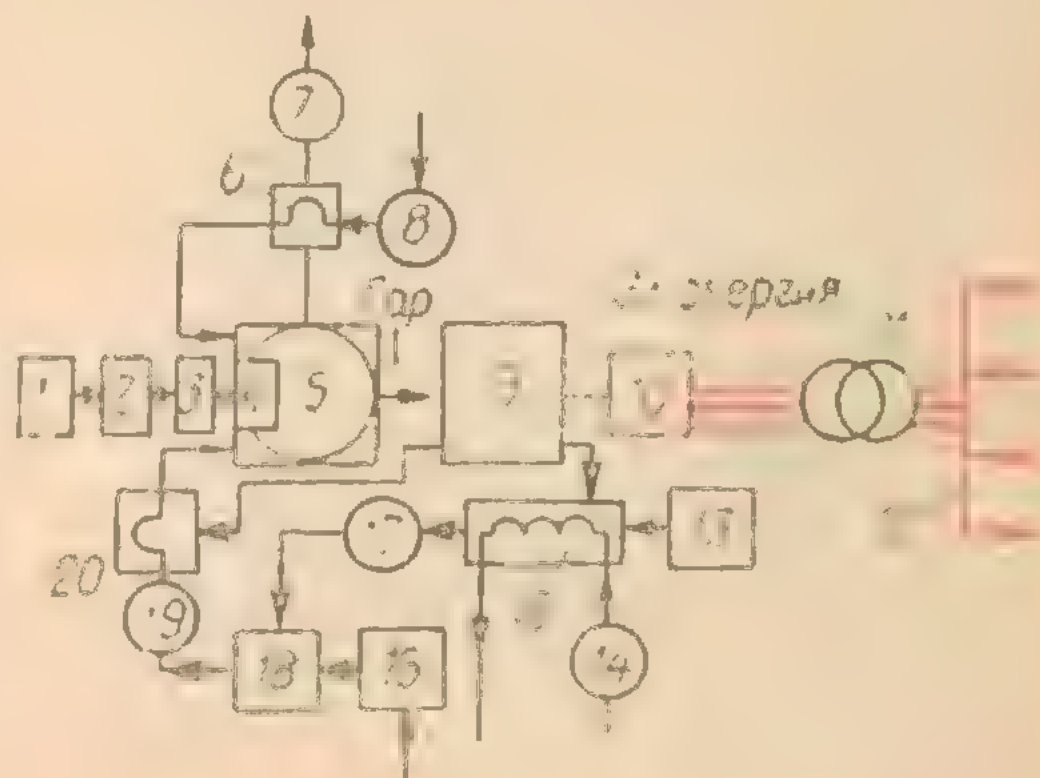
Конденсационные электростанции предназначены для снабжения потребителей только электрической энергией.

Схема технологического процесса такой станции приведена на рисунке 8.4. Твердое топливо со склада 1 подается в дробильную установку 2, а оттуда — в пылеприготовительное устройство 3, где в мощных шаровых мельницах раздробленный уголь измельчается до пылеобразного состояния. Воздушные транспортеры подают пылевидное топливо в бункер над котлом 5 и оттуда в топку 4. Специальный вентилятор 8 нагнетает воздух в топку через воздухоподогреватель 6, омываемый отходящими газами, которые отсасывает из топки дымосос 7.

Воду для питания котла 5 из питательного бака 18 нагнетает насос 19. По пути в котел вода проходит через подогреватель 20, где нагревается до 150...170°C (под давлением) теплом пара, который отработал в турбине 9. До поступления в питательный бак вода проходит

Рис. 8.4. Схема производственного процесса КЭС:

1 — склад; 2 — дробильная установка; 3 — пылеприготовительное устройство; 4 — топка; 5 — котел; 6 — воздухоподогреватель; 7 — дымосос; 8 — вентилятор; 9 — турбина; 10 — генератор; 11 — трансформатор; 12 — распределительное устройство; 13 — паровой эжектор для отсасывания воздуха из конденсатора; 14 — насос охлаждающей воды; 15 — конденсатор; 16 — устройство для очистки воды; 17 и 19 — насосы; 18 — бак; 20 — подогреватель воды.



химическую очистку в устройстве 16. Часть воды подает из конденсатора 15 насос 17. Пар в конденсаторе охлаждается водой, которую насос 14 забирает из внешнего источника воды и прогоняет через систему труб. Паровой эжектор 13 отсасывает воздух из конденсатора и создает разрежение. При пониженном давлении в конденсаторе пар не используется более полно. Турбина 9 приводит в движение генератор 10. Электрическая энергия через подстанцию с понижающим трансформатором 11 и распределительным устройством 12 передается к потребителям.

На конденсационной электростанции наблюдаются значительные потери энергии. Особенно велики потери теплоты в конденсаторе, откуда она циркуляционной водой уносится во внешний водоем. Теплота теряется также в топке, котле, турбине, генераторе. В результате общий КПД составляет около 30%. Однако на конденсационных теплоэлектростанциях с высокими параметрами давления и температуры пара коэффициент полезного действия достигает 40%.

Теплоэлектростанции совмещают производственные процессы выработки теплотой и электрической энергии. Теплооснабжение осуществляется благодаря отбору пара из турбины. Этот пар или непосредственно поступает для производственных и бытовых нужд или (частично) используется предварительно для подогрева воды в специальном бойлере 2 (рис. 8.5), вода из которого затем поступает к потребителям тепловой энергии через теплофикационную сеть. КПД теплоэлектростанций достигает 70% и может быть несколько большим.

Атомные электростанции вместо котла оборудованы ядерным реактором, в котором за счет энергии цепной реакции деления ядер урана выделяется теплота. Эта теплота с помощью теплоносителя циркулирующего через трубы в реакторе, передается в парогенератор.

Электростанции с магнетогидродинамическим генератором (МГД) работают на продуктах сгорания природного газа, в которые для увеличения электрической проводимости добавляют примеси различных солей. Высокотемпературная плазма (около 2600°C) с большой скоростью проходит сквозь магнитное поле и в ней индуцируется ЭДС, которая отводится при помощи омываемых плазмой электродов. Тепло от плазмы затем используется в парогенераторе.

Электростанции с двигателями внутреннего сгорания различных типов, используемые в сельском хозяйстве главным образом в качестве резервных или для питания удаленных объектов, могут работать на жидком или газообразном топливе. Их КПД составляет приблизительно 35%, однако при одновременном использовании теплоты воды охлаждающей двигатель, КПД может быть повышен до 65%.

Наибольшее распространение получили дизельные электростанции мощностью до 100 кВт. Для сельской электрификации также



Рис. 8.5. Особенности технологического процесса на ТЭЦ
1 и 3 — насосы; 2 — бойлер для подогрева воды для потребителя;
4 — бак; 5 — турбина; 6 — генератор; III — пар для производственных нужд; ГВТ — горячая вода для теплофикации

разработаны и осваиваются автоматизированные электростанции этого типа мощностью до 1000 кВт. Автоматизированные дизель-электрические агрегаты серии АСДА мощностью 5, 12, 20 и 50 кВт предназначены в качестве резервных и аварийных источников для питания производственных и общественных объектов, больниц и др. Марка агрегата расшифровывается так: агрегат стационарный дизель-электрический автоматизированный; далее указаны сведения о мощности (кВт), роде тока (Т — трехфазного тока), напряжении (В), системе охлаждения (Р — радиаторная, Д — двухконтурная). На станциях используются генераторы единой серии ЕСС, синхронные, самовозбуждающиеся, защищенного исполнения.

Агрегаты серии АСДА выпускаются первой и второй ступеней автоматизации.

Первая ступень предполагает автоматическую работу установки (в течение 24 ч), за исключением операций пуска и нормального останова, которые выполняет обслуживающий персонал. На агрегате предусмотрен автоматический аварийный останов (закрытием воздушной заслонки на всасывающем коллекторе двигателя) при срабатывании следующих защит: от разброса двигателя, от токов короткого замыкания и перегрузки, от понижения давления масла в двигателе, уменьшения уровня воды в системе охлаждения и повышения ее температуры.

Вторая ступень автоматизации обеспечивает автоматическое и дистанционное управление электроагрегатами на расстоянии не более 200 м (по кабелю) от щита автоматического управления. Работа без обслуживающего персонала возможна в течение 200 ч. Система автоматики предусматривает аварийный останов закрытием рейки топливного насоса двигателя при коротких замыканиях и перегрузках, при понижении уровня масла или воды ниже допустимого в системах смазки или охлаждения первичного двигателя, а также при повышении температуры охлаждающей воды. Режимы разброса двигателя, незавершенного пуска и останова ликвидируются автоматически закрывающейся воздушной заслонкой.

Управление агрегатами первой и второй ступеней автоматизации осуществляется при помощи специальных щитов автоматического управления.

Унифицированные передвижные дизель-электрические агрегаты серии АД мощностью 5, 10, 20, 30, 50 и 75 кВт, напряжением 230 и 400 В и частотой 50, 150, 200 и 400 Гц являются автономными источниками электроснабжения.

Широкое распространение получили передвижные электростанции типа ЖЭС (железнодорожные), ДЭС (дизельные автомобильные), ПЭС (передвижные) и др. Для электростригальных агрегатов применяют электростанции типа ЭС, в том числе и повышенной частоты.

Гидравлические электростанции преобразуют механическую энергию водных потоков в электрическую. Электростанции этого типа просты в эксплуатации, обладают весьма высоким КПД (80...90%) и вырабатывают самую дешевую электроэнергию.

Однако первоначальная стоимость, то есть стоимость сооружения

гидроэлектростанций, намного превышает стоимость сооружения тепловых электростанций одинаковой мощности. Это связано огромным объемом земляных и строительных работ. Значительно продолжительнее и сроки сооружения ГЭС.

Ниже приведен приблизительный энергетический баланс (в %) гидроэлектростанции:

запас энергии в верхнем уровне ГЭС	100
потери на испарение, сброс и фильтрацию	4
потери в сооружении, турбине и генераторе	11
потери на повысительной подстанции и в линиях	7
полученная электроэнергия	78

Различают приплотинные и деривационные гидроэлектростанции. Напор воды при помощи плотины обычно создают на равнинных реках. На горных реках, которые имеют большой уклон, строят деривационные гидроэлектростанции. Вода из реки по деривационному каналу и напорному трубопроводу подводится к турбинам ГЭС, расположенной у подножия склона.

Аккумулирующие гидроэлектростанции (АГЭС). Гидротурбины АГЭС работают либо в режиме первичных двигателей, тогда генератор отдает энергию в сеть (в часы пиковой нагрузки), либо в режиме насоса, закачивая воду из реки в водохранилище, тогда генераторы работают в режиме электродвигателей (в часы минимума нагрузки в энергосистеме при наличии «свободной» энергии, например, от атомных электростанций).

Маломощные ветроэлектростанции используют, как правило, в отдаленных районах для электроснабжения радиоприемных и передающих устройств. На таких электростанциях применяют генераторы постоянного тока, которые, когда позволяют условия, работают на нагрузку и подзаряжают параллельно включенные аккумуляторные батареи. В безветренную погоду питание потребителей осуществляется от аккумуляторной батареи.

8.4. ГРАФИКИ НАГРУЗОК ИСТОЧНИКА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Для проектирования электрификации хозяйств, планирования электропотребления в уже существующих хозяйствах и выявления условий эксплуатации электрооборудования на электростанциях и понижающих трансформаторных подстанциях необходимо иметь сведения о потребляемой мощности в различные сезоны года и в различные часы суток. Режим работы электростанции или трансформаторной подстанции постоянно меняется в зависимости от суммарной мощности потребляемой всеми энергоприемниками.

Режим работы отдельных потребителей также не остается постоянным, он неодинаков по часам суток и по сезонам. Например, электрическая нагрузка имеет максимальное значение в ночные часы, ламповая осветительная нагрузка включена более продолжительное время, чем летом, и абсолютное значение ее мощности больше в те же часы. Силовая нагрузка в течение рабочего дня также меняется в зависимости от характера работы.

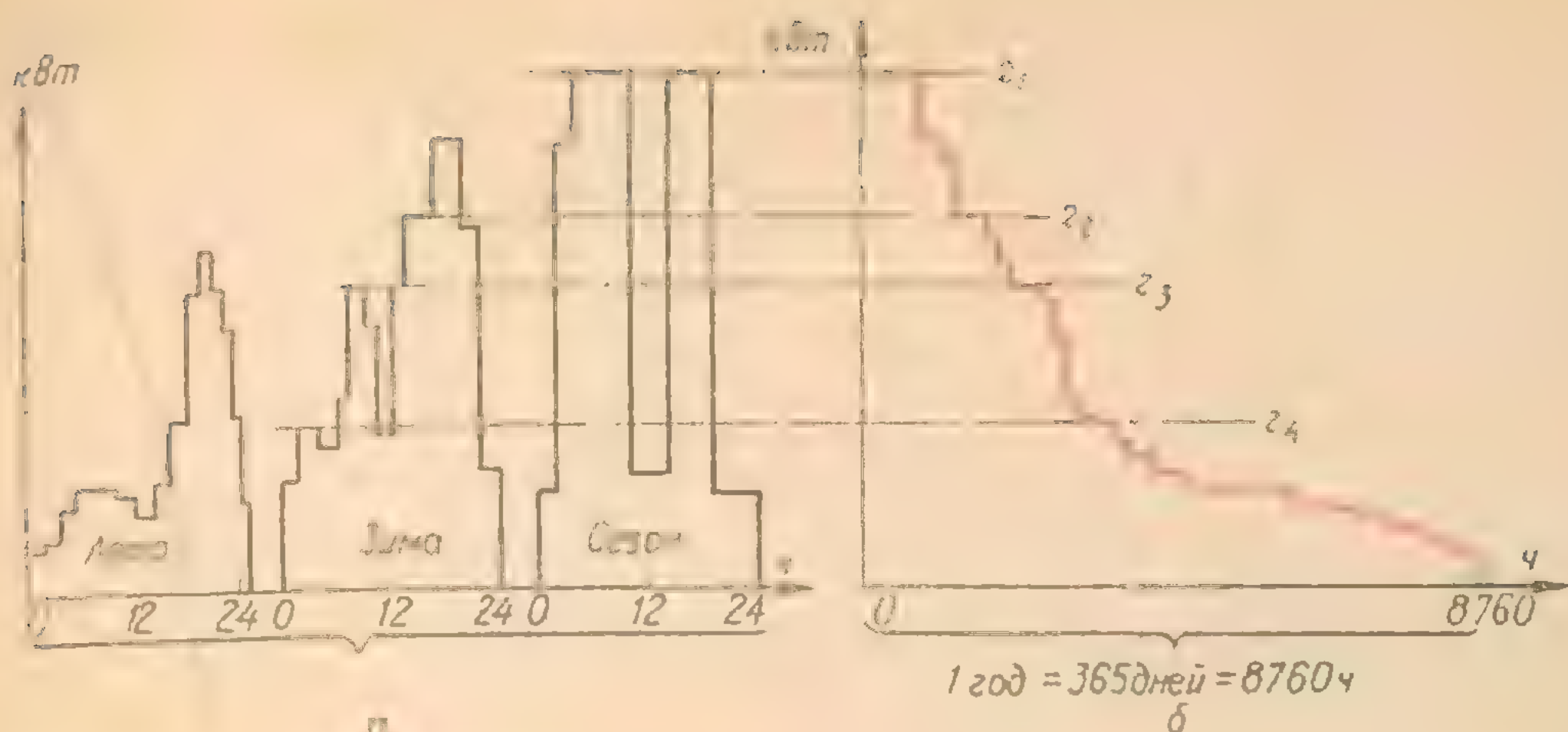


Рис. 8.6. Графики нагрузки:

а — суточный (летний, зимний, сезонный); б — годовой по продолжительности

Графики нагрузок дают наглядное представление о нагрузке электростанции (или трансформаторной подстанции) и одновременно характеризуют спрос на электрическую мощность со стороны потребителей.

Различают графики активной и реактивной нагрузок, суточные, недельные, месячные, годовые. На суточных графиках по оси ординат откладывают мощности, потребляемые на станции в зависимости от времени в течение суток, а на недельных, месячных и годовых — обычно максимальные мощности станции в различные дни недели или месяцы года. Пример суточных графиков приведен на рисунке 8.6, а, где по горизонтальной оси отложены часы суток, а по вертикальной — мощности, потребляемые каждый час.

Располагая графиками нагрузок, можно проанализировать работу станции, определить наиболее экономичные варианты ее работы в зависимости от времени, выяснить степень загрузки агрегатов и возможность наиболее рационального распределения нагрузки между отдельными агрегатами.

При разработке проекта электроснабжения графики нагрузок рассчитывают для отдельных групп потребителей (например, для потребителей осветительной нагрузки, потребителей силовой нагрузки) по различным объектам. Общий суммарный график нагрузки определяют путем наложения отдельных графиков.

Пользуясь графиками нагрузок, можно вычислить ряд важных технико-экономических показателей. Так, площадь графика соответствует выработке электроэнергии за данные сутки. Поделив эту выработку на 24 ч, находят среднюю нагрузку $P_{\text{ср}}$ за сутки. Если речь идет о графике потребительской установки, то таким образом определяется расходуемая за сутки электроэнергия.

Коэффициент равномерности или коэффициент заполнения графика — это отношение площади графика к площади, полученной умножением максимального значения графика на 24 ч.

Следует стремиться к максимально возможному увеличению

ко и коэффициента равномерности, так как при этом полнее используются генераторы станций и трансформаторы подстанций, вырабатывается больше электроэнергии, поэтому снижается ее себестоимость.

Одно из лучших средств увеличить коэффициент заполнения графика — это использовать электротепловые установки, работающие по принципу аккумуляции тепла и включаемые в часы провалов в графике.

8.5. ГОДОВОЙ ГРАФИК ПО ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ И ЕГО АНАЛИЗ

Годовой график по продолжительности позволяет уточнить выработку электроэнергии за год, правильно выбрать число агрегатов, электростанций или трансформаторов из подстанции, определить режим работы каждого агрегата или трансформатора. Этот график строят по суточным графикам, летнему и зимнему. А при наличии характеристик сезонного графика используют и его. Наиболее точную картину распределения мощностей в течение года дает график, построенный из пяти суточных: летнему, весеннему, зимнему, весеннему и сезонному. Сезонный график может быть рассчитан на наибольшее число дней в году. Но не учесть его нельзя, так как это может привести к большим ошибкам, например, при выборе трансформатора и при построении годового графика.

Годовой график по продолжительности строят в такой последовательности (рис. 8.6, б). Суточные графики, вычерченные в одном масштабе, располагают рядом. Справа от них строят оси координат для графика по продолжительности. На оси абсцисс в масштабе откладывают число часов в году — 8760. Проводят ряд горизонталей, которые пересекают все графики (каждая на уровне определенной мощности). На соответствующих горизонталях графика по продолжительности откладывают число часов, полученное как сумма произведений для каждого графика числа часов действия данной нагрузки в сутки на число суток в году, в течение которых наблюдается эта нагрузка. Для удобства расчетов пользуются таблицей, форма которой приведена ниже.

Мощности нагрузки, соответствующие горизонталям, P_x	Число часов участия мощности нагрузки P_x в суточном графике					Число часов t_x длительности мощности P_x за год
	весна	лето	осень	зима	сезон (орошение)	
P_1	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	

Обычно принимают, что число дней работы весеннего, летнего, осеннего и зимнего графиков одинаково:

$$n = \frac{365 - n_{\text{отп}}}{4} \text{ дней,}$$

где $n_{\text{отп}}$ — число дней работы по орошению.

число часов длительности мощности P_x

$$Q = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \frac{8760 - T_{\text{рем}}}{8760} + T_{\text{рем}} \quad (8.2)$$

Значение Q_x вычисляется для каждой из горизонталей, откладывая по графику на продолжительности. Соединив затем образованную точек кривой, получают годовой график по продолжительности.

Площадь, ограниченную кривой и осями координат, равна в масштабе годовой выработке электроэнергии или годовому потреблению ($W_{\text{год}}$). Отношение $W_{\text{год}}$ к произведению $8760 \cdot P_{\text{уст}}$ представляет собой коэффициент заполнения графика.

Годовое число часов использования установленной мощности электростанции $T_{\text{год}}$ показывает, сколько часов должна проработать электростанция с нагрузкой, равной установленной мощности станции $P_{\text{уст}}$, чтобы выработать количество энергии, равное выработке станцией за год $W_{\text{год}}$:

$$T_{\text{год}} = W_{\text{год}} / P_{\text{уст}} \quad (8.3)$$

Средняя себестоимость S одного киловатт-часов энергии может быть определена как частное от деления годовых расходов на электростанции $\Sigma \Delta_{\text{год}}$, состоящих из амортизационных отчислений и текущих расходов, на число киловатт-часов $W_{\text{год.пол}}$ полезно отпущенной за год энергии:

$$S = \Sigma \Delta_{\text{год}} / W_{\text{год.пол}} \quad (8.4)$$

Вопросы, связанные с темой в главе 8. 1. Какие пути электрической энергии существуют от источника энергии к потребителю и какие при этом используются аппараты? 2. Какие виды систем используются для передачи энергии? 3. Объясните принцип действия турбоэлектростанции, генератора, трансформатора, расширительного двигателя и насоса системы водоснабжения. 4. Каково различие между теплотехническими и электротехническими. Назовите характеристики и функции системы управления двигателем. 5. Как вычислить коэффициент заполнения графика нагрузки? 6. Как вычислить годовую выработку энергии в год по годовому графику нагрузки? 7. Как по графику нагрузки вычисляется средняя годовая потребность электроэнергии? 8. Как определить себестоимость энергии?

Глава 9. СИНХРОННЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ И УПРАВЛЕНИЕ ИХ РАБОТОЙ

9.1. УСТРОЙСТВО ГЕНЕРАТОРОВ И СПОСОБЫ ИХ ВОЗБУЖДЕНИЯ

Принцип действия простейшего синхронного генератора и трехфазного генератора переменного тока был рассмотрен ранее (см. гл. 6.1 и гл. 7.1). Поскольку на роторе могут быть расположены возбужденные или управляемые полюсы, то в синхронном генераторе полюсы могут быть расположены на роторе (для больших 1000 мВт и

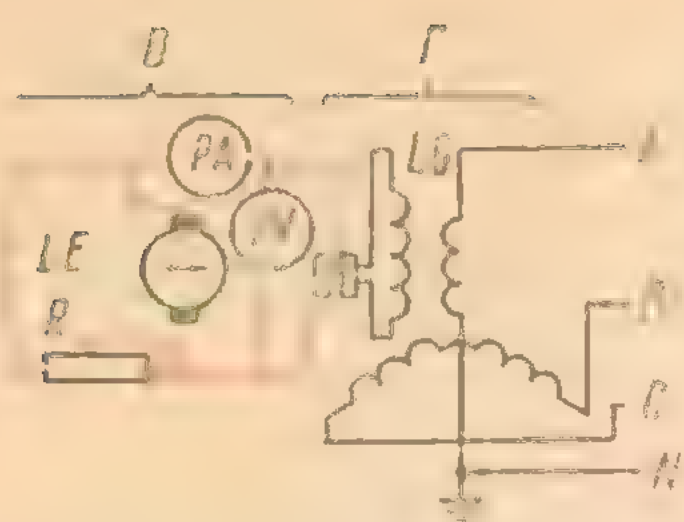


Рис. 9.1. Схема генератора с машинным возбуждением: Г — генератор; В — возбудитель; LE — обмотка возбуждения возбудителя; LG — обмотка возбуждения генератора.

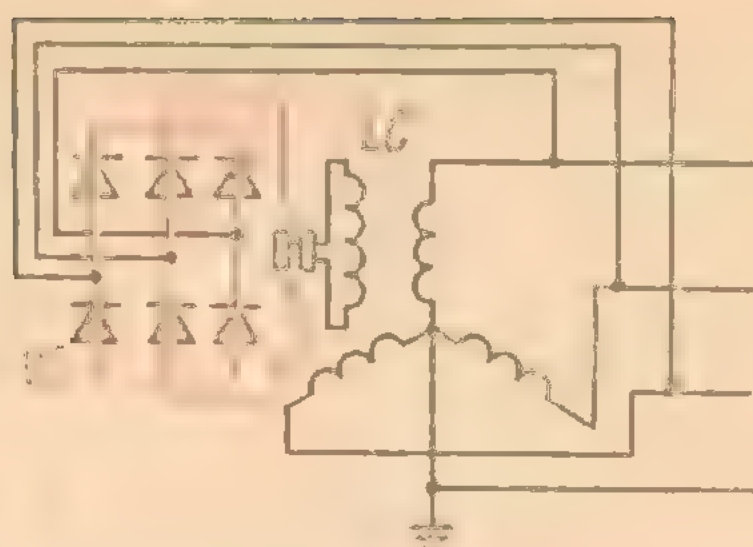


Рис. 9.2. Схема генератора с самовозбуждением от селеновых выпрямителей: LG — обмотка возбуждения генератора; VS — выпрямительный мост.

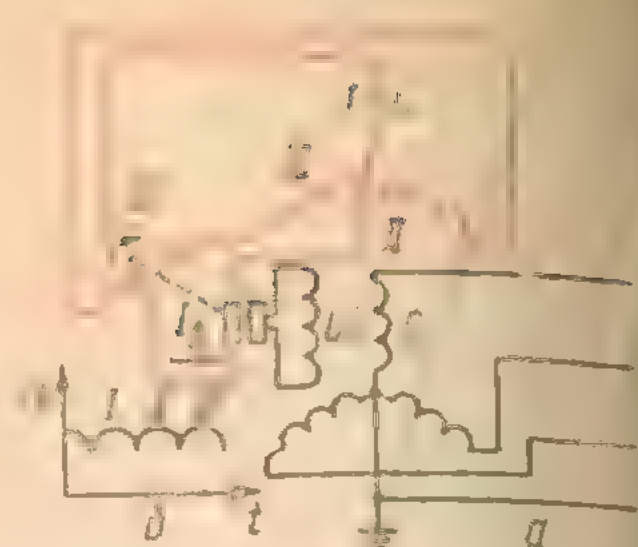


Рис. 9.3. Генератор с механическим выпрямителем: а — схема генератора; б — характеристика обмотки возбуждения LG; Г — генераторная обмотка; Л — вспомогательная обмотка; SC — механический коммутаторный выпрямитель.

генераторов, используемых для работы, например, с гидротурбинами (гидрогенераторы). Неявнополюсными выполняют роторы быстроходных (1500...3000 мин⁻¹) генераторов паровых турбин (турбогенераторы).

Для электростанции с двигателем внутреннего сгорания предназначены генераторы с независимым возбуждением от машинных возбудителей, генераторы с самовозбуждением от твердых или механических выпрямителей.

Схема генератора с машинным возбудителем изображена на рисунке 9.1. Ток в обмотку ротора поступает от генератора постоянного тока с параллельным возбуждением — возбудителя, расположенного на валу синхронного генератора. Мощность возбудителя составляет всего 0,3...3% мощности синхронного генератора. Меньшее значение относится к более мощным генераторам. Напряжение возбудителя генераторов сельских станций не превышает 115 В. Номинальное напряжение этих генераторов составляет 133/230 В, 230/400 В, 400/690 В.

Генераторы с самовозбуждением подразделяются на генераторы с твердыми полупроводниковыми выпрямителями и генераторы с механическим выпрямителем. На рисунке 9.2 изображена схема генератора с самовозбуждением от полупроводниковых выпрямителей. Принцип действия такого генератора заключается в следующем. При вращении генератора вхолостую в обмотке статора под влиянием остаточного магнетизма полюсов ротора индуцируется небольшая ЭДС. Эта ЭДС через выпрямители VS приложена к обмотке возбуждения LG. В замкнутой цепи обмотки возбуждения протекает ток, который усиливает поток остаточного магнетизма, вследствие чего возрастает ЭДС в обмотке статора. Ток возбуждения увеличивается еще более и т. д.

На рисунке 9.3 приведена упрощенная схема генератора с механическим выпрямителем. В пазах статора, кроме основной силовой обмотки G, уложена вспомогательная обмотка Л с небольшим числом витков, соединенная в звезду или треугольник изолированно от основной. На роторе расположены обмотка возбуждения LG и меха-

нический выпрямитель SC , напоминающий по устройству и принципу действия коллектор машин постоянного тока. К щеткам через механический выпрямитель подключены концы вспомогательной обмотки якоря, а на кольца выведены концы обмотки индуктора LG . На рисунке 9.1 б показан характер тока в цепи обмотки возбуждения.

9.2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ГЕНЕРАТОРОВ

К основным параметрам синхронных генераторов относятся: номинальные значения напряжения, силы тока нагрузки, мощности, силы тока возбуждения, коэффициента мощности, частоты.

Номинальное напряжение генератора соответствует одному из значений шкалы 230, 400, 690 В, 6,3 и 10,5 кВ. Следовательно, напряжение на клеммах генераторов принято на 5% выше стандартных напряжений токоприемников. Генераторы большей мощности изготавливают на напряжение от 3,15 до 24 кВ.

Номинальная сила тока нагрузки — это сила тока, на которую рассчитан тепловой режим генератора. Допускаются кратковременные перегрузки в аварийных режимах: на 10% продолжительностью 60 мин, на 15% — 15 мин, на 20% — 6 мин, на 25% — 5 мин, на 50% — 2 мин, на 100% — 1 мин. Более длительная перегрузка опасна для изоляции обмоток. Это относится и к току возбуждения.

Номинальная мощность — это длительно развиваемая мощность при номинальных значениях напряжения, силы тока и коэффициента мощности при номинальной нагрузке и температуре $+35^{\circ}\text{C}$ охлаждающего воздуха (входящего в генератор). Длительно допустимая температура нагрева обмоток указана в инструкции по эксплуатации генераторов. Она зависит от класса изоляции обмоток и в большинстве случаев не должна превышать $100...120^{\circ}\text{C}$ для статорных обмоток и $105...145^{\circ}\text{C}$ для роторных.

Номинальный коэффициент мощности обычно равен 0,8. При работе генератора с меньшим коэффициентом мощности активная мощность его снижается, не полно используется мощность первичного двигателя.

Номинальная частота тока в нашей стране принята равной 50 Гц. В ряде установок применяют генераторы повышенной частоты (150, 200, 400 Гц и др.).

Заводы-изготовители прилагают к генераторам характеристики холостого хода и короткого замыкания. Эти характеристики необходимы в процессе проектирования и эксплуатации электростанций, в частности при решении вопросов об устойчивости параллельной работы синхронных генераторов, регулировании напряжения и компенсации, а также при расчетах токов короткого замыкания в целях выбора необходимой релейной защиты и т. д.

9.3. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ГЕНЕРАТОРОВ

Для включения генераторов на параллельную работу они должны быть синхронизированы. Существует два принципиально различных

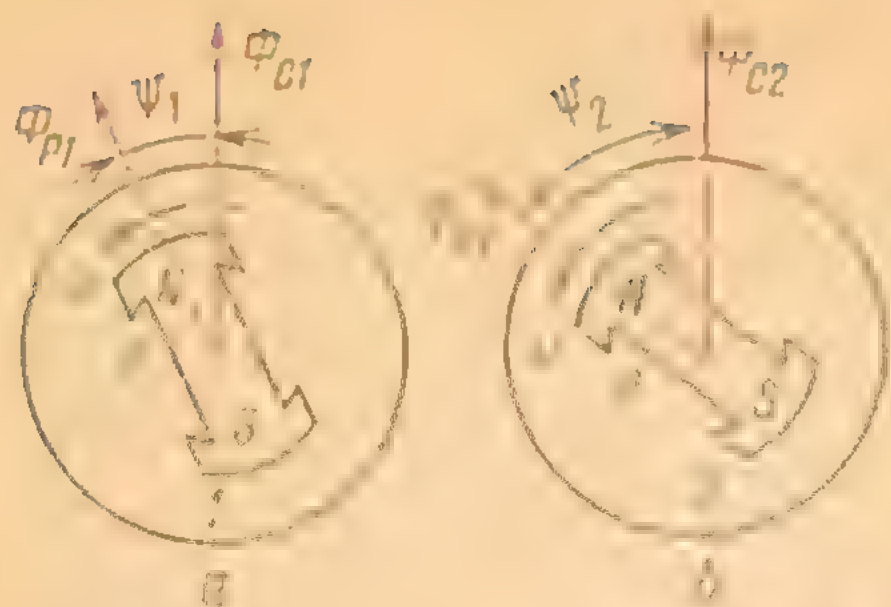


Рис. 9.4. Взаимодействие магнитных полей статорных обмоток с магнитными полями электромагнитов ротора при параллельной работе генераторов.

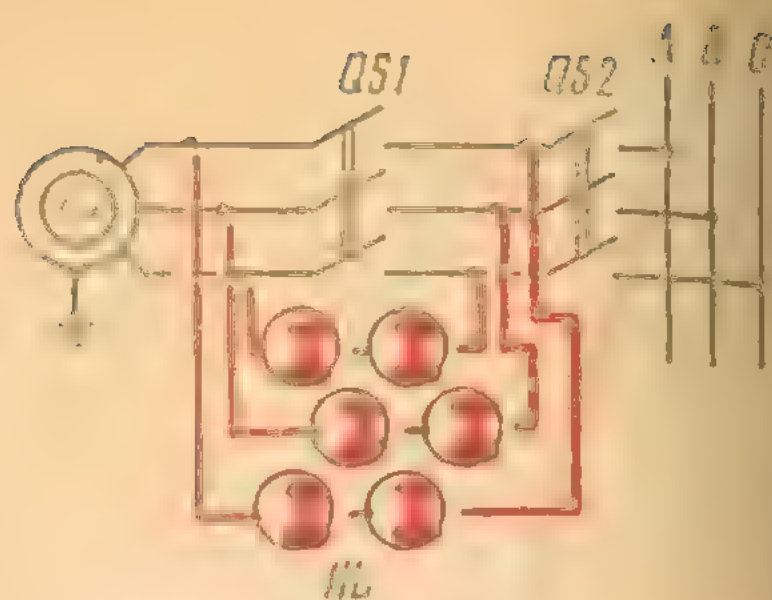


Рис. 9.5. Проверка чередования фаз генератора.

способа синхронизации, способ точной синхронизации и способ самосинхронизации.

Способ точной синхронизации состоит в том, что включаемый генератор нужно предварительно привести во вращение и возбудить. В момент включения его на параллельную работу с работающим генератором необходимо обеспечить следующие условия синхронизации:

1) порядок следования фаз у включаемого генератора должен совпадать с порядком следования фаз работающего генератора (или сети, в которую включается генератор);

2) напряжения включаемого и работающего генераторов должны быть равны по значению и совпадать по фазе; равенства напряжений добиваются изменением силы тока в обмотке возбуждения;

3) частота тока включаемого генератора должна быть равна частоте тока работающего; этого достигают, изменяя частоту вращения включаемого генератора.

Если все эти условия выполнены, включаемый генератор можно рубильником или выключателем соединить с работающим.

Взаимодействие между вращающимися магнитными полями $\Phi_{ст1}$ и $\Phi_{ст2}$ статорных обмоток параллельно работающих генераторов и магнитными полями $\Phi_{р1}$ и $\Phi_{р2}$ электромагнитов роторов показано на рисунке 9.4. Векторы $\Phi_{ст1}$ и $\Phi_{ст2}$ вращаются синхронно с угловой частотой ω и совпадают по фазе в каждый момент времени. Векторы $\Phi_{р1}$ и $\Phi_{р2}$ также вращаются синхронно между собой и с векторами $\Phi_{ст}$. Но углы ψ_1 и ψ_2 сдвига фаз магнитного поля статора и ротора могут изменяться в различных пределах в зависимости от нагрузки. Если эти углы равны между собой, это означает, что оба генератора несут одинаковую активную нагрузку (если их номинальные мощности равны). Для того чтобы один из генераторов принял большую нагрузку, необходимо воздействовать на регулятор оборотов первичного двигателя этого генератора, повысить вращающий момент на его валу.

Последующее увеличение угла ψ укажет на то, что генератор принял дополнительную нагрузку. Так, угол ψ_2 (рис. 9.4, б) больше угла ψ_1 (рис. 9.4, а), поскольку этот генератор (рис. 9.4, б) нагружен больше.

Если один из генераторов взял на себя часть реактивной мощности, нужно усилить ток возбуждения генератора. Одновременно с увеличением нагрузки вновь включенного генератора необходимо снизить нагрузку работающих генераторов, так как в противном случае возрастет частота.

С целью предотвращения повышения напряжения при увеличении тока возбуждения вновь включенного генератора следует снизить ток возбуждения у работающих ранее генераторов.

Точной синхронизации добиваются при помощи специально предназначенного для этого прибора — *синхроскопа*. Для контроля равенства напряжений используют два вольтметра, один из которых измеряет напряжение работающего генератора, а другой — подключаемого. Равенство частот устанавливают по двум частотомерам.

По окончании монтажа генератора, предназначенного для параллельной работы, перед вводом его в эксплуатацию проверяют порядок следования фаз (рис. 9.5). Между контактами генератора (на рубильнике *QS1*) и шинами сети, с которой генератор будет работать параллельно, включают по две последовательно соединенные электрические лампы. Каждая лампа рассчитана на фазное напряжение сети. Затем приподнимают рукоятку генератора и включают рубильник *QS2* (при отключенном *QS1*).

Если векторы напряжений сети и генератора не совпадают по фазе, а также есть разница в частотах сети и генератора, но чередование фаз окажется одинаковым, то все три пары ламп будут гаснуть и загораться одновременно.

Если же чередования фаз в генераторе и сети неодинаковы, то загорание и потухание ламп в различных фазах не совпадают по времени. В этом случае меняют местами два отходящих от генератора питающих провода (остановив предварительно генератор) и вновь проверяют совпадение фаз. Затем маркируют контакты генератора соответственно фазам сети, а лампы снимают.

На электростанции, где включают генераторы на параллельную работу, приборы, предназначенные для синхронизации, устанавливают на специальных синхронизационных колонках. Ниже рассмотрены некоторые схемы точной синхронизации.

Схема 1. Колонка синхронизации СК (рис. 9.6) состоит из двух параллельных цепей: в одну последовательно включены две лампы *HL*, а в другую — вольтметр *PVo* и лампа *HL*. От каждого из генераторов к синхронизационной колонке отходит по одному проводу от одноименных фаз. Цепи синхронизации замыкаются по нулевому проводу на фазные обмотки генератора. Между проводами от фаз генераторов и синхронизационными

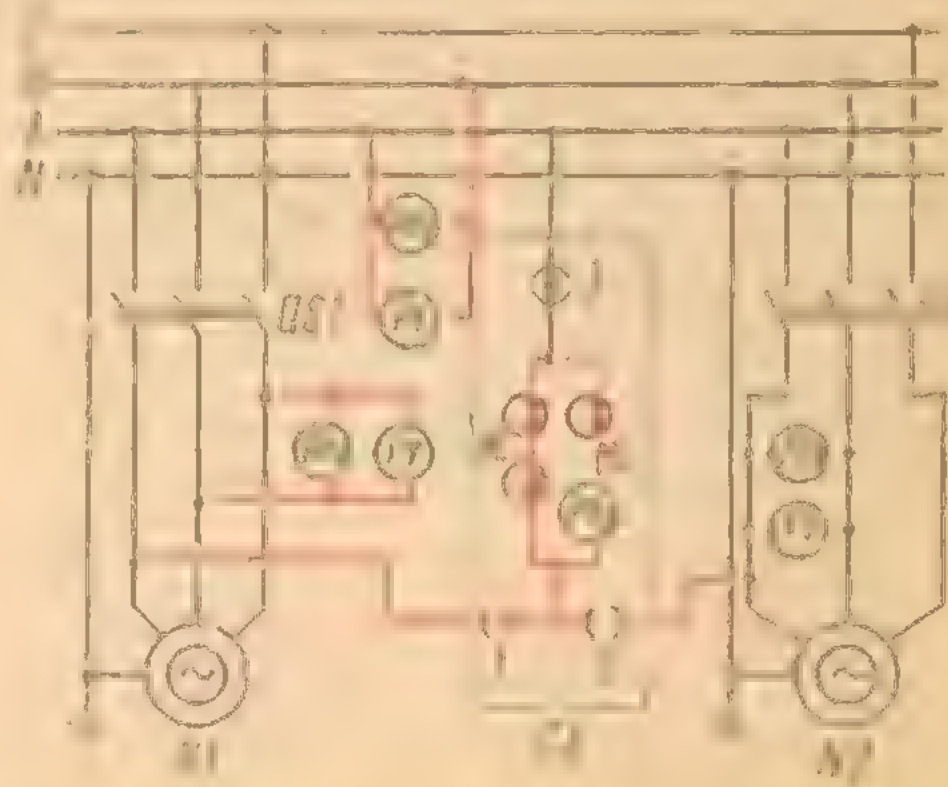


Рис. 9.6. Схема точной синхронизации генераторов.

рис. 9.8. Схема самосинхронизации генераторов:
 SAB — блокировочные контакты; $R_{г.п.}$ — сопротивление гашения поля; R_p — реостат, включенный как потенциометр; R — реостат в цепи возбуждения возбудителя; HL — сигнальная лампа; QS — рубильник.

Способ самосинхронизации, который широко применяется в практике, заключается в следующем.

Невозбужденный генератор, у которого магнитное поле погашено специально включенным в цепь возбуждения возбудителя сопротивлением гашения поля $R_{г.п.}$ (рис. 9.8), разгоняют первичным двигателем до частоты вращения, близкой к номинальной. При скольжении примерно 2...3% генератор включают в сеть рубильником QS . Одновременно подают возбуждение, шунтируя сопротивление гашения поля блок-контактами SAB . Генератор после этого постепенно втягивается в синхронизм.

В момент включения генератора в сеть на параллельную работу возникают кратковременные толчки тока, которые являются следствием подключения к сети невозбужденного генератора. Однако эти толчки не нарушают нормальной работы ранее работавших генераторов и потребителей.

Этот способ самосинхронизации считается основным и обязательным для всех многоагрегатных сельских электростанций.

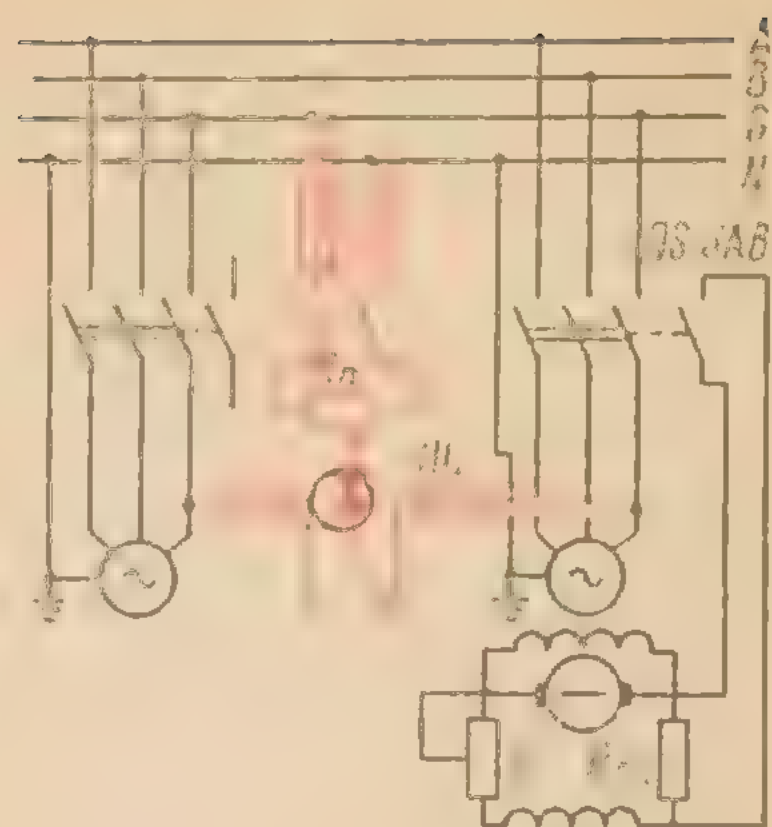
К методу точной синхронизации обращаются лишь в тех случаях, когда из-за большой загруженности ранее работавших генераторов метод самосинхронизации нельзя применить.

Ручной самосинхронизацией пользуются только тогда, когда генераторы оснащены рубильником (на маломощных станциях) или выключателями без дистанционного управления.

Для того чтобы судить о разности частот, включают, как показано на рисунке 9.8, лампу HL напряжением 6...36 В (в зависимости от значения остаточного напряжения генератора). Лампа имеет заметный накал при разности частот не менее 2 Гц. Однако наиболее совершенный способ измерения разности частот — это включение специальных реле типа ИРЧ (индукционных реле разности частот).

Порядок операций следующий. Генератор разгоняют первичным двигателем при выключенном рубильнике QS и разомкнутых блок-контактах SAB . В цепь обмотки возбуждения возбудителя включено сопротивление $R_{г.п.}$ гашения поля. Когда пускаемый генератор достигает частоты вращения, близкой к синхронной, лампочка HL гаснет. При этом включают рубильник QS , замыкаются блок-контакты SAB и шунтируется сопротивление гашения поля $R_{г.п.}$. Восстанавливается нормальное возбуждение, генератор втягивается в синхронизм.

При полуавтоматической самосинхронизации агрегаты запускают ручным воздействием на управление первичного двигателя, а включение генератора в сеть и подача возбуждения происходит автоматически.



Автоматическая самосинхронизация предполагает полную автоматизацию процессов пуска агрегата, включения генераторов в сеть и подачи возбуждения.

9.4. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ НА СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ

Регулирование частоты тока. Для нормальной работы потребителей электрической энергии необходимо, чтобы значение частоты тока соответствовало номинальному, или, точнее, не выходило за допустимые пределы. Снижение частоты тока ведет к уменьшению частоты вращения электродвигателей, увеличению поглощения мощности, а поэтому к их перегреву. Кроме того, на многих производствах изменение частоты вращения рабочей машины может пагубным образом сказаться на качестве выпускаемой продукции. Частоту тока на электрических станциях автоматически поддерживают на постоянном уровне при помощи регуляторов частоты вращения первичных двигателей.

В соответствии с ГОСТом в нормальном режиме работы допускаются отклонения значений частоты тока от номинального в пределах $\pm 0,1$ Гц. Временная работа энергосистемы возможна с отклонением частоты $\pm 0,2$ Гц. Для изолированно работающих станций мощностью до 100 и до 50 кВт допустимые отклонения частоты тока составляют соответственно ± 3 и ± 5 Гц.

Нагрузка на генератор, определяемая числом и мощностью потребителей электроэнергии, постоянно изменяется. Увеличение нагрузки на генератор вызывает уменьшение частоты вращения первичного двигателя, а следовательно, и частоты тока. Наоборот, сброс нагрузки приводит к резкому возрастанию частоты вращения первичного двигателя и, значит, к увеличению частоты тока в сети.

Для поддержания частоты тока на заданном уровне на электрических станциях устанавливают *автоматические регуляторы частоты вращения* первичных двигателей. Основным элементом такого устройства служит центробежный маятник, который воспринимает изменение частоты вращения первичного двигателя и через дополнительные устройства воздействует на орган, регулирующий частоту вращения. Регуляторы частоты вращения могут быть прямого или косвенного действия.

Рисунок 9.9 иллюстрирует принцип работы *регулятора прямого действия*. При изменении частоты вращения (например, уменьшении) центробежный маятник 1 изменяет свою первоначальную амплитуду (радиус) отклонения (показано пунктиром) и через рычаг 3 воздействует на задвижку 4, регулирующую поступление горючей смеси в цилиндры двигателя. Если нужно изменить нагрузку двигателя при постоянной частоте вращения, регулируют натяжение пружины 2.

Регуляторы прямого действия применяют на двигателях малой мощности. Для поворота регулирующих клапанов паровых турбин или поворот направляющего механизма гидротурбин энергии маятника недостаточно. В этом случае применяют *регуляторы косвенного действия*.

рис. 9.9. Принцип работы регулятора частоты вращения
прямого действия:

1 — датчик частоты вращения; 2 — усилитель; 3 — исполнительный механизм; 4 — двигатель; 5 — генератор.



Центробежный маятник регулятора воздействует на промежуточный механизм привода регулирующего органа первичного двигателя (серводвигатель).

Регулирование напряжения. Отклонение значения напряжения от номинального приводит к нарушению нормального режима работы приемников энергии у потребителей. Вращающий момент электродвигателя пропорционален квадрату напряжения. Чтобы двигатель при снижении напряжения продолжал нести нагрузку, должно увеличиться скольжение, то есть уменьшиться частота вращения двигателя. Но при ее падении увеличивается потребляемый электродвигателем ток, что вызывает перегрев электродвигателя. Поэтому на электрических станциях предусматривают устройства для регулирования напряжения.

Отклонения напряжения на линиях приборов рабочего освещения, установленных в производственных помещениях и общественных зданиях, где требуется значительное зрительное напряжение, а также в прожекторных установках наружного освещения допускаются в пределах от $-2,5$ до $+5\%$ номинального.

На зажимах электродвигателей и пускозащитной аппаратуры допускается отклонение напряжения в диапазоне от -5 до $+10\%$ номинального, а на зажимах остальных потребителей — на $\pm 5\%$ номинального. В малоответственных сельскохозяйственных установках допустимые отклонения напряжения составляют от $+7,5$ до $-7,5\%$.

Все рассмотренные выше схемы генераторов предполагают ручное регулирование напряжения, которое не может обеспечить надлежащего и своевременного контроля за изменением нагрузки.

Современные синхронные генераторы оборудованы автоматическими устройствами, которые не только регулируют напряжение на зажимах генераторов, но и при необходимости увеличивают возбуждение до максимального значения в момент снижения напряжения (например, при аварийных режимах). Такие устройства называют *автоматическими регуляторами возбуждения (АРВ)*.

На маломощных сельскохозяйственных станциях устройства АРВ обеспечивают запуск короткозамкнутых электродвигателей. Они способствуют более быстрому восстановлению напряжения после отключения поврежденных участков электроустановки. Благодаря этому электрические приемники, которые в момент аварии и понижения напряжения несколько притормозились, продолжают показывать номинальную частоту вращения без нарушения технологического процесса — остановки рабочей машины.

Устройства автоматического регулирования возбуждений синхронных генераторов по принципу действия могут быть подразделены на три группы: 1) автоматические регуляторы напряжения; 2) устройства быст-

родействующей релейной форсировки возбуждения и 3) устройств компаундирования.

Автоматические регуляторы напряжения. Для автоматического регулирования напряжения на генераторах сельских электрических станций применяют обычно регуляторы напряжения реостатного, вибрационного и комбинированного типов. Изготавливают также электронные регуляторы.

Среди регуляторов напряжения угольный регулятор — один из самых простых и дешевых, однако область его применения ограничена станциями малых мощностей. Это регулятор прямого действия, так как он воздействует непосредственно на возбуждение возбудителя.

Такой регулятор (рис. 9.10, а) состоит из угольного реостата 4, полупроводникового выпрямителя 1, электромагнита 6 с рычагом 2 и пружины 5. Угольные столбики реостата набраны из отдельных угольных шайб. Сопротивление этих столбиков зависит от степени сжатия шайб. Чем больше давление на столбики, тем меньше сопротивление реостата (и наоборот). Давление на угольные столбики создается тягой 3 и пружиной 5. Если электромагнит 6 включен, то якорь рычага 2 притягивается к сердечнику электромагнита, пружина 5 натягивается, а тяга 3, поднимаясь, уменьшает степень сжатия угольных шайб. Таким образом, при повышении напряжения в сети возрастает сила притяжения якоря, а следовательно, уменьшается степень сжатия шайб в угольном реостате, возрастает его сопротивление и снижается ток в цепи возбуждения возбудителя G2. Значение напряжения на зажимах генератора G1 уменьшается до номинального.

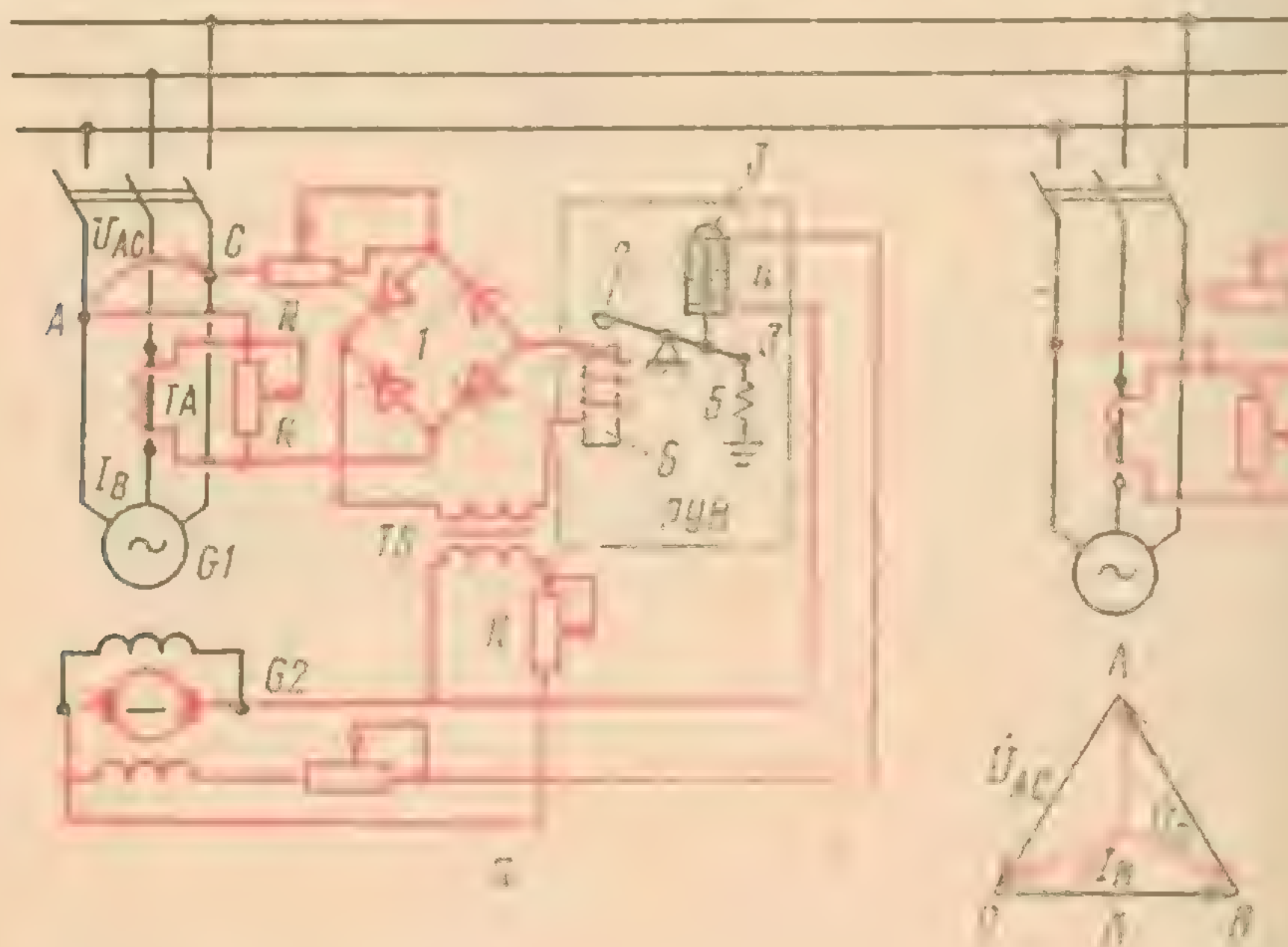


Рис. 9.10. Схема включения угольного регулятора напряжения (а) и векторная диаграмма (б), поясняющая принцип регулирования реактивной мощности:

1 — селеновый выпрямитель; 2 — рычаг; 3 — тяга; 4 — угольный реостат; 5 — пружина; 6 — электромагнит; РЭН — собственно угольный регулятор напряжения; ТЭ — стабилизирующий трансформатор; ТА — трансформатор тока.

Если нагрузка на генератор возрастает, напряжение его несколько снижается, сила притяжения электромагнита уменьшается, пружина 5 уменьшает сжатие угольных шайб в столбиках реостата и сопротивление реостата уменьшается. Поэтому усиливается ток возбуждения возбудителя и напряжение на зажимах генератора возрастает до номинального. Угольный реостат типа РУН рассчитан на номинальные напряжения 115 и 230 В.

При параллельной работе генераторов для повышения устойчивости работы агрегатов в схеме включения угольного реостата возбуждения предусматривается специальное устройство (компенсатор реактивной мощности), предупреждающее возрастание реактивной нагрузки при изменении возбуждения. Этой цели служит трансформатор тока ТА, включенный в фазу В. Вектор напряжения в этой фазе U_B сдвинут на угол 90° по отношению к вектору напряжения U_{AC} между фазами А и С (рис. 9.10, б). При $\cos \varphi = 0$, то есть если ток будет сдвинут по отношению к напряжению на 90° , во вторичной цепи трансформатора тока ТА появится ток I_B , совпадающий по направлению с напряжением U_{AC} , питающим селеновый выпрямитель, и угольный реостат возбуждения воспримет это увеличение реактивной мощности как повышение напряжения. Реостат сработает на снижение возбуждения, а следовательно, и уменьшение реактивной мощности.

Стабилизирующий трансформатор ТS предназначен для сглаживания толчков тока и напряжения в момент регулирования напряжения. Этот трансформатор выполняет роль демпфирующего устройства в период регулирования возбуждения.

Кроме угольного реостата типа РУН, применяются реостатные регуляторы — проволочным резистором, имеющим отпайки от отдельных секций. Электромагнит регулятора в зависимости от значения напряжения на зажимах генератора вызывает замыкание или размыкание контактов, которые шунтируют отдельные секции реостата, включенного в обмотку возбуждения возбудителя. Этот реостат рассчитан на ток до 2 А и состоит из десяти секций (ступеней) сопротивлением 3 Ом каждая. Такой регулятор применим для отдельно работающих генераторов мощностью до 60 кВ·А. Использовать их при параллельной работе не рекомендуется, поскольку отсутствует устройство для выравнивания реактивных мощностей. При колебаниях нагрузки от нуля до номинальной напряжение генератора отклоняется от номинального на $\pm 2,5\%$.

Вибрационные регуляторы напряжения типа АВРН предназначены для генераторов мощностью до 60 кВ·А. Точность их регулирования $\pm 5\%$ при изменении нагрузки от нуля до номинальной и колебаниях частоты тока в пределах $\pm 20\%$. Комбинированные регуляторы напряжения сочетают в себе особенности регуляторов двух первых типов.

9.5. КОМПАУНДИРОВАНИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Компаундирование возбуждения синхронного генератора — это автоматическое регулирование его напряжения, основанное на изменении тока возбуждения в зависимости от тока в статоре.

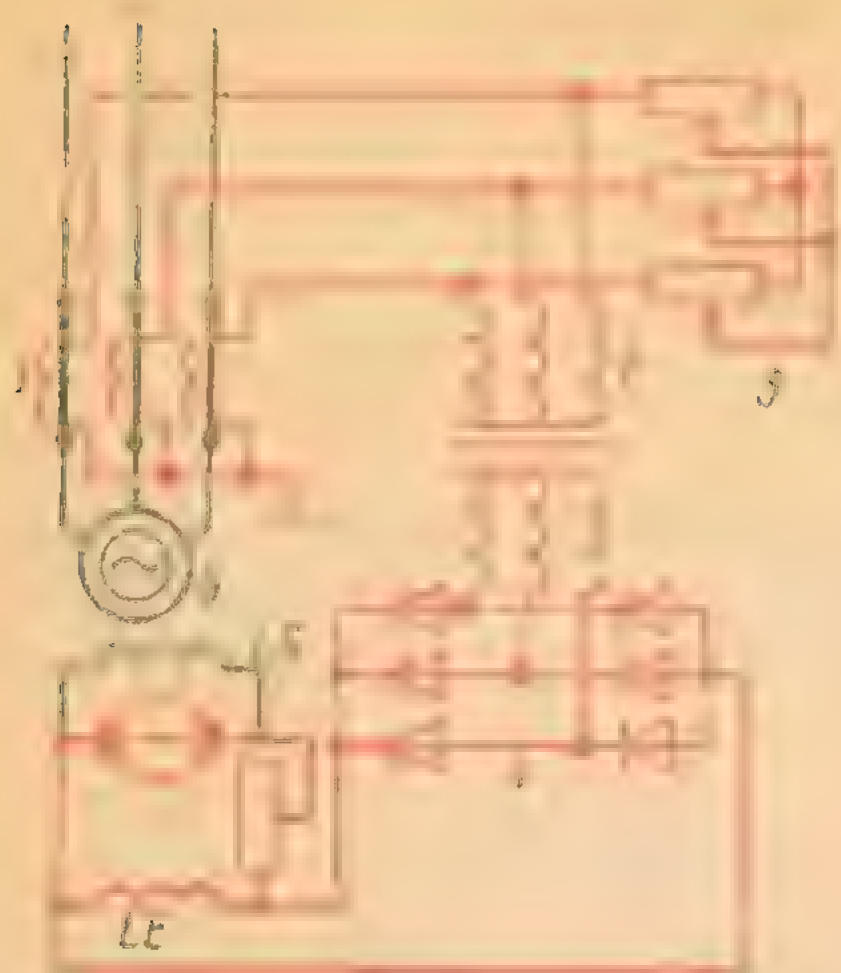


Рис. 9.11. Схема компаундирования синхронного генератора:

1 — трансформаторы тока; 2 — понижающий трансформатор; 3 — нагрузочные сопротивления; 4 — выпрямитель.

Принципиальная схема компаундирования приведена на рисунке 9.11. В силовой цепи генератора G установлены трансформаторы тока 1. Их вторичные обмотки нагружены реостатами 3 и первичной обмоткой трансформатора 2, вторичная обмотка которого питает выпрямитель 4. Подводимое к выпрямителю напряжение можно регулировать реостатами 3. Выпрямленный ток поступает в обмотку L_r

возбуждения возбудителя и является тем добавочным током, который приводит к увеличению напряжения на зажимах генератора. Чем больше ток нагрузки генератора, протекающий в его силовой цепи, тем больше выпрямленный ток, дополняющий ток возбуждения возбудителя, и тем полнее восстанавливается напряжение на зажимах генератора.

Компаундирующие устройства просты, легко настраиваются, в них отсутствуют подвижные части, контакты, нет зоны нечувствительности. Такое устройство не только улучшает внешнюю характеристику синхронного генератора благодаря увеличению тока возбуждения при росте нагрузки, но и обеспечивает форсировку возбуждения при пуске короткозамкнутых асинхронных электродвигателей соизмеримой с генератором мощности: облегчается запуск двигателя и одновременно улучшается режим напряжения для работающих ранее электродвигателей.

Компаундирующее устройство типа УКУ-3М, схема которого дана на рисунке 9.11, устанавливают на генераторах серий С и СТ мощностью до 60 кВ·А при условии, что напряжение возбудителя не более 45 В, а ток возбуждения возбудителя не превышает 4,5 А. Вторичный ток трансформатора выпрямителя регулируется в нем, однако не при помощи реостатов 3, а путем изменения площади сечения магнитопровода трансформатора. Для этой цели устройство имеет рукоятку настройки, вращая которую, изменяют вторичный ток трансформатора, а следовательно, добиваются необходимой характеристики работы.

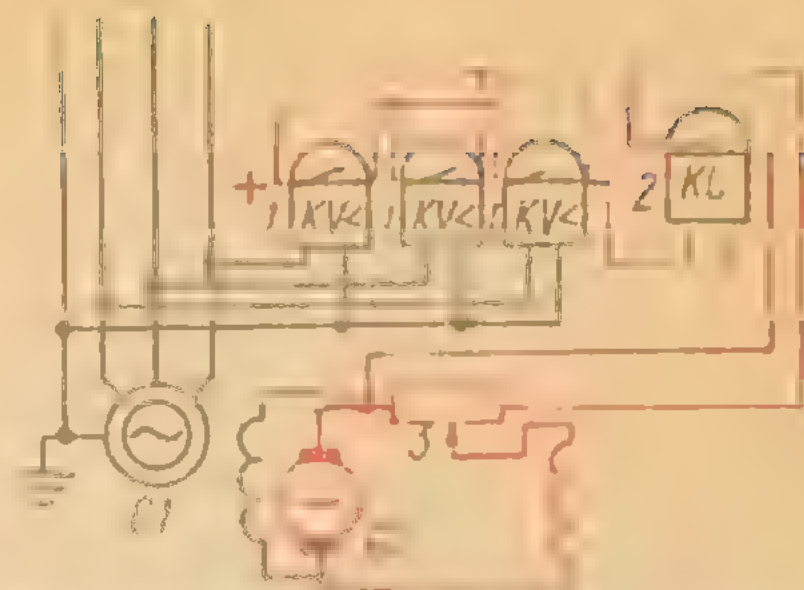
Схеме, приведенной на рисунке 9.11, присущ ряд недостатков. Наиболее существенный заключается в том, что дополнительный ток в обмотке возбуждения возбудителя пропорционален общему току в силовой цепи генератора, а не его реактивной составляющей. Поэтому схема не может обеспечить необходимого поддержания напряжения при всех изменениях нагрузки независимо от ее характера, то есть при малых $\cos \varphi$, но при тех же токах в статоре (по абсолютному значению) напряжение на зажимах генератора ниже, чем при больших $\cos \varphi$.

С целью устранения недостатков компаундирующего устройства его дополняют специальным аппаратом, получающим питание от генератора и обеспечивающим поддержание напряжения.

9.12. Схема быстродействующей релейной форсировки возбуждения:

1 — реле минимального напряжения; 2 — промежуточное реле; 3 — реостат возбуждения.

9.6. БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ РЕЛЕЙНАЯ ФОРСИРОВКА НАПЯЖЕНИЯ ВОЗБУЖДЕНИЯ



Устройства быстродействующей форсировки напряжения закорачивают шунтовой реостат регулирования тока возбуждения возбuditеля в моменты глубокого снижения напряжения, например при к.з. Этими устройствами рекомендуется оборудовать генераторы средней и большой мощности. Генераторы мощностью до 150 кВ·А, снабженные компаундирующими устройствами, в устройствах релейной форсировки возбуждения не нуждаются. Схема быстродействующей релейной форсировки возбуждения показана на рисунке 9.12. Реле 1 минимального напряжения замыкают свои контакты, как только напряжение на зажимах генератора $G1$ снизится до 85% номинального. При этом включается промежуточное реле 2, контакты которого шунтируют сопротивление реостата возбуждения 3 в обмотке возбuditеля $G2$. При восстановлении напряжения сопротивление реостата 3 снова вводится в действие.

Подобная схема работает при любых к.з. В трехфазных трехпроводных сетях схема может быть выполнена на двух реле, которые будут форсировать возбуждение при двухфазных и трехфазных к.з.

Контрольные вопросы и задания к главе 9. 1. Перечислите основные параметры генераторов электроэнергии. 2. Как осуществляется синхронизация параллельно работающих генераторов? 3. Как осуществляется регулирование частоты и напряжения на электростанции? 4. Что такое автоматическое возбуждение генераторов? 5. Как осуществляется быстродействующая релейная форсировка напряжения возбуждения? 6. Расскажите об устройстве угольного и реостатного регуляторов напряжения?

Глава 10. СИЛОВЫЕ ОДНОФАЗНЫЕ И ТРЕХФАЗНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

10.1. УСТРОЙСТВО ТРАНСФОРМАТОРА И АВТОТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатор — это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования (понижения или повышения) напряжения в сетях переменного тока.

Первый в мире трансформатор был создан русским инженером И. И. Яблочковым, который в 1876 г. выложил идею и возможности трансформации переменного тока, а в 1885 г. предложил передавать электроэнергию на значительные расстояния, используя для этой цели высокое напряжение переменного тока.

В простейшем виде трансформатор представляет собой устройство, в котором на сердечнике, собранном из листов электротехнической

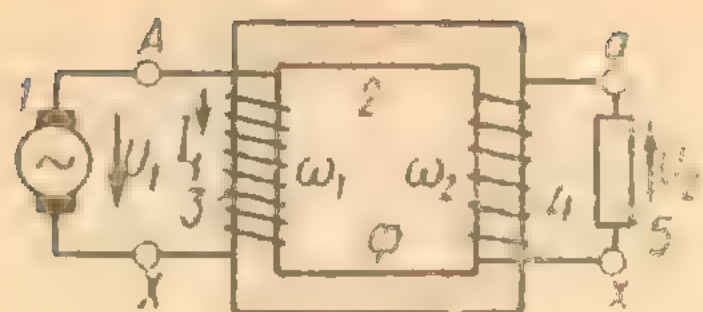


Рис. 10.1. Схема однофазного трансформатора:
1 — источник энергии — генератор; 2 — стальной сердечник;
3 — первичная обмотка; 4 — вторичная обмотка; 5 — нагрузка.

стали, намотаны две обмотки (рис. 10.1). Одна из них — первичная 3 — подключена к источнику энергии 1, к другой — вторичной 4 — присоединен потребитель — нагрузка 5.

Ток, протекающий в первичной обмотке от источника энергии, создает в сердечнике переменный магнитный поток Φ , индуктирующий во вторичной обмотке электродвижущую силу. Для любого трансформатора отношение напряжений первичной U_1 и вторичной U_2 обмоток при холостом ходе приблизительно равно отношению чисел их витков:

$$U_1/U_2 \approx \omega_1/\omega_2 = k, \quad (10.1)$$

где ω_1 и ω_2 — соответственно число витков первичной и вторичной обмоток.

Отношение (10.1) принято называть *коэффициентом трансформации*.

Если напряжение вторичной обмотки больше, чем подведенное к первичной, то трансформатор называют *повышающим*; в противном случае, когда вторичное напряжение меньше первичного, — *понижающим*. Один и тот же трансформатор можно использовать в качестве понижающего и повышающего. Значение коэффициента трансформации, указанное в паспорте трансформатора, определено как отношение высшего напряжения к низшему.

Мощности в первичной и во вторичной обмотках примерно равны между собой. Таким образом, для однофазного трансформатора

$$P = U_1 I_1 \approx U_2 I_2, \quad (10.2)$$

где I_1 и I_2 — соответственно ток в первичной и во вторичной обмотках.

Тогда коэффициент трансформации

$$k = U_1/U_2 \approx I_2/I_1. \quad (10.3)$$

Следовательно, токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны напряжениям, а значит, и числам витков. Поэтому обмотки высшего напряжения всегда делают из большего числа витков провода с меньшей площадью сечения, тогда как обмотку низшего напряжения выполняют из меньшего числа витков провода с большей площадью сечения.

По числу фаз трансформаторы разделяют на однофазные и трехфазные. По назначению различают силовые (предназначенные для передачи и распределения электрической энергии) и специальные (сварочные, измерительные, печные, испытательные, инструментальные и др.) трансформаторы. К группе специальных трансформаторов может быть отнесен и автотрансформатор.

По способу охлаждения классифицируют трансформаторы воздушным, масляным, а также с масляным и принудительным воздушным охлаждением.

Сердечники и ярма трансформаторов набирают из отдельных листов специальной электротехнической стали, хорошо проводящей магнитные потоки. Листы стали изолируют друг от друга. Это уменьшает вихревые токи в сердечнике, снижает тепловые потери энергии в нем, а вследствие этого увеличивается коэффициент полезного действия трансформатора.

Для трансформирования трехфазного тока можно использовать группу, составленную из трех однофазных трансформаторов (рис. 10.2, а), или один трехфазный трансформатор (рис. 10.2, б). Трехфазная группа однофазных трансформаторов имеет ряд существенных недостатков: громоздкость, большая масса, высокая стоимость. Поэтому такой способ трансформации применяют только при очень больших мощностях (свыше 10 тыс. кВт · А), когда конструкция трехфазного трансформатора получается излишне громоздкой.

Сердечник трехфазного трансформатора состоит из трех вертикальных стержней, которые по концам замкнуты стальными ярмами. На каждом из сердечников помещают первичную и вторичную обмотки одной из трех фаз.

Общий вид трехфазного силового трансформатора приведен на рисунке 10.3.

Автотрансформатором называют такой трансформатор, в котором первичная и вторичная обмотки объединены в общую электрическую цепь. Следовательно, число обмоток автотрансформатора вдвое меньше, чем число обмоток трансформатора; в однофазном автотрансформаторе — одна, а в трехфазном — три (на каждую фазу по одной). Таким образом добиваются уменьшения массы, размеров и стоимости автотрансформатора.

На рисунке 10.4 приведены схемы однофазного (а) и трехфазного (б) автотрансформаторов. Подобную схему имеют, например, вольтодобавочные автотрансформаторы с несколькими (до 6...8) ступенями переключения напряжения, причем каждая ступень изменяет напряжение на 2,5...4%.

Если автотрансформатор по схеме а понижающий, то первичную обмотку образуют все витки, к которым подведено напряжение U_1 сети. При этом каждый виток окажется под напряжением

$$u_v = U_1 / \omega_1, \quad (10.4)$$

где ω_1 — число витков, включенных в сеть.

Вторичное напряжение U_2 пропорционально числу витков ω_2 , с которых снимается это напряжение:

$$U_2 = u_v \omega_2.$$

Таким образом, при холостом ходе, когда потери напряжения на обмотках ничтожны, справедливо соотношение

$$U_1 / U_2 = \omega_1 / \omega_2 = k. \quad (10.5)$$

Итак, напряжение, снимаемое с автотрансформатора, есть доля первичного сетевого напряжения.

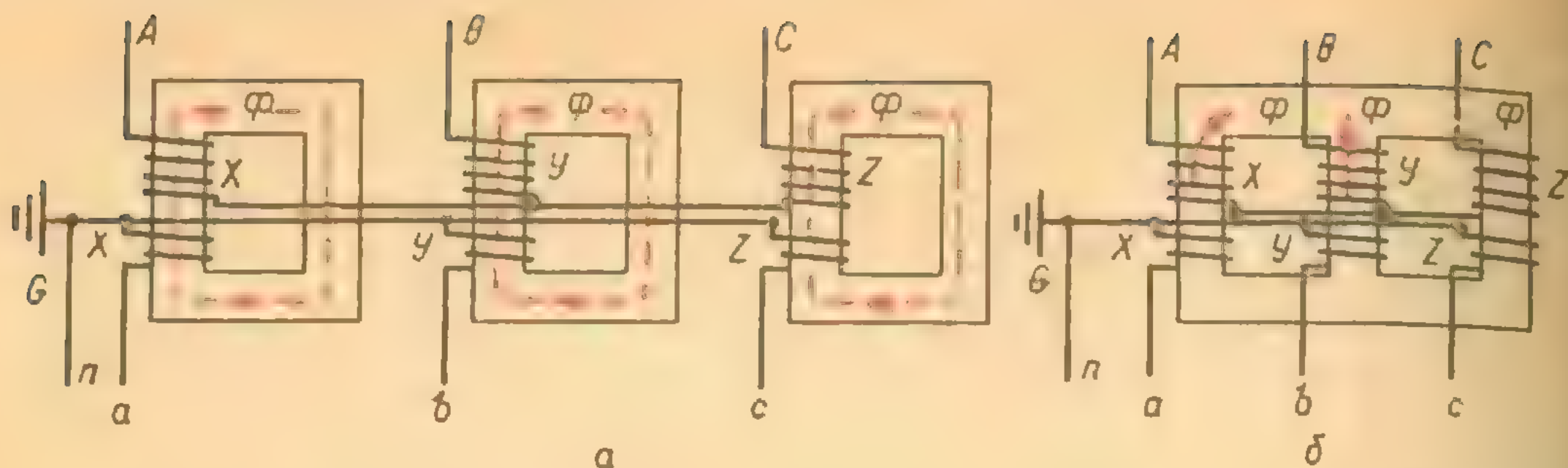


Рис. 10.2. Группа из трех однофазных трансформаторов (а) и эквивалентный им один трехфазный трансформатор (б):

А, В, С — выводы фаз высшего напряжения; а, б, с — выводы фаз низшего напряжения; н — нулевой провод (нейтраль); G — заземление.

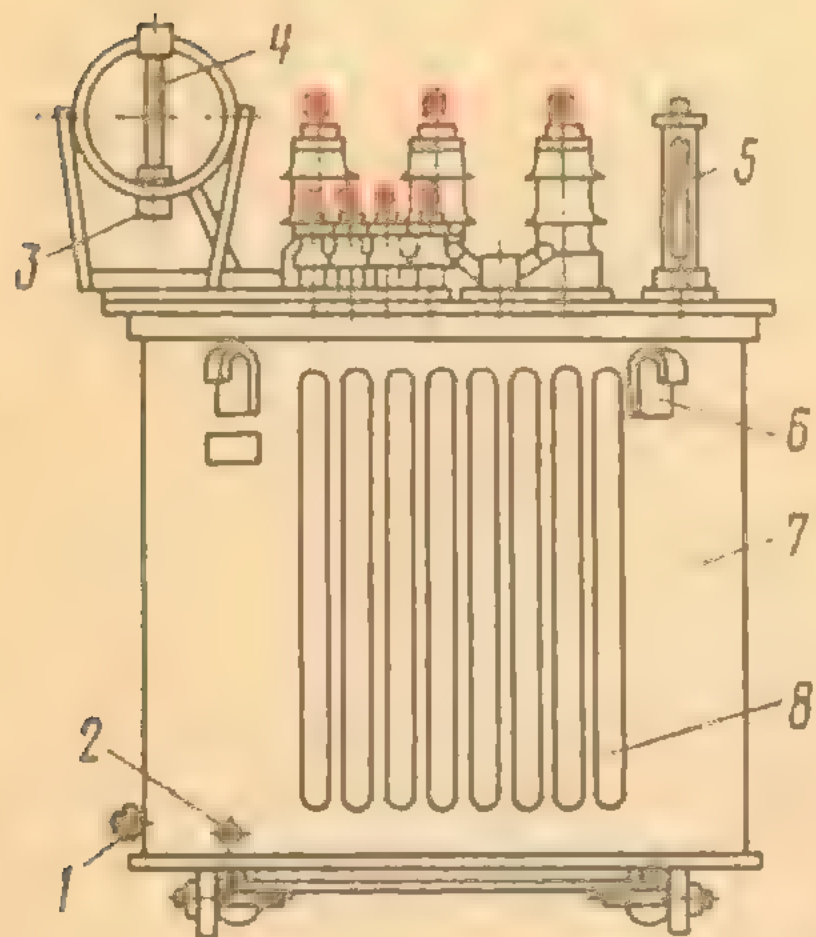


Рис. 10.3. Эскиз трехфазного силового трансформатора мощностью до 100 кВ · А и напряжением 10/0,4 кВ:

1 — болт заземления; 2 — пробка для спуска масла из бака; 3 — пробка для спуска масла из расширителя; 4 — указатель уровня масла; 5 — ртутный термометр; 6 — скоба для подъема трансформатора; 7 — бак; 8 — трубы для охлаждения масла; 9 — отверстие для доливки масла; 10 — переключатель числа витков ВН; 11 — кольцо для подъема выемной части; 12 — отверстие для взятия пробы масла.

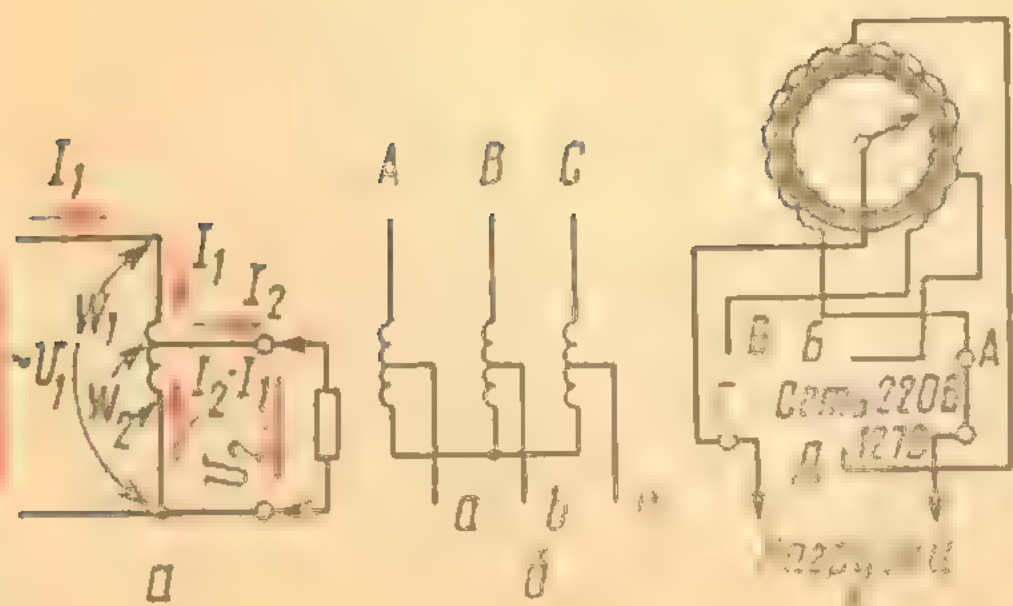
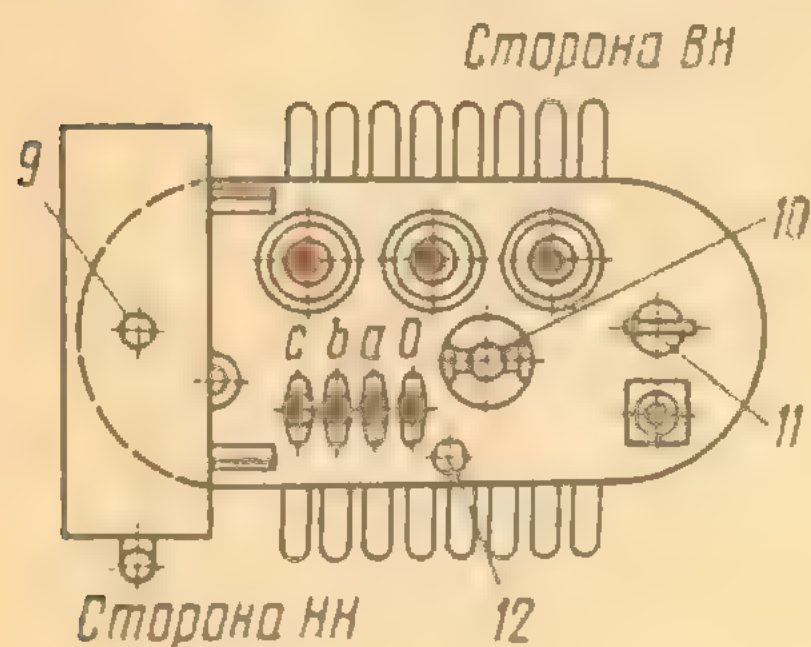


Рис. 10.4. Схемы автотрансформаторов:

а — однофазного; б — трехфазного; в — лабораторного (ЛАТРа).

В режиме нагрузки ток вторичной обмотки по правилу Ленца ослабляет своим магнитным потоком магнитный поток первичной обмотки. Поэтому ток I_2 направлен противоположно току I_1 , и в общей части обмоток он равен разности токов $I_1 - I_2$. Такое же противоположное направление имеют токи в обычном трансформаторе. Соотношение между токами, как отмечалось выше,

$$I_1/I_2 = U_2/U_1 = w_2/w_1 = \frac{1}{k}. \quad (10.6)$$

Поэтому общую часть обмотки автотрансформатора можно изготовить из провода с меньшей площадью сечения (когда коэффициент трансформации $k < 2$).

Основное преимущество автотрансформаторов перед трансформаторами — меньший расход меди и стали. Уменьшаются также тепловые потери в железе и меди. Однако автотрансформаторам свойственны и существенные недостатки. Изоляция их рассчитывается на наибольшее напряжение, так как обмотки соединены между собой, и поэтому стоимость ее высока. Выполнение условий безопасности усложняется, ибо если первичное напряжение высокое, то витки вторичной обмотки будут находиться под высоким потенциалом. Поэтому автотрансформаторы применяют, например, в тех случаях, когда необходимо преобразовать напряжение в небольших пределах. При высоких напряжениях автотрансформаторы выгоднее использовать там, где требуется изменять напряжение в 1,5...2 раза, а при низких — не более чем в 3 раза. Лабораторные автотрансформаторы (ЛАТР) применяют в лабораторной практике для плавного регулирования напряжения U_2 от 0 до 250 В (рис. 10.4, в).

Трехфазные автотрансформаторы (рис. 10.4, б) часто вводят в схемы пуска мощных двигателей переменного тока при пониженных токах. Сеть присоединяют к зажимам А, В, С, а двигатель в момент пуска — к зажимам а, б, с. После того как двигатель разовьет достаточную частоту вращения, его быстро переключают на сеть, а автотрансформатор отключают.

10.2. НОМЕНКЛАТУРА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Электропромышленность выпускает большое число типоразмеров силовых трехфазных и однофазных трансформаторов, различаемых по мощности, высшему и низшему напряжению, способу охлаждения, числу обмоток и назначению (прил. 2).

Обозначения трансформаторов, наиболее широко применяемых в сельском хозяйстве, расшифровываются так: ТМ — трехфазный с масляным естественным охлаждением, ТС — трехфазный сухой с естественным воздушным охлаждением, открытого исполнения, ТСЗ — то же, защищенного исполнения. Следующие за буквенным обозначением числа указывают мощность трансформатора в киловольт-амперах и высшее напряжение в киловольтах.

Шкала мощностей силовых трансформаторов серии ТМ: 10, 16, 25, 40, 63, 100, 160, 250, 400, 630, 1000, 1600, 2500 кВ·А и т. д.

Высшее напряжение 6 или 10 кВ, а низшее 0,69/0,4 или 0,4/0,23 кВ. Сердечник этих трансформаторов рассчитан на изготовление из рулонной трансформаторной стали, а обмотки — из алюминиевого провода.

Промышленность выпускает однофазные силовые трансформаторы типа ОМН мощностью 4 и 10 кВ·А с высшим напряжением 6 и 10 кВ, трансформаторы типа ОМ мощностью от 0,63 до 50 кВ·А с высшим напряжением 6 (10), 15 и 35 кВ и вторичным напряжением 0,115/0,23; 0,23; 0,38 кВ. Если напряжение передается по трем проводам (со средней заземленной точкой), то большее напряжение используется для включения двигателей, а меньшее — для освещения и других целей.

Для питания контрольно-измерительной аппаратуры и ламп местного освещения предназначены трансформаторы, понижающие напряжение с 220 и 380 В (высшее) до 12, 24 или 36 В (низшее). Это трансформаторы ОС, ОСА, ОСОВ, ТБС и др.

Трансформаторы разделительные (Р) однофазные (О) защищенные (З) сухие (С) типа ОСЗР мощностью 0,040 и 0,063 кВ·А (40 и 63 В·А) с естественным воздушным охлаждением (для цепей 50 и 60 Гц) предназначены для питания сверхнизким безопасным напряжением (от 12 до 42 В) ламп местного освещения, паяльников, нагревателей и других приборов.

Для целей электронагрева выпускают трансформаторы серии ОСУ или ТСУ (однофазные и трехфазные) универсальные, с алюминиевыми обмотками, со шкалой мощности от 100 до 12 кВ·А, с высшим напряжением 380 или 220 В и низшим — от 3,15 до 49 В и т. д.

Питание телевизоров и других радиоустройств, требующих стабильного напряжения, осуществляют от трансформаторов-стабилизаторов (например, ТСН-200 мощностью 200 В·А), которые называют также феррорезонансными стабилизаторами напряжения.

10.3. НОМИНАЛЬНАЯ МОЩНОСТЬ ТРАНСФОРМАТОРА

К основным параметрам трансформатора относят номинальную мощность, номинальные первичное и вторичное напряжения, коэффициент трансформации, напряжение короткого замыкания, потери холостого хода и потери короткого замыкания.

Номинальная мощность трансформатора определяется его тепловым режимом. Это та мощность, которую трансформатор может отдавать длительно при номинальных температурных условиях окружающей среды, которые регламентированы ГОСТом: максимальное значение температуры окружающей среды составляет 35°C, а среднегодовое 5°C.

Тепловой режим трансформатора, соответствующий длительно развиваемой номинальной мощности, допускает превышение температуры обмоток над температурой окружающего воздуха не более чем на 70°. При соблюдении теплового режима в рамках допустимого, а также соответствии окружающих условий номинальным температурным условиям срок службы трансформатора составляет 20 лет.

Срок службы определяется степенью старения изоляции, то есть

процессом постепенной утраты ею эластичности, механической и электрической прочности. Результатом старения изоляции чаще всего становятся короткие замыкания в обмотках трансформатора.

Нагрузочная способность трансформатора — это совокупность его допустимых нагрузок и перегрузок. Нагрузочную способность подсчитывают при номинальных условиях работы, с учетом места установки и охлаждающей среды, определяемых соответствующим стандартом. Для силовых трансформаторов общего назначения эти условия определяются ГОСТом 11677—75.

Допустимым режимом нагрузки называется режим продолжительной работы трансформатора, при которой расчетный износ изоляции обмоток от нагрева не превышает износ, соответствующий номинальному режиму работы. Если расчетный износ изоляции обмоток, соответствующий установившимся превышениям температуры, превосходит износ, соответствующий номинальному режиму работы, то такая нагрузка называется *перегрузкой*. Методы и нормы для расчета износа изоляции устанавливаются ГОСТом 14209—69 «Трансформаторы силовые масляные. Нагрузочная способность».

Нагрузочная способность трансформатора зависит от температуры окружающей среды. Если среднегодовая температура отличается от указанной ГОСТом температуры на 5°, то номинальная мощность трансформатора (кВ·А) в данных условиях может быть пересчитана по формуле

$$S = S_{\text{н.пасп}} \left(1 + \frac{5 - T}{100} \right), \quad (10.7)$$

где $S_{\text{н.пасп}}$ — номинальная мощность трансформатора, указанная в его паспорте, кВ·А;
 T — среднегодовая температура окружающей среды в данном климатическом районе, °С.

В аварийных случаях допускаются кратковременные перегрузки трансформаторов. Значение перегрузки и допустимое время действия данной перегрузки независимо от температуры окружающего воздуха (но не выше 35°C) указаны в таблице 10.1.

10.1. Допустимые кратковременные перегрузки трансформаторов

Значение перегрузки (% номинальной мощности)	Допустимая продолжительность перегрузки трансформаторов		Значение перегрузки (% номинальной мощности)	Допустимая продолжительность перегрузки трансформаторов	
	масляных	сухих		масляных	сухих
30	2 ч	45 мин	100	10 мин	—
60	45 мин	5 »	120	1,5 »	—
75	20 »	—			

Трансформаторы с масляной системой охлаждения при коэффициенте нагрузки не более 0,93 допускают также аварийную перегрузку в течение 5 суток на 40% сверх номинального тока на время максимумов нагрузки общей продолжительностью не более 6 ч в сутки при включении вентиляторов дутья, резервных радиаторов и охладителей.

10.4. НОМИНАЛЬНЫЕ ПЕРВИЧНОЕ И ВТОРИЧНОЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Номинальным первичным напряжением трансформатора называют такое напряжение, которое необходимо подвести к его первичной обмотке, чтобы на зажимах разомкнутой вторичной обмотки получить вторичное напряжение, указанное в паспорте трансформатора.

Номинальным вторичным напряжением называют напряжение, которое устанавливается на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе трансформатора, когда к зажимам первичной обмотки подведено номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута.

Напряжение на вторичной обмотке в режиме нагрузки отличается от напряжения на той же обмотке в режиме холостого хода, так как ток нагрузки создает падение напряжения на активном и индуктивном сопротивлениях обмотки. Это изменение вторичного напряжения зависит не только от значения тока и сопротивлений обмотки, но и от коэффициента мощности нагрузки. Если трансформатор нагружен чисто активной мощностью (рис. 10.5, а), то напряжение в сравнении с другими вариантами изменяется в меньших пределах. На векторной диаграмме $\dot{E}_2$ — ЭДС во вторичной обмотке трансформатора. Вектор вторичного напряжения равен геометрической разности:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - I_2 Z_{\text{тр}}, \quad (10.8)$$

где I_2 — вектор тока во вторичной обмотке; $Z_{\text{тр}}$ — полное сопротивление вторичной обмотки трансформатора, $Z_{\text{тр}} = \sqrt{R_{\text{тр}}^2 + X_{\text{тр}}^2}$; $R_{\text{тр}}$, $X_{\text{тр}}$ — соответственно активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки.

При индуктивной нагрузке и при том же самом значении тока напряжение снижается в большей степени (рис. 10.5, б). Это связано с тем, что вектор $I_2 X_{\text{тр}}$, отстающий от тока на 90° , в этом случае более круто повернут навстречу вектору $\dot{E}_2$, чем в предыдущем.

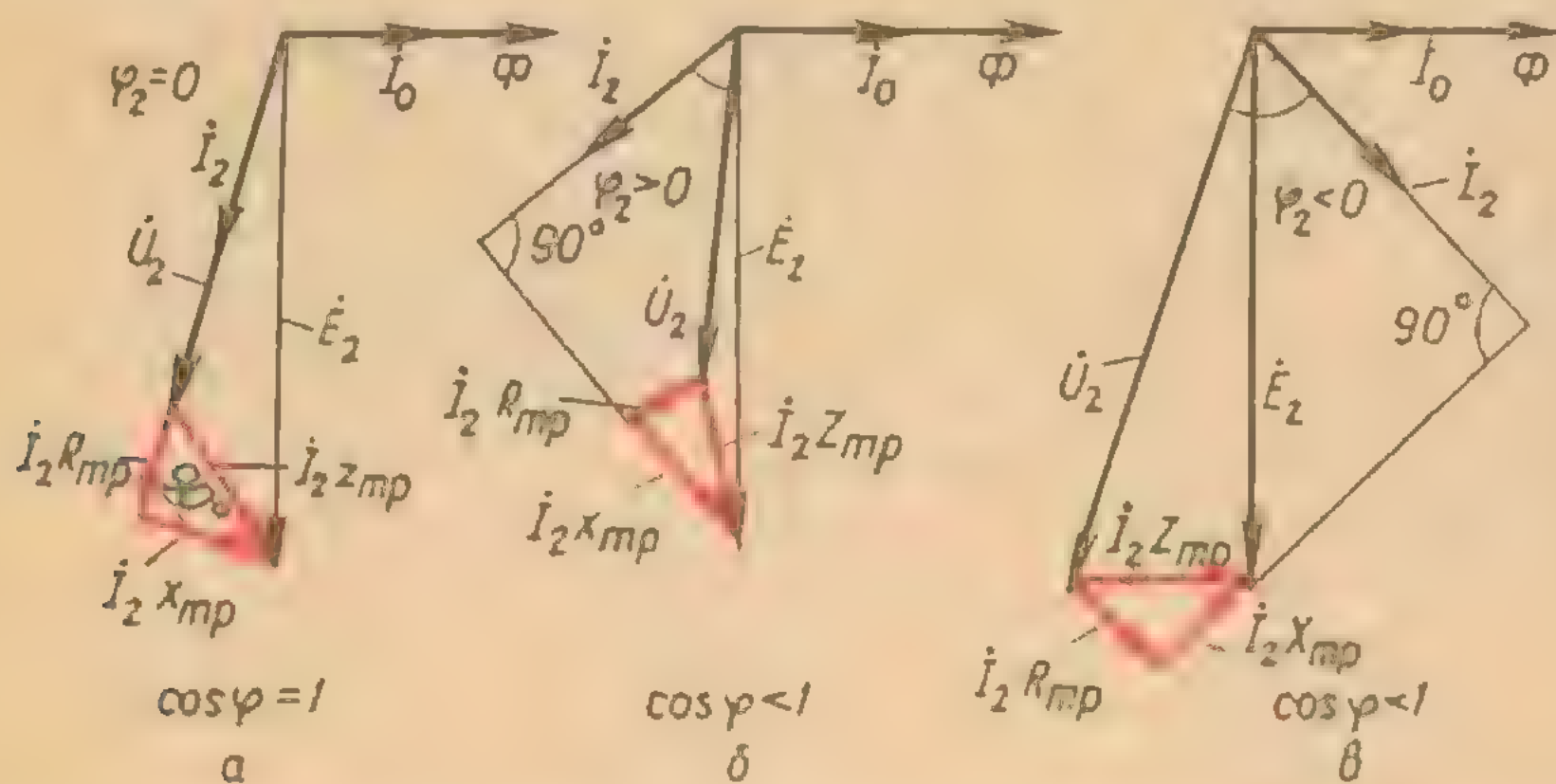


Рис. 10.5. Изменение вторичного напряжения трансформатора в зависимости от коэффициента мощности нагрузки:

а — при активной нагрузке; б — при индуктивной нагрузке; в — при емкостной нагрузке; I_2 — ток во вторичной обмотке (ток нагрузки); $Z_{\text{тр}}$, $R_{\text{тр}}$ и $X_{\text{тр}}$ — полное, активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки ($Z_{\text{тр}} = \sqrt{R_{\text{тр}}^2 + X_{\text{тр}}^2}$).

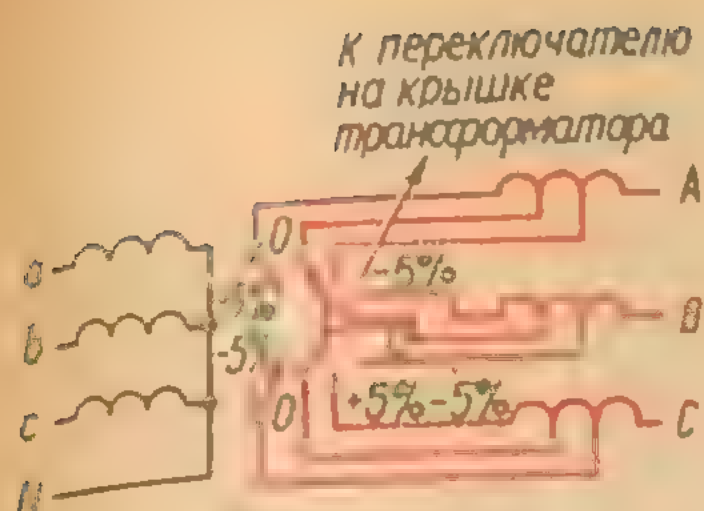


Рис. 10.6. Схема отводов от части витков для изменения коэффициента трансформации на $\pm 5\%$.

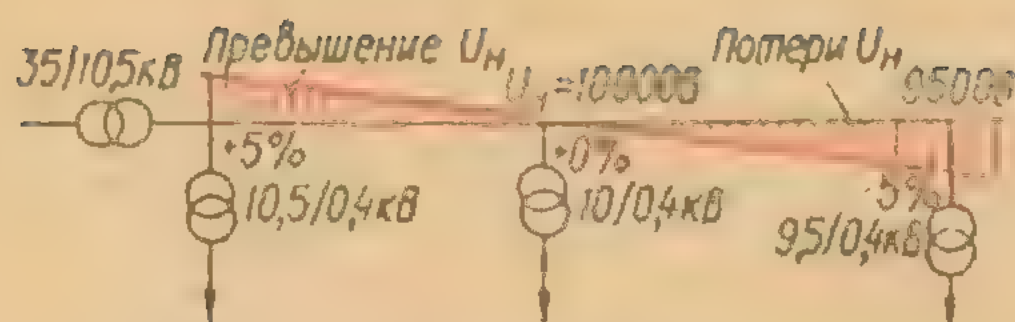


Рис. 10.7. Выбор положения переключателя витков трансформатора ($+5\%$, 0% , -5%) в зависимости от удаленности потребительской трансформаторной подстанции от питающей районной подстанции.

При емкостной нагрузке увеличение тока нагрузки вызывает повышение напряжения на обмотке трансформатора (рис. 10.5, в). Здесь вектор $I_2 X_{1p}$, равный аналогичному вектору в первых двух случаях и также отстающий от тока на 90° , благодаря емкостному характеру этого тока оказывается повернутым вдоль вектора $\dot{E}_2$ и увеличивает $\dot{U}_2$ по сравнению с $\dot{E}_2$.

В процессе эксплуатации возникает необходимость регулирования напряжения. Для этого изменяют число рабочих витков обмотки высокого напряжения, изменяя коэффициент трансформации в пределах от ± 5 до $\pm 7,5\%$ номинального значения.

Схема отводов от обмоток с простым переключением приведена на рисунке 10.6. В паспорте такого трансформатора указывают минимальное, номинальное и максимальное значения напряжения. Если, например, номинальное вторичное напряжение трансформатора равно 10 000 В, то максимальное напряжение $1,05 U_n = 10 500$ В, а минимальное $0,95 U_n = 9500$ В.

Число витков обмотки высшего напряжения изменяют при помощи специального переключателя, контакты которого находятся внутри трансформатора, а рукоятка выведена на его крышку.

Обычно для трансформаторов, которые устанавливают вблизи районной понизительной подстанции 35/10 кВ или повысительной 0,4/10 кВ, коэффициент трансформации принимают равным 1,05 k , то есть ставят переключатель в положение $+5\%$. Если потребительская подстанция удалена от районной, в линии электропередачи возникает значительная потеря напряжения, поэтому переключатель ставят в положение -5% . Трансформатор в средней точке линии электропередачи устанавливают на номинальный коэффициент трансформации (рис. 10.7).

Для автоматической стабилизации вторичного напряжения под нагрузкой применяются стабилизаторы напряжения типа СТС на 10, 16, 25, 40, 63, 100 кВ·А. По способу стабилизации они могут быть со стабилизацией по трем фазным напряжениям 220 В или со стабилизацией по трем линейным напряжениям. Они обеспечивают стабильность напряжения в пределах $\pm 1,5\%$ номинального при изменении напряжения питающей сети от $+10$ до -15% от номинального. Схема управления стабилизаторами выполнена на полупроводниковых элементах.

Для регулирования напряжения трансформаторы снабжены устройствами ПБВ или РПН. ПБВ означает: переключение обмоток без возбуждения, то есть при выключенном трансформаторе. Отпайки от обмоток сделаны с таким расчетом, чтобы можно было регулировать напряжение в пределах от -5 до $+5\%$ через каждые $2,5\%$. РПН означает: регулирование напряжения под нагрузкой (автоматическое). В этом случае напряжение изменяют в пределах от $-7,5$ до $+7,5\%$ шестью ступенями или через каждые $2,5\%$. Такими устройствами можно оборудовать трансформаторы мощностью от $160 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ и выше.

10.5. ОПЫТЫ ХОЛОСТОГО ХОДА И КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Точное значение коэффициента трансформации представляет собой отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения независимо от того, какая из обмоток первичная и какая вторичная.

Опыт холостого хода (рис. 10.8, а) используют для определения коэффициента трансформации. При этом обмотку низшего напряжения подключают к устройству (потенциал — регулятор), позволяющему в широких пределах изменять напряжение, подводимое к трансформатору, а обмотку высшего напряжения размыкают.

С целью определения коэффициента трансформации к обмотке низшего напряжения достаточно подвести напряжение $0,1 U_n$ для трансформаторов малой мощности и $(0,33 \dots 0,5) U_n$ для трансформаторов большой мощности. Падение напряжения в первичной обмотке весьма мало. С допустимой точностью можно принять, что $E_1 = U_1$ и $E_2 = U_2$, так как ток во вторичной обмотке практически равен нулю и на ней нет потери напряжения.

Из опыта холостого хода трансформатора определяют также зависимости тока холостого хода I_x , потребляемой мощности P_x и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от значения подводимого напряжения U_1 при разомкнутой вторичной обмотке, то есть при $I_2 = 0$. Ток холостого хода силовых трансформаторов составляет от 10 (для маломощных трансформаторов) до 2% (для мощных трансформаторов) номинального. При снятии характеристик холостого хода подводимое напряжение изменяют в пределах от $0,6$ до $1,2 U_n$ таким образом, чтобы полу-

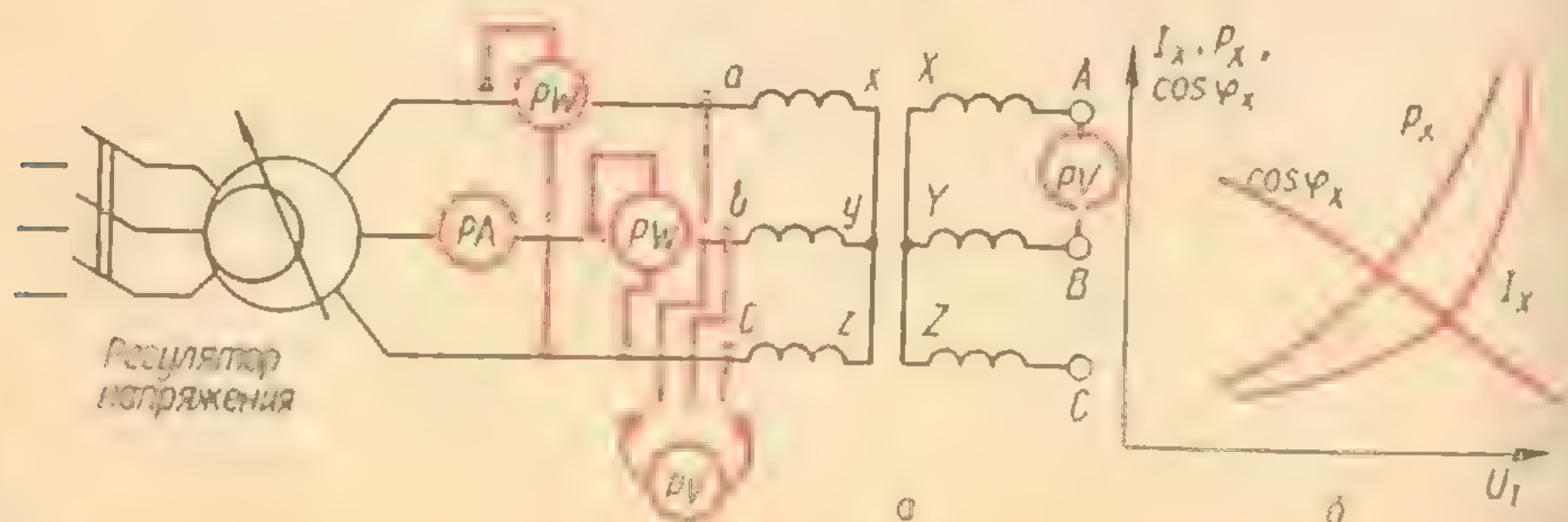


Рис. 10.8. Опыт холостого хода трансформатора:
а — схема опыта; б — характеристики

чить 6...7 показаний. На рисунке 10.8, б дан примерный вид характеристик холостого хода.

Мощность холостого хода характеризует электрическую энергию, расходуемую в самом трансформаторе, так как со вторичной обмотки энергию при этом не потребляют. Энергия в трансформаторе расходуется на нагрев обмоток проходящим по ним током и нагрев стали сердечника (вихревые токи и гистерезис). Потери на нагрев обмоток (потери в обмотках) при холостом ходе ничтожно малы. Практически можно считать, что все потери холостого хода сосредоточены в стали сердечника и идут на его нагрев.

Коэффициент мощности трансформатора определяют по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P_0}{3U_{x\phi}I_x}, \quad (10.9)$$

где P_0 — полная мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе (сумма показаний двух ваттметров, приведенных на рисунке 11.8, а); $U_{x\phi}$ и I_x — средние значения фазных напряжения и тока.

Опыт короткого замыкания проводят по схеме, изображенной на рисунке 10.9, а. К обмотке низшего напряжения подводят напряжение, при котором в обмотке высшего напряжения, замкнутой накоротко, протекает номинальный ток. Это напряжение называют *напряжением короткого замыкания*, U_K ; его значение приводят в паспорте трансформатора в процентах номинального.

Так как в этом опыте из-за малого напряжения, подведенного к обмотке низшего напряжения, магнитный поток в сердечнике весьма незначителен и сердечник не нагревается, то считают, что вся потребляемая трансформатором при опыте короткого замыкания мощность затрачивается на электрические потери в проводах обмоток.

Характеристики короткого замыкания (рис. 10.9, б) представляют собой зависимости потребляемого тока I_K , мощности P_K и коэффициента мощности $\cos \varphi_K$ от подведенного напряжения при замкнутой вторичной обмотке. Значение подводимого напряжения находится в пределах 5...10% номинального.

Коэффициент мощности определяют так:

$$\cos \varphi_K = \frac{P_K}{3U_K I_K}. \quad (10.10)$$

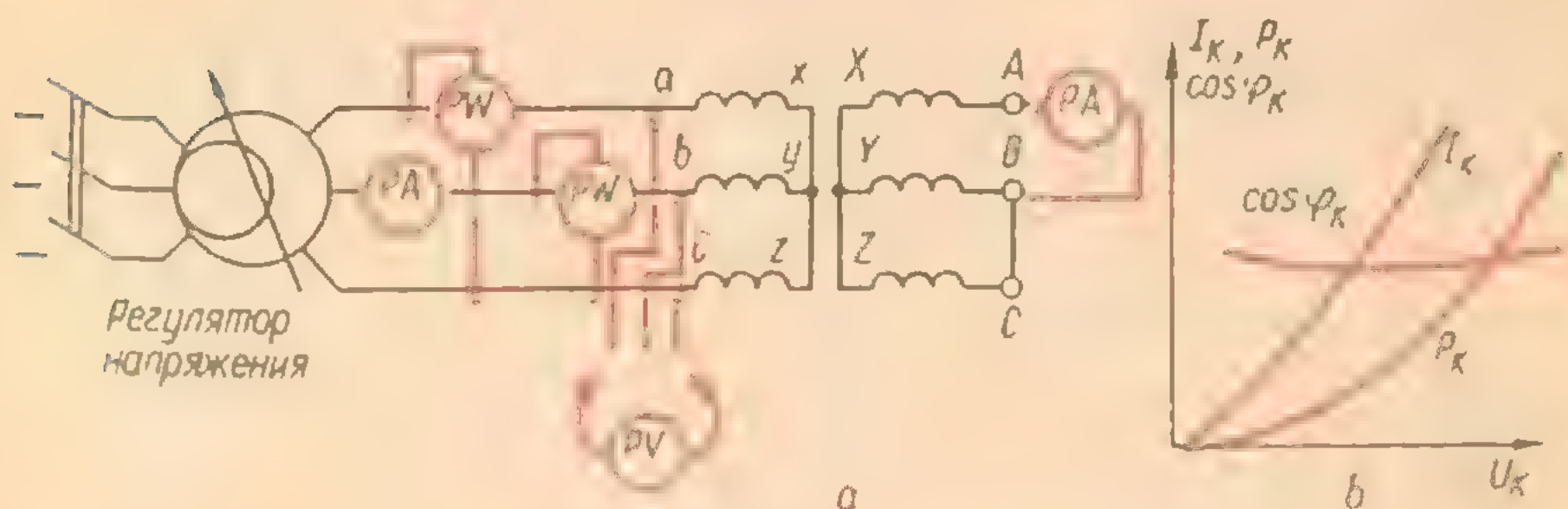


Рис. 10.9. Опыт короткого замыкания трансформатора:
а — схема опыта; б — характеристики.

Сумма показаний ваттметров дает значение потерь в трансформаторе, которые вызывают нагрев обмоток. Мощность, показываемая ваттметром,

$$P_{\kappa} = P_{\kappa 1} + P_{\kappa 2} = 3I_1^2 R_1 + 3I_2^2 R_2, \quad (10.11)$$

где R_1 и R_2 — сопротивления первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Напряжение короткого замыкания, при котором во вторичной обмотке протекает ток, равный номинальному, выражают в процентах номинального:

$$e_{\kappa} \% = \frac{U_{\kappa.ф}}{U_{н.ф}} 100. \quad (10.12)$$

Напряжение короткого замыкания — важная характеристика трансформатора. По этой величине делают вывод о возможности параллельной работы трансформаторов, по ней и ее составляющим определяют изменения вторичного напряжения трансформатора при изменении нагрузки. Используя эту величину, находят ток короткого замыкания в условиях эксплуатации.

10.6. КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Коэффициент полезного действия трансформатора определяют по следующей формуле:

$$\eta = \frac{k_1 S_n \cos \varphi_2}{k_1 S_n \cos \varphi_2 + P_{\kappa} + k_1^2 P_{\kappa}}, \quad (10.13)$$

где $k_1 = I_2 / I_{2н}$ — коэффициент загрузки трансформатора, равный отношению действительной нагрузки к номинальной (отношению токов во вторичной обмотке); S_n — номинальная мощность трансформатора, кВ·А; P_{κ} — потери в стали, равные мощности холостого хода трансформатора при номинальном напряжении. Потери в стали при номинальной нагрузке практически остаются такими же, поскольку индукция в сердечнике изменяется незначительно; P_{κ} — потери короткого замыкания при номинальном токе и температуре обмоток 75°C. Эти потери пропорциональны квадрату тока, а следовательно, и k_1^2 , то есть они переменные, а потери в стали — постоянные.

Если проанализировать формулу (10.13), то окажется, что коэффициент полезного действия максимален, когда постоянные потери трансформатора равны переменным. Но так как в практике трансформаторы не всегда загружены полностью, полагают при их расчете, что средняя их нагрузка равна 50...70% номинальной, и принимают отношение $P_{\kappa} / P_{\kappa} = 0,25...0,5$. В этом случае коэффициент загрузки, при котором КПД максимальный,

$$k_1 (\eta = \max) = \sqrt{P_{\kappa} / P_{\kappa}} = 0,5...0,7. \quad (10.14)$$

10.7. ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

В зависимости от способа соединения обмоток трансформаторы различают по группам и схемам соединений.

Группой соединения называют комбинацию схем соединения обмоток высшего и низшего напряжений. Группа соединения показывает (по

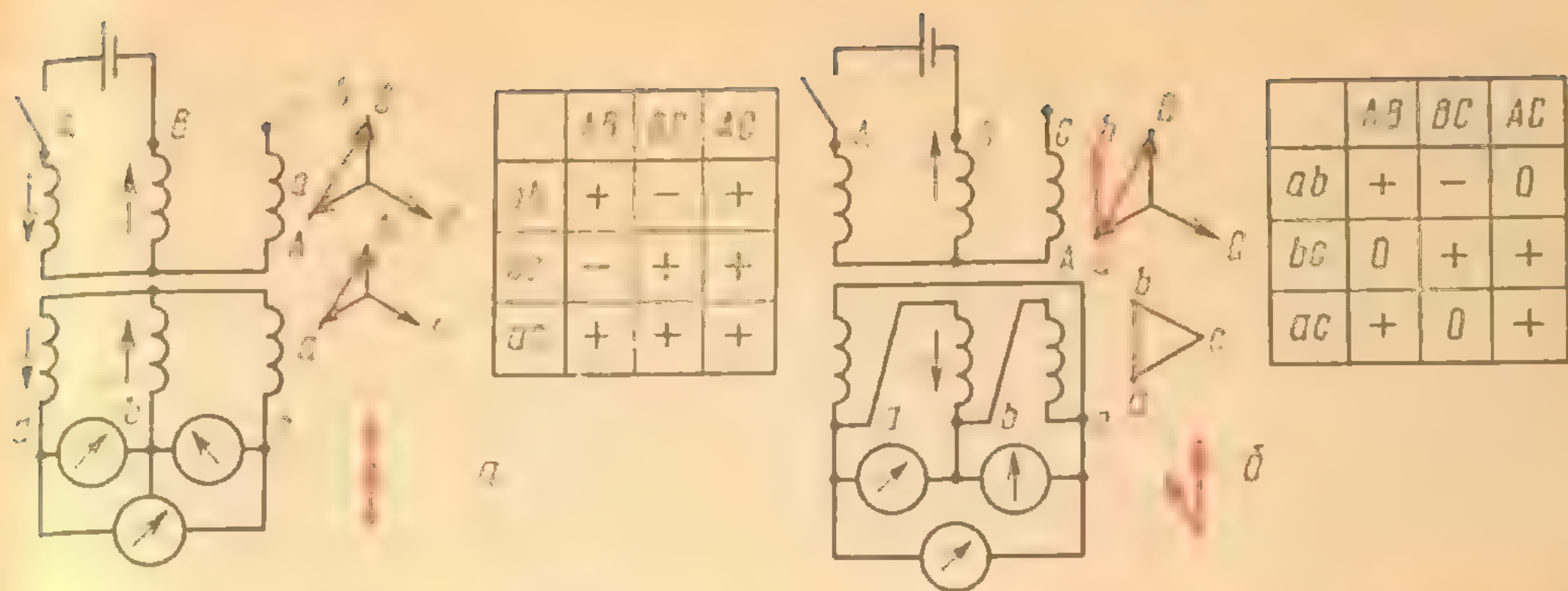


рис. 10.10. Схемы и таблицы для проверки группы соединений обмоток трехфазных трансформаторов:

а — для группы 12; б — для группы 11

аналогии с взаимным расположением стрелок на часах — часовой и минутной) взаимное расположение векторов линейного низшего напряжения по отношению к векторам линейного высшего напряжения в каждой фазе. Вектор высшего напряжения принимают за минутную стрелку и устанавливают против цифры 12 (0), а вектор низшего напряжения принимают за часовую стрелку.

Это возможно в том случае, если витки первичной и вторичной обмоток имеют одинаковое направление укладки: совпадают по направлению векторы $\dot{U}_1$ и $\dot{U}_2$. Если же витки одной, например первичной, обмотки имеют левое направление укладки, а вторичной — правое, то векторы первичного и вторичного напряжений направлены в разные стороны, как часовые стрелки в 6 ч.

Схемы соединения «звезда — звезда — нуль» (понижительные потребительские трансформаторы), «звезда — треугольник» и «звезда — нуль — треугольник» (повысительные трансформаторы) нашли наибольшее распространение из всех возможных способов соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов. Это три первых случая в таблице, приведенной в приложении 1.

Часто бывает необходимо определить группу соединения обмоток. Наиболее прост способ определения с применением источника постоянного тока напряжением 2...4 В. Сначала источник постоянного тока подключают на импульс к зажимам А и В с соблюдением полярности, указанной на схеме (рис. 10.10). К зажимам обмотки низшего напряжения ab , bc и ac поочередно подключают гальванометр постоянного тока с нулевым отсчетом посередине шкалы и записывают знак отклонения прибора в момент замыкания обмотки высшего напряжения на источник тока. Отклонение стрелки вправо отмечено знаком плюс, влево — знаком минус, отсутствие отклонения — нулем. Затем постоянный ток подводят к зажимам ВС и АС и полностью заполняют табличку отклонений гальванометра. Каждой группе соединения обмоток соответствует своя таблица отклонений гальванометра, как это показано на рисунке 10.10, а и б.

Один из существенных недостатков трехфазного потребительского

трансформатора со схемой соединения «звезда — звезда — нуль» — повышенный износ отдельных фаз при несимметричной нагрузке, в частности при преобладании бытовой и осветительной нагрузок.

Поэтому признано целесообразным при несимметричной нагрузке применять схему соединения «звезда — зигзаг — нуль» (нижняя в табл. 10.2). Обмотка каждой фазы низшего напряжения состоит из двух половин, расположенных на разных сердечниках. Поэтому при несимметричной нагрузке на фазы магнитный поток распределяется в магнитопроводе более равномерно, чем при схеме «звезда». При этом значительно уменьшается и несимметрия напряжений, являющаяся причиной неравномерной нагрузки фаз.

10.8. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

При переменном графике нагрузки экономически выгодной может оказаться установка на подстанции двух (реже — более двух) трансформаторов, которые работают на общую сеть. При небольшой нагрузке в сеть включают один трансформатор, а при возрастании нагрузки — и другой.

Параллельная работа трансформаторов возможна, если соблюдены следующие требования: 1) номинальные первичные и вторичные напряжения равны; 2) трансформаторы имеют одинаковые группы соединения обмоток; 3) напряжения короткого замыкания трансформаторов равны. Рекомендуется также, чтобы отношение номинальных мощностей трансформаторов не превышало 3 : 1.

При несоблюдении первого и второго требований в цепи вторичных обмоток появляются большие уравнительные токи, которые вызывают ненужный нагрев и потери. При несоблюдении третьего и четвертого требований трансформаторы будут неравномерно (непропорционально) нагружаться; следовательно, параллельная работа будет невозможной.

При установке трансформатора для параллельной работы с другим его фазируют, то есть определяют одноименные фазы на низшем напряжении, включив в сеть его обмотку высшего напряжения (рис. 10.11). Сначала попарно определяют концы обмоток низшего напряжения, между которыми нет разницы в напряжении. Затем измеряют напряжение между каждым из концов одной фазируемой

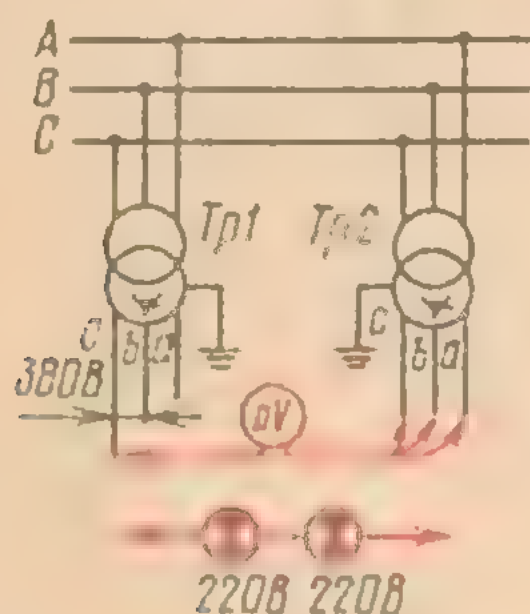


Рис. 10.11. Схема фазировки двух трансформаторов при напряжении до 380 В.

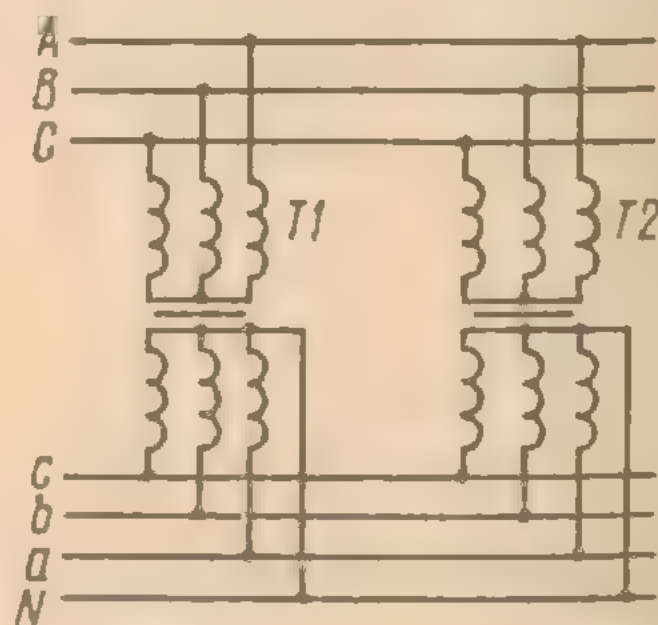


Рис. 10.12. Схема включения двух трансформаторов на параллельную работу.

стороны и двумя разноименными концами другой стороны (всего шесть измерений). Эти напряжения тоже должны быть одинаковыми. При напряжении вторичной стороны до 380 В для фазировки используют вольтметр или две последовательно соединенные лампы, рассчитанные на фазное напряжение. С целью получения замкнутого электрического контура нейтральные точки вторичных обмоток соединяют. У трансформаторов без заземленной нейтрали соединяют два одноименных зажима. Высоковольтные обмотки фазируют с использованием трансформаторов напряжения.

На рисунке 10.12 показана принципиальная схема включения трансформаторов на параллельную работу.

Контрольные вопросы и задания к главе 10. 1. Для чего предназначаются трансформаторы? 2. Перечислите основные типы трансформаторов? 3. Что такое шкала стандартных мощностей? 4. В каких единицах измеряется мощность трансформатора? 5. Перечислите основные параметры трансформатора. 6. Как регулируют напряжение у трансформаторов? 7. Для какой цели проводят опыт холостого хода и короткого замыкания трансформатора? 8. Как определить КПД трансформатора? 9. Какие вы знаете группы соединения обмоток трансформаторов? 10. При каких условиях возможна параллельная работа трансформаторов? 11. Объясните устройство автотрансформатора.

Глава 11. ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

11.1. УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

В зависимости от принципа действия электроизмерительных приборов различают различные системы их устройства.

Приборы электромагнитной системы, нашедшие наибольшее применение для технических измерений, используются для измерений в цепях переменного и постоянного токов. Принцип действия прибора электромагнитной системы основан на свойстве катушки 1 (рис. 11.1), включенной в цепь тока, втягивать стальной якорь — сердечник, который выполнен в виде пластинки 2, связанной с указателем — стрелкой 3. Угол отклонения стрелки, а следовательно, и показания прибора зависят от значения измеряемого тока или напряжения.

Катушка вольтметра обычно имеет большое число витков тонкого изолированного провода. Чтобы увеличить внутреннее сопротивление прибора, последовательно с катушкой включен добавочный резистор, встроенный в корпус прибора. Вольтметры предназначаются для измерения напряжения между фазами сети на клеммах электроприбора, их включают параллельно источнику тока или электроприбору.

Амперметр, который предназначен для измерения силы тока в электрической цепи, включают последовательно с токоприемником. Поэтому обмотку амперметра выполняют из более толстого провода с малым внутренним сопротивлением. Нельзя включать амперметр параллельно источнику тока! Прибор может выйти из строя или из-за перегорания обмотки, или от повреждения стрелки при ее сильном отклонении за пределы шкалы.

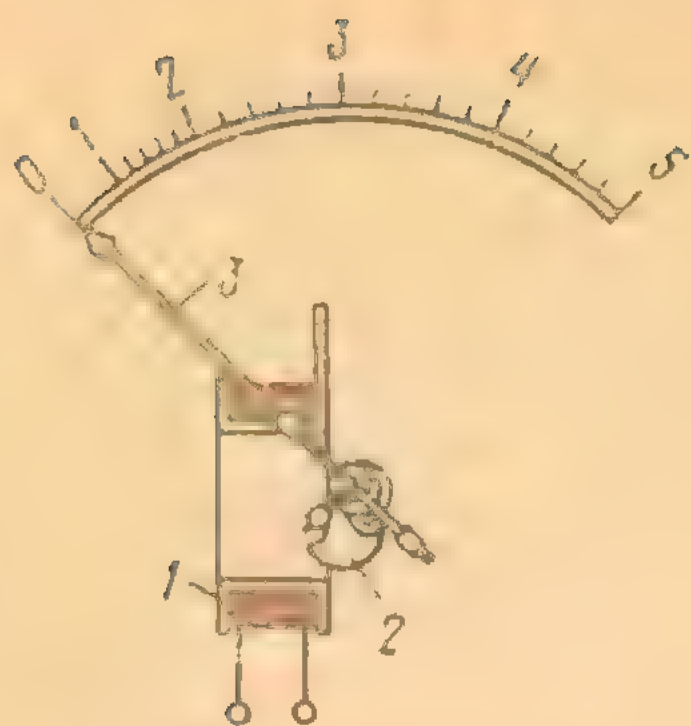


Рис. 11.1. Схема устройства прибора электромагнитной системы:

1 — катушка; 2 — стальная пластинка (лепесток); 3 — стрелка.

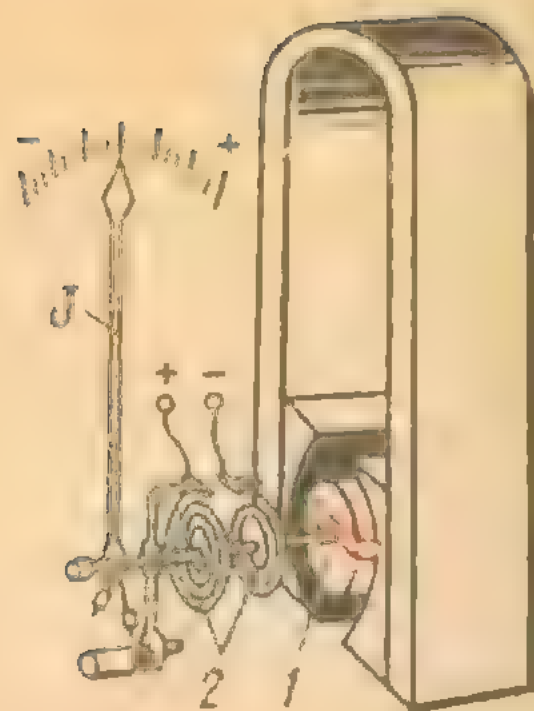


Рис. 11.2. Схема устройства магнитоэлектрического прибора:

1 — катушка; 2 — токопроводящие пружины; 3 — стрелка.

Вольтметры и амперметры магнитоэлектрической системы можно использовать только в цепях постоянного тока. Принцип их устройства показан на рисунке 11.2. Постоянный магнит создает постоянное магнитное поле, в котором находится катушка, связанная со стрелкой прибора. При включении катушки 1 в цепь постоянного тока вокруг нее образуется магнитное поле, которое взаимодействует с магнитным полем постоянного магнита и вызывает отклонение стрелки вправо или влево (в зависимости от направления тока в катушке). При включении такого прибора в цепь переменного тока стрелка 3 не успевает следовать за изменением направления тока. Она вибрирует около нуля. При этом обмотка прибора может перегореть.

Приборы выпрямительной системы, представляющие собой комбинацию магнитоэлектрического механизма и выпрямителя, могут применяться для измерения в цепях переменного и постоянного токов частотой до 10 кГц.

Выпрямительные приборы дают точные показания только при синусоидальной форме кривой тока или напряжения. Если форма кривой искажена, то для приборов этой системы характерна погрешность. С целью уменьшения температурных и частотных влияний в схемы вводят специальные компенсаторы.

Приборы термоэлектрической системы представляют собой комбинацию весьма чувствительного магнитоэлектрического механизма и термопары, которая реагирует на степень нагрева элемента, проводящего ток, и вызывает отклонение стрелки магнитоэлектрического измерительного механизма.

Приборы электродинамической системы, в частности ваттметры, имеют две катушки — подвижную и неподвижную. Одна из них включена параллельно нагрузке, другая — последовательно с ней. Прибор имеет четыре зажима — от каждой катушки по два. Чтобы правильно включить прибор, конец последовательной (токовой) обмотки прибора, который должен быть соединен с цепью со стороны источника тока, обозначают звездочкой. Звездочкой также маркируют

конец параллельной обмотки (обмотки напряжения), который должен быть соединен с токовой обмоткой (рис. 11.3).

Ваттметр показывает только активную мощность, потребляемую нагрузкой H независимо от силы общего тока, который определяется и активной и реактивной составляющими. Рассмотрим некоторые варианты нагрузки.

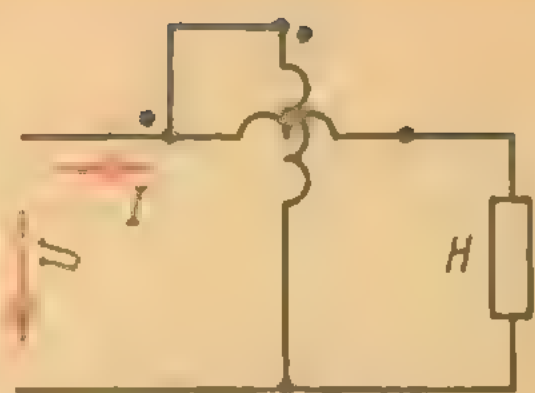


Рис. 11.3. Схема включения ваттметра.

1. *Чисто активная нагрузка* — в цепь переменного тока включен резистор R (рис. 11.4, а). Вектор тока нагрузки совпадает по фазе с вектором напряжения источника. Коэффициент мощности равен единице ($\cos \varphi = 1$). Ваттметр показывает значение мощности P (Вт), амперметр — силу тока I , вольтметр — значение напряжения U . При этом

$$P = UI \cos \varphi = UI.$$

2. *Чисто индуктивная нагрузка* (идеальный случай) — в цепь переменного тока включен лишь индуктивный элемент X_L (рис. 11.4, б). Вектор тока нагрузки отстает от вектора напряжения источника на угол 90° , то есть $\cos \varphi = \cos 90^\circ = 0$. Ваттметр показывает нулевое значение:

$$P = UI \cos \varphi = UI \cdot 0 = 0.$$

Произведение же показаний вольтметра U и показаний амперметра I дает реактивную мощность (вар):

$$Q_L = UI.$$

3. *Смешанная нагрузка* — в цепь включены резистивный R и индуктивный X_L элементы (рис. 11.4, в). Общий ток I представляет собой геометрическую сумму активного I_a и индуктивного I_L токов. Коэффициент мощности $\cos \varphi$ больше нуля, но меньше единицы. Ваттметр покажет значение мощности (Вт) $P = UI \cos \varphi = UI_a$.

Произведение показаний вольтметра на показания амперметра даст значение полной мощности (В · А):

$$S = UI.$$

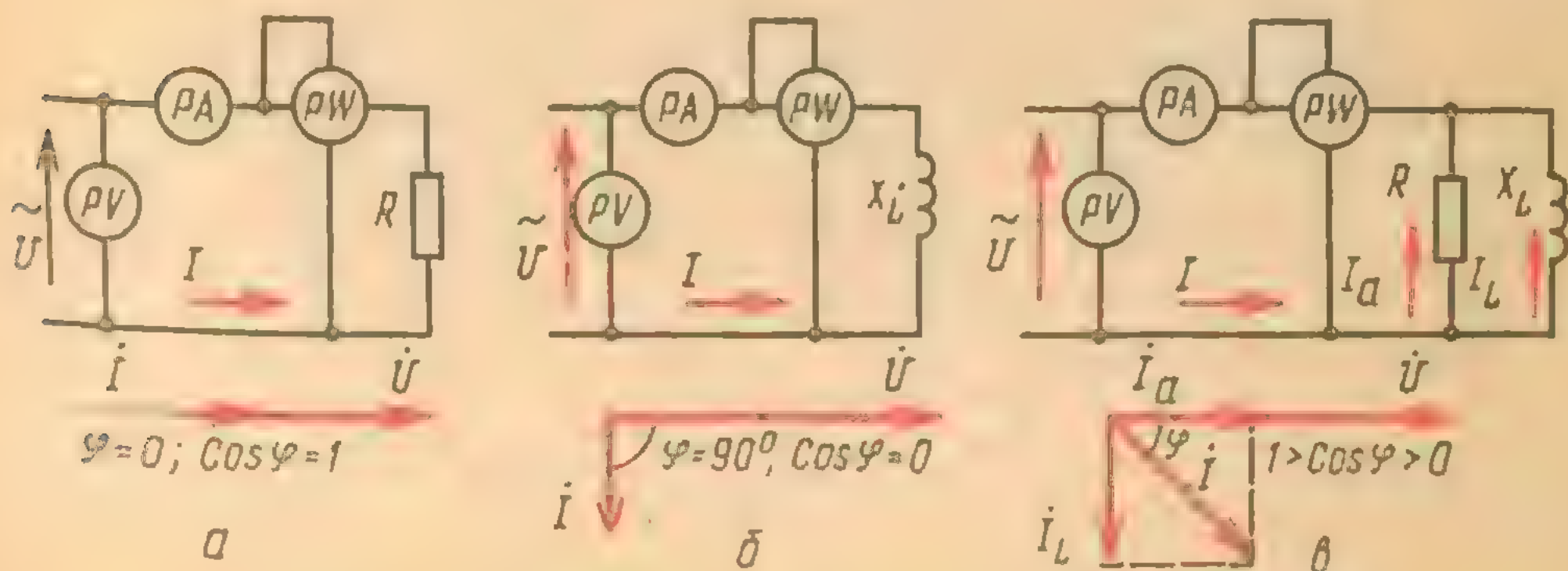


Рис. 11.4. Измерение мощности в схемах с различным характером нагрузки: а — активная нагрузка; б — индуктивная нагрузка; в — смешанная активно-индуктивная нагрузка.

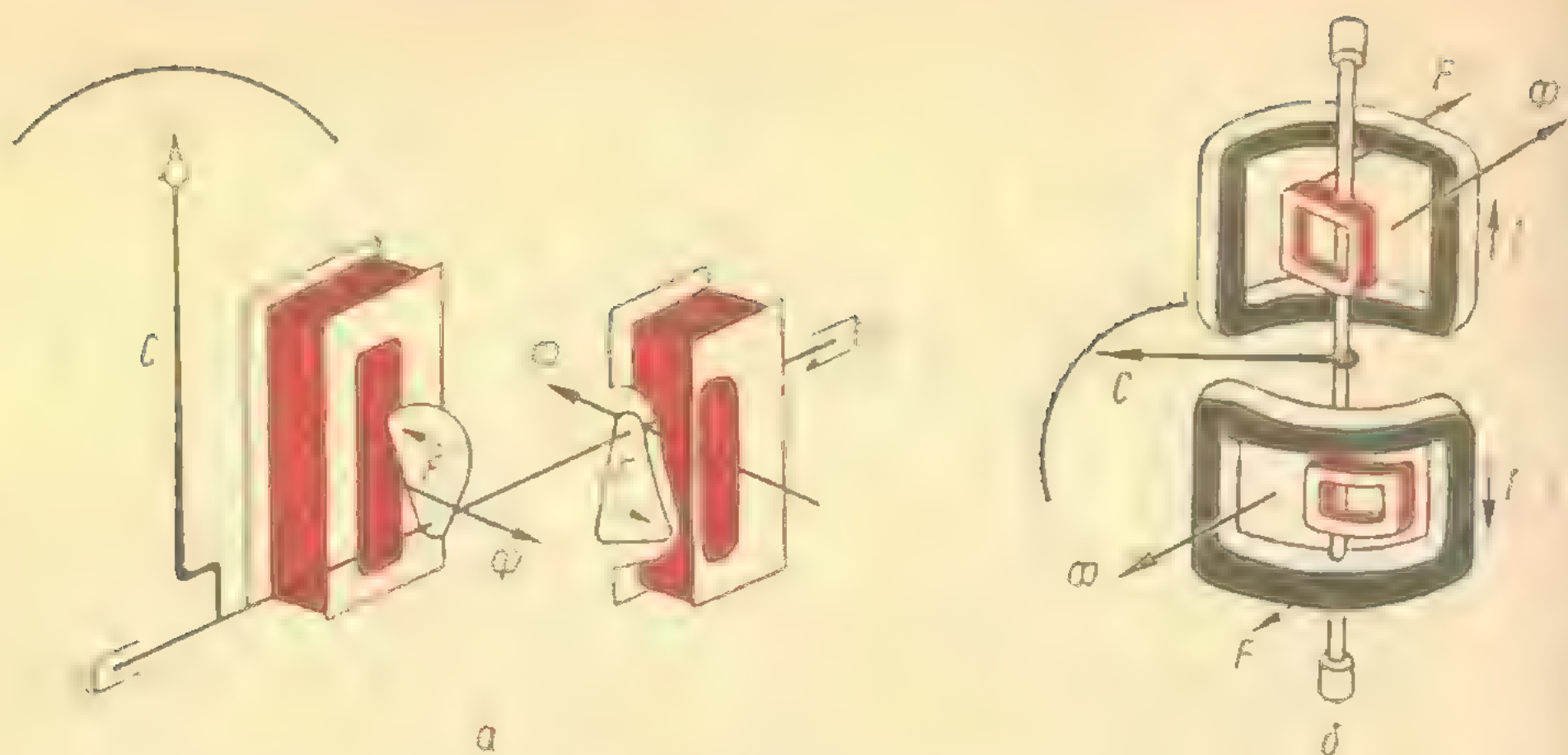


Рис. 11.5. Схема устройства аstaticеского прибора:

а — электромагнитной системы; б — электродинамической системы; Φ — магнитный поток катушки; F — вращающий момент; C — стрелка.

Реактивная мощность (вар) может быть подсчитана по формуле:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}.$$

Случай 3 наиболее характерен для производственных условий, так как активный и индуктивный токи потребляют все токоприемники, в которых создаются электромагнитные поля: электрические двигатели, трансформаторы, генераторы и т. д.

Механизмы аstaticеского устройства. Приборы электромагнитной и электродинамической систем (последние в большей степени) подвержены влиянию внешних магнитных полей, искажающих действительные результаты и вносящих погрешности в измерения.

Для уменьшения влияния внешних магнитных полей приборы экранируют — измерительную систему помещают в кожухи и корпуса из стали или применяют специальные механизмы аstaticеского устройства (АСТ). Такие приборы предназначены для точных лабораторных измерений.

На рисунке 11.5 показано устройство аstaticеского механизма электромагнитной (а) и электродинамической (б) систем. По сути дела здесь имеются два измерительных механизма, воздействующих на общую ось. Катушки включены так, что их магнитные поля направлены в разные стороны, но вращающие моменты, приложенные к стрелке, направлены в одну сторону. В таком приборе при воздействии внешнего магнитного поля поле одной катушки усиливается, а поле второй катушки ослабляется. Таким образом, результирующее действие внешнего магнитного поля компенсируется, становится равным нулю.

Счетчик электрической энергии индукционной системы показан на рисунке 11.6. Счетчик имеет две обмотки — параллельную 2, включенную на напряжение, и последовательную 1, через которую протекает ток, потребляемый электроприборами.

Магнитные потоки Φ от последовательной и параллельной об-

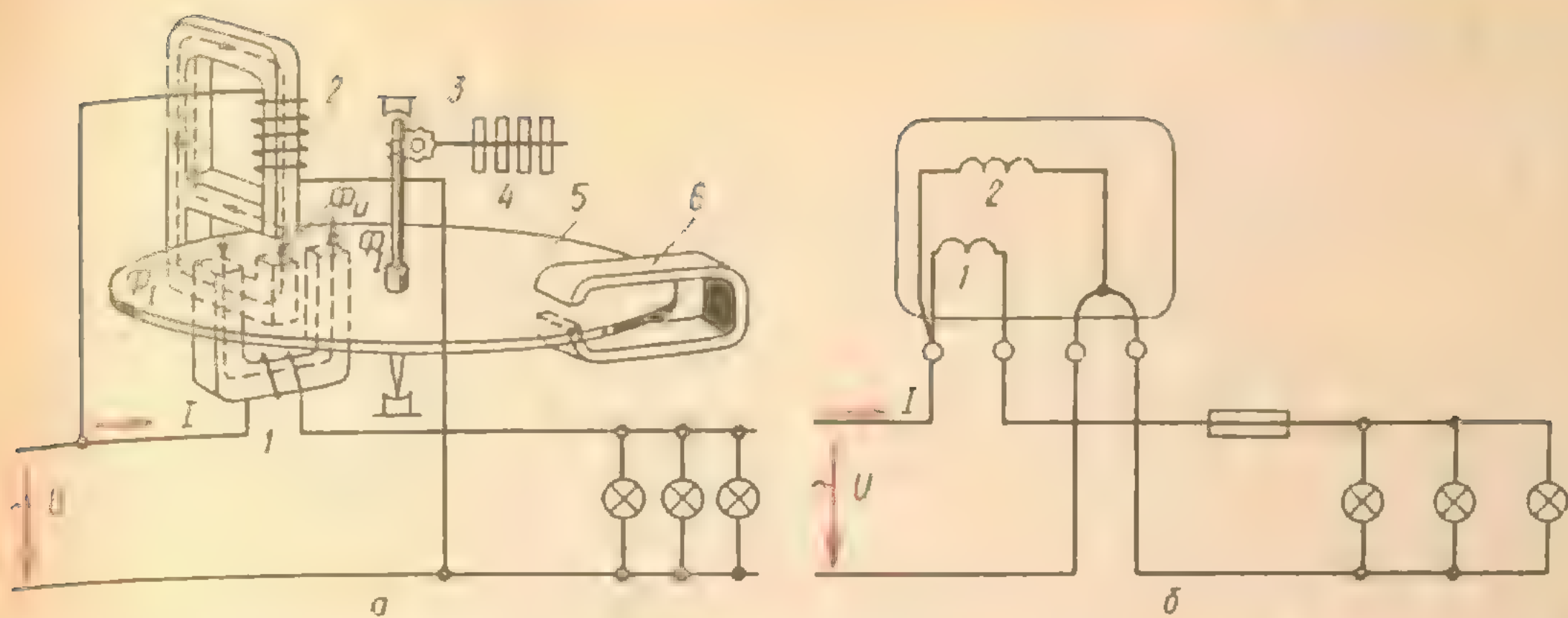


Рис. 11.6. Схемы устройства (а) и включения (б) счетчика:

1 — обмотка тока; 2 — обмотка напряжения; 3 — червячный механизм; 4 — счетный механизм; 5 — алюминиевый диск; 6 — магнит для притормаживания диска.

моток пересекают край алюминиевого диска 5, в котором наводятся местные вихревые токи, порождающие в нем магнитные поля. Последние, взаимодействуя с основными магнитными потоками, приводят диск во вращение. Число оборотов диска регистрируется счетным механизмом 4, который дает отсчет энергии в киловатт-часах или в гектоватт-часах.

Магнит 6 предназначен для торможения диска при выключенной нагрузке. Диск пересекает магнитное поле постоянного магнита и вокруг места пересечения диска магнитными линиями возникает вихревой ток, порождающий магнитный поток, который, взаимодействуя с полем магнита, препятствует вращению диска.

Внутреннее сопротивление амперметра, а также последовательной катушки ваттметра или счетчика ориентировочно принимается не менее чем на два порядка (в 100 раз) меньше сопротивления нагрузки, а внутреннее сопротивление вольтметра (параллельной катушки ваттметра или счетчика) — не менее чем на два порядка больше сопротивления нагрузки.

Существуют также приборы электростатической, ферродинамической, электронной систем.

11.2. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА ШКАЛАХ ЩИТОВЫХ И ПЕРЕНОСНЫХ ПРИБОРОВ

Практика эксплуатации электрических установок всегда связана с измерением таких электрических величин, как напряжение, сила тока, сопротивление, мощность, энергия и частота. Измерения позволяют определить качество и количество электроэнергии, узнать, соблюдаются ли установленные режимы и правильно ли ведется эксплуатация электроустановки, а также учесть расход электрической энергии.

Электроизмерительные приборы, применяемые в сельскохозяйственных установках, могут быть разделены на две основные группы: щитовые и переносные.

Щитовые приборы устанавливают на силовых щитах и щитках сельских электроустановок. Они предназначены для контроля за эксплуатацией установок.

Переносные приборы используют для технических (эксплуатационных) и лабораторных измерений, причем в последнем случае применяют более точные приборы.

Вновь изготавливаемые приборы градуируют, а находящиеся в эксплуатации поверяют при помощи образцовых приборов в специализированных лабораториях. Образцовые приборы, в свою очередь, поверяют по эталонным приборам. Щитовые приборы принято поверять один раз в 3...5 лет, переносные лабораторные — один раз в 2 года, образцовые — один раз в год.

Точность измерений характеризуется допустимой погрешностью измерений. Различают абсолютную и относительную погрешности.

Абсолютная погрешность

$$\Delta A = A_{\text{изм}} - A_{\text{д}}, \quad (11.1)$$

где $A_{\text{изм}}$ — показания прибора при измерении величины; $A_{\text{д}}$ — действительное значение величины (может быть измерено эталонным прибором).

Относительная погрешность

$$\Delta A \% = \frac{\Delta A}{A_{\text{н}}} 100 = \frac{A_{\text{изм}} - A_{\text{д}}}{A_{\text{н}}} 100. \quad (11.2)$$

Приведенная относительная погрешность прибора

$$\beta \% = \frac{\Delta A}{A_{\text{н}}} 100 = \frac{A_{\text{изм}} - A_{\text{д}}}{A_{\text{н}}} 100\%, \quad (11.3)$$

где $A_{\text{н}}$ — номинальное значение шкалы прибора, то есть его верхний предел измерений.

По приведенной относительной погрешности все приборы подразделяют на следующие классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Цифра, характеризующая класс точности, показывает, какую наибольшую погрешность (в процентах от номинального значения шкалы) может дать прибор при измерениях.

В таблице 11.1 приведены условные обозначения систем приборов и дана их краткая характеристика.

На шкалах приборов условными знаками указывают сведения, которые необходимо знать о приборе для того, чтобы правильно его эксплуатировать (табл. 11.2).

По защищенности от влияния внешней среды приборы разделяют на брызгозащищенные (Бз), водозащищенные (Вз), герметические (Гм), газозащищенные (Гз), пылезащищенные (Пз), взрывобезопасные (Вб).

По устойчивости к механическим воздействиям приборы делят на обыкновенные (ОП), тряскопрочные (ТП), вибропрочные (ВП), нечувствительные к тряске (ТН), нечувствительные к вибрации (ВН), ударопрочные (УП). Тряскопрочными, вибропрочными и ударопрочными считают приборы, способные противостоять соответствующим механическим воздействиям и продолжать выполнять свои функции после их прекращения. Нечувствительные к тряске и вибрации

11.1. Классификация приборов

Система прибора	Условное обозначение	Род тока	Применяются для измерения	Характеристика
Магнитоэлектрическая		Постоянный	Силы тока и напряжения	Наиболее точные и чувствительные из всех остальных. Шкала равномерная
Электромагнитная		Постоянный и переменный	Силы тока, напряжения, сдвига и чередования фаз	Самые прочные и дешевые. Шкала неравномерная, начинается от 20% полной шкалы. Большая перегрузочная способность
Электродинамическая		Постоянный и переменный	Силы тока, напряжения, мощности, сдвига фаз, энергии постоянного тока	Наиболее точные приборы переменного тока. Шкала неравномерная, начинается от 10...15% номинального значения
Ферродинамическая		Переменный	Силы тока, напряжения, мощности, сдвига фаз	Менее точны. Низкая чувствительность. Большое собственное потребление. Сильный вращающий момент
Индукционная		Переменный	Электрической энергии	Сильный вращающий момент. Чувствительные к колебаниям частоты и температуры. Значительная перегрузочная способность. Большое собственное потребление

Продолжение

Система прибора	Условное обозначение	Род тока	Применяются для измерения	Характеристика
Электростатическая		Постоянный и переменный	Напряжения	Очень большое внутреннее сопротивление. Применяют для измерения напряжения в цепях с маломощными источниками тока
Вибрационная (резонансная)		Переменный	Частоты	—
Выпрямительная		Переменный	Силы тока, напряжения, мощности, частоты	Низкая точность. Пригодны к измерениям в широком диапазоне частот (до 40 кГц)
Электронная		Переменный	Напряжения	Большое входное (внутреннее) сопротивление. Нечувствительны к колебаниям частоты
Термоэлектрическая		Переменный и постоянный	Силы тока	Низкая точность

11.2. Условные обозначения на шкалах электронизмерительных приборов

Условный знак	Значение условного знака
1,5	Класс точности прибора
—	Прибор предназначен для работы в цепи постоянного тока
~	Предназначен для работы в цепи переменного тока
⎓	Может использоваться в цепях постоянного и переменного тока
⏚	Предназначен для работы в цепи трехфазного тока
50Hz	Нормально работает при частоте 50 Гц
┐	Правильно показывает при вертикальном положении
└	Правильно показывает при горизонтальном положении
△60°	Правильно показывает в наклонном положении (под углом 60°)
☆ ₂	Изоляция прибора испытана на 2 кВ
⚡	Предостерегающий знак высокого напряжения (знак красного цвета)
Б	Предназначен для установки в сухих неотапливаемых помещениях
В ₁ , В ₂	Для полевых и морских условий
Т	Для условий тропического климата (сухого и влажного)
Ш	Категория защищенности от внешних магнитных полей

Условный знак	Значение условного знака
—	Обозначения зажимов на приборах: отрицательный зажим
+	положительный зажим
~	зажим переменного тока
✕	общий зажим для многопредельных приборов, а также генераторный зажим для ваттметров и других приборов
⊥	зажим, соединенный с корпусом
⏏	зажим (винт) для заземления

приборы способны выполнять свои функции в условиях этих воздействий.

По характеру использования приборы разделяют на стационарные, переносные и транспортные (для передвижных установок).

Имеется ряд и других признаков классификации, в частности, по размеру корпуса различают миниатюрные приборы, приборы малого, среднего и большого габаритов.

11.3. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА

В цепях переменного тока наибольшее распространение для технических измерений нашли приборы типа Э электромагнитной системы, с классом точности 1,5...2,5, а для измерений в цепях постоянного тока — приборы типа М и других типов магнитоэлектрической системы.

Вольтметры включают в сеть или непосредственно (рис. 11.7, а

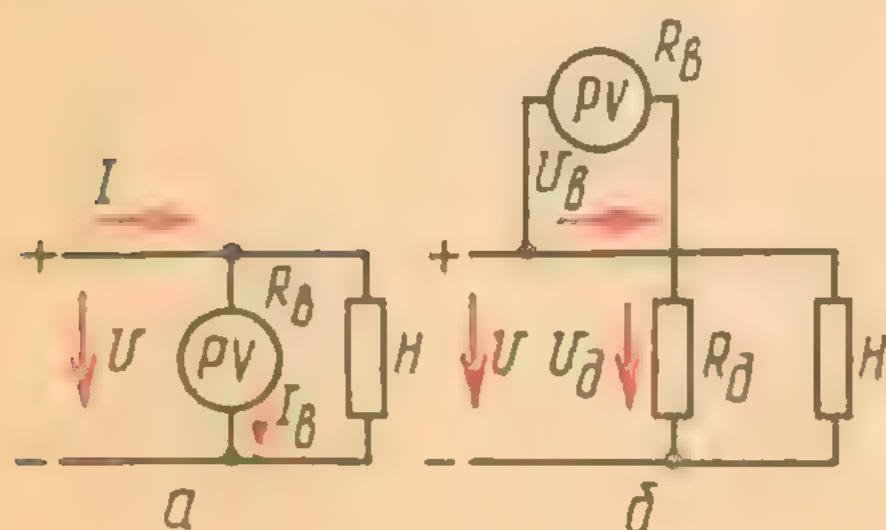


Рис. 11.7. Включение вольтметров постоянного тока:

а — непосредственно ($U = U_B = I_B R_B$); б — с добавочным сопротивлением $R_d = R_B(m - 1)$, где $m = U / U_B$, $U = U_B + U_d$. H — нагрузка.

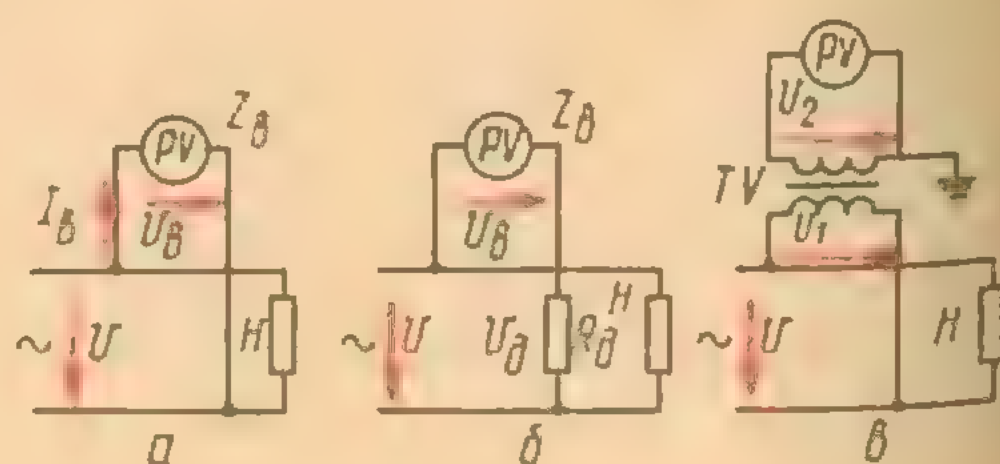


Рис. 11.8. Включение вольтметров переменного тока:

а — непосредственно ($U = U_B = I_B Z_B$); б — с добавочным сопротивлением ($U = U_B + U_d$); в — с измерительным трансформатором TV ($U = U_1$; $U = k_{TV} U_B$, где $k_{TV} = U_1 / U_2$).

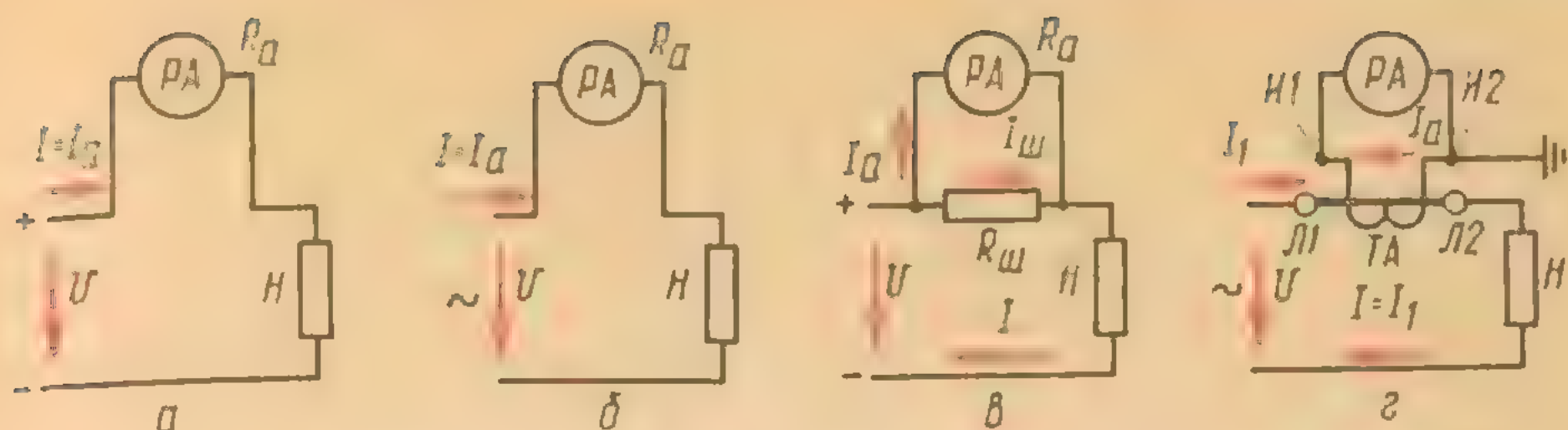


Рис. 11.9. Включение амперметров в цепи постоянного (а и б) и переменного (в и г) тока:

а и б — непосредственное; в — с помощью шунта ($I = I_{ш} + I_a$; $R_{ш} = R_a / (n - 1)$; $n = I / I_a$; г — через трансформатор тока ТА ($I_1 = I = k_{ТА} I_2$; $k_{ТА} = I_1 / I_2$; $I_2 = I_a$).

и 11.8, а), или с добавочным сопротивлением R_d (рис. 11.7, б и 11.8, б), или через измерительные трансформаторы напряжения ТУ (рис. 11.8, в).

Амперметры могут быть включены или непосредственно (рис. 11.9, а и 11.9, б), или с шунтами при измерении постоянного тока (рис. 11.9, в), или через измерительные трансформаторы тока при измерении переменного тока (рис. 11.9, г).

Электроизмерительные щитовые приборы — миллиамперметры, амперметры, килоамперметры, вольтметры и киловольтметры — как для постоянного, так и для переменного тока имеют шкалы с непосредственным отсчетом измеряемых величин. При монтаже их рекомендуется устанавливать на высоте от 1,2 до 2,2 м (при большой точности шкалы — 1,7 м) от пола.

Приборы выполняют одно- и многопредельными. В последнем случае пределы измерений изменяют при помощи переключателя или кнопки, установленных на приборах.

Для измерения тока, напряжения и мощности в однофазных и трехфазных трехпроводных и четырехпроводных цепях переменного тока при равномерной и неравномерной нагрузке фаз предназначен переносной измерительный комплект К50 или К51. Постоянно смонтированная схема прибора предназначена для схем с током до 50 А и напряжением до 600 В. Для расширения пределов измерения по току к комплекту придан блок трансформаторов тока И508 (до 600 А). Класс точности комплекта 0,2.

11.4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЧЕТЧИКИ И ИХ ВКЛЮЧЕНИЕ

Учет электроэнергии подразделяется на коммерческий и технический, или контрольный.

Коммерческий учет предназначен для денежных расчетов за электроэнергию. Счетчики для такого рода измерений называют расчетными. На винтах, крепящих кожух расчетного счетчика к корпусу, должна быть пломба с клеймом, указывающим срок поверки счетчика. На крышке колодки зажимов обязательна пломба электро-снабжающей организации. Расчетные счетчики для прямого включения в сеть могут быть класса точности 2,0, а включаемые через измерительные трансформаторы — класса точности не ниже 1,0. Транс-

11.3. Счетчики активной и реактивной энергии

Тип	Наименование и краткая характеристика
СО2-М	Счетчик активной энергии, однофазный, непосредственного включения (5 А, 127 и 220 В)
САЗУ-И670	Счетчик активной энергии, трехфазный, трехпроводный, универсальный, для непосредственного включения и с трансформаторами тока (5 А, 127, 220 и 380 В) и для включения через трансформаторы тока и напряжения (5 А, 100 В)
СА4У-И672	Счетчик активной энергии, трехфазный, для четырехпроводных систем (5 А, 220 и 380 В)
СР4У-И673	Счетчик реактивной энергии, трехфазный, для трех- и четырехпроводной систем, универсальный (5 А, 100, 127, 220 и 380 В)

форматоры тока расчетных счетчиков должны быть класса точности 0,5.

Технический, или контрольный, учет ведут с применением электроэнергии контрольных счетчиков.

Все счетчики периодически поверяют, ставя на них клеймо с датой поверки. Этим занимаются органы Комитета по делам мер и измерительных приборов. Сроки государственной поверки следующие: для счетчиков с номинальной мощностью 5 кВт, в том числе и бытовых, — один раз в 5 лет; для счетчиков с номинальной мощностью свыше 5 кВт — один раз в 2 года.

В таблице 11.3 приведены основные сведения о некоторых счетчиках активной и реактивной энергии, выпускаемых в нашей стране.

В маркировке счетчиков буквы и цифры означают: С — счетчик, О — однофазный, А — активной энергии, Р — реактивной энергии, 3 или 4 — для трехпроводной или четырехпроводной сети, У — универсальный, И — индукционной системы, 670, 672, 673 — конструктивное исполнение счетчика, П — прямоточный (непосредственного включения, например СА4-И672П), Т — тропическое исполнение (например, СР4-И673ПТ).

На шкале счетчика обычно указаны его тип, номинальные значения напряжения и тока и постоянная счетчика или передаточное число. Постоянная счетчика ω — это количество электроэнергии, расходуемой в контролируемой цепи за один оборот счетчика. Передаточное число s указывает, сколько оборотов сделает диск счетчика при потреблении в контролируемой цепи одного киловатт-часа электроэнергии, при этом $s = 1/\omega$.

Счетчики выпускают в основном на ток 5 А и напряжение 127, 220 и 380 В для включения непосредственно или только с трансформаторами тока, а также на 100 В для включения с трансформаторами напряжения и тока. Только для непосредственного включения предназначены счетчики, рассчитанные на токи 10, 20, 30, 50 А и напряжения 127, 220 и 380 В.

Показания счетчика снимают один раз в месяц и расход энергии за месяц определяют как разницу показаний.

В практике эксплуатации электроустановок счетчиками, включенными для измерения электрической энергии, пользуются для определения мощности включенной нагрузки.

Есть два способа измерения мощности по счетчику.

По первому способу записывают начальные показания W_1 счетчика, включают нагрузку на время t , по истечении которого фиксируют конечные его показания W_2 . Среднюю мощность (кВт) определяют так:

$$P_{\text{ср}} = \frac{W}{t} = \frac{W_2 - W_1}{t}. \quad (11.4)$$

Этот способ дает значение некоторой средней мощности за время t .

По второму способу, пользуясь секундомером, записывают время t (с), в течение которого диск совершит n оборотов. Зная постоянную счетчика ω или передаточное число c , определяют мощность (кВт)

$$P = \frac{3600 \omega n}{t} \text{ или } P = \frac{3600 n}{ct}. \quad (11.5)$$

Если счетчик включен с трансформатором тока, то формулы (11.5) записывают так:

$$P = \frac{3600 \omega n}{t} k \text{ или } P = \frac{3600 n}{ct} k, \quad (11.6)$$

где k — коэффициент трансформации трансформатора тока.

Пример 11.1. Передаточное число счетчика $c = 2500$; диск счетчика делает 5 оборотов за 10 с. Определить включенную мощность.

Решение. Искомая мощность $P = \frac{3600 \cdot 5}{2500 \cdot 10} = 0,72$ кВт.

Пример 11.2. Передаточное число счетчика $c = 1800$. Счетчик, диск которого делает 10 оборотов за 50 с, включен с трансформатором тока, имеющим коэффициент трансформации $k = 50/5$. Определить включенную мощность.

Решение. Включенная мощность $P = \frac{3600 \cdot 10}{1800 \cdot 50} \cdot 50/5 = 4$ кВт.

11.5. РАСШИРЕНИЕ ПРЕДЕЛОВ ИЗМЕРЕНИЯ СЧЕТЧИКОВ

Счетчики, как уже говорилось ранее, в основном выпускают на ток 5 А.

Для расширения пределов измерения счетчика по току используют трансформаторы тока, которые рассчитаны на следующие значения токов (А): 10/5, 15/5, 20/5, 30/5, 40/5, 50/5, 60/5, 75/5, 100/5 и т. д. Соответственно коэффициенты трансформации равны: 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20 и т. д.

Цифра в числителе указывает номинальный ток первичной обмотки, включаемой последовательно с потребителем тока, а цифра в знаменателе — номинальный вторичный ток, равный номинальному току счетчика.

На рисунке 11.10 приведена электрическая схема включения счетчика с трансформатором тока ТА. Расход энергии W определяется как показание счетчика $W_{\text{сч}}$, умноженное на коэффициент трансформации k трансформатора тока, то есть $W = kW_{\text{сч}}$.

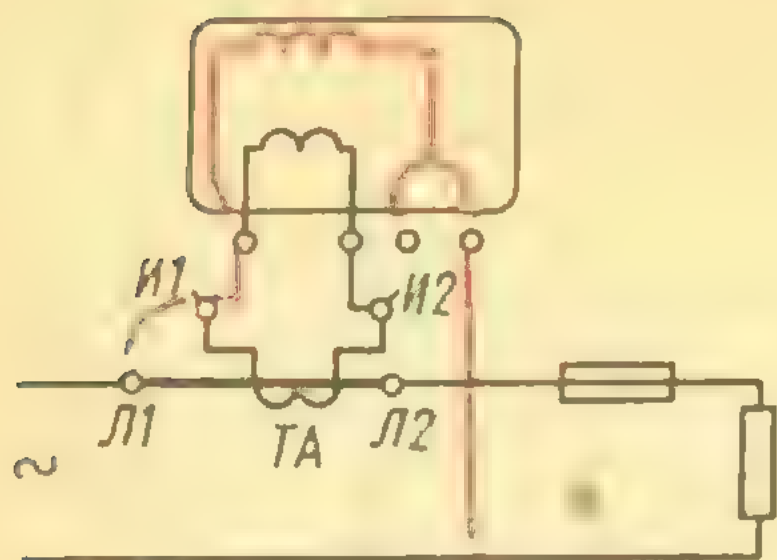


Рис. 11.10. Схема включения счетчика СО-2 с трансформатором тока TA :

$L1$ и $L2$ — контакты первичной обмотки трансформатора, включаемой в линию; $H1$ и $H2$ — контакты вторичной обмотки трансформатора, к которой подключают измерительные приборы.

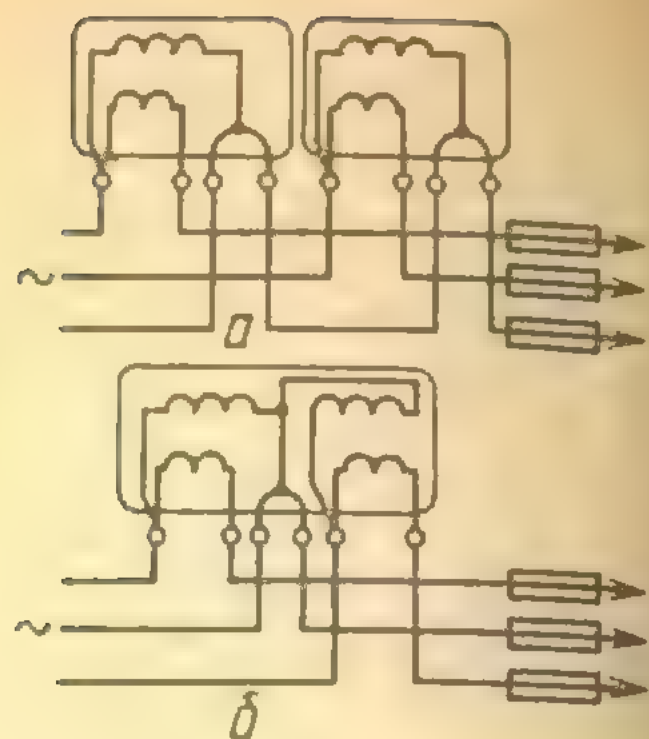


Рис. 11.11. Схемы включения двух однофазных счетчиков типа СО2 (a) и трехфазного типа СА3 (b).

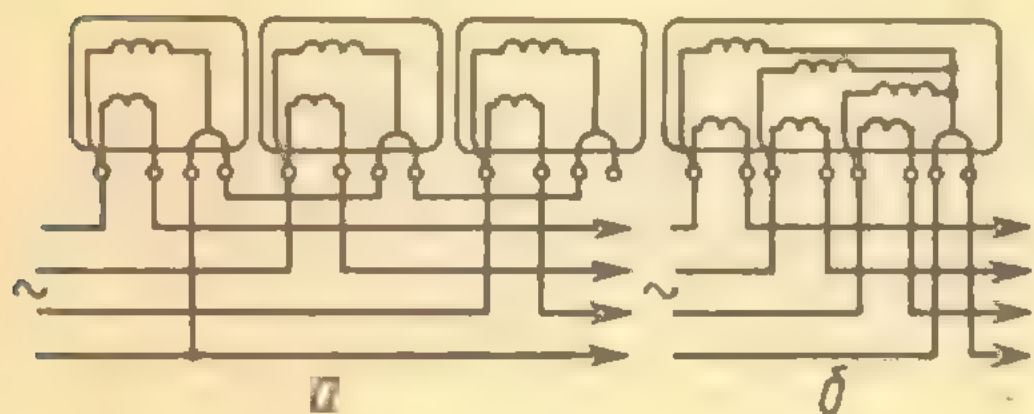


Рис. 11.12. Схемы включения трех однофазных счетчиков (a) и трехфазного четырехпроводного типа СА4 (b).

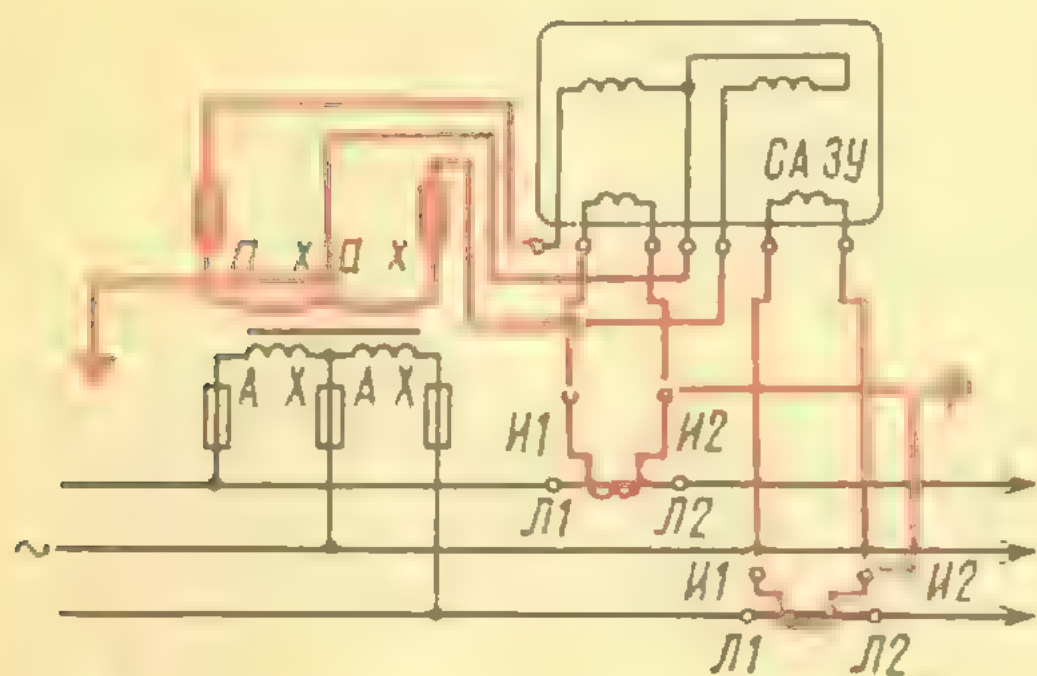


Рис. 11.13. Схемы включения трехфазного счетчика типа САЗУ в сеть высокого напряжения.

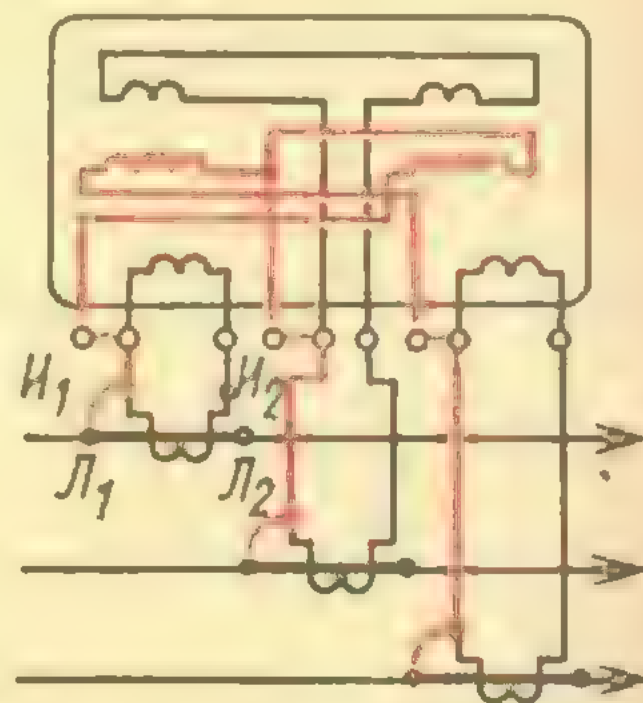


Рис. 11.14. Схема включения трехфазного счетчика реактивной энергии в сеть 220/380 В.

При измерении энергии, потребляемой в трехфазной трехпроводной цепи, используют два однофазных счетчика, которые включают по схеме, указанной на рисунке 11.11, a . Общий расход энергии в этом случае равен сумме показаний обоих счетчиков. При очень низком $\cos \varphi$ диск одного из счетчиков может вращаться в обратную сторону. Два однофазных счетчика могут быть заменены одним трехфазным трехпроводным типа СА3 (рис. 11.11, b). Он скомбинирован из двух однофазных счетчиков, диски которых насажены на общую ось и работают на один счетный механизм.

Для измерения электрической энергии в трехфазных четырехпроводных сетях (рис. 11.12, а) используют три однофазных счетчика или один комбинированный (рис. 11.12, б), состоящий из трех однофазных, диски которых сидят на одной общей оси и работают на общий счетный механизм. Общая энергия, измеренная в этом случае, равна сумме показаний трех счетчиков:

$$W_{об} = W_1 + W_2 + W_3. \quad (11.7)$$

Если все три счетчика включены с трансформаторами тока, имеющими одинаковый коэффициент трансформации k , то общий расход энергии

$$W_{об} = (W_1 + W_2 + W_3) k. \quad (11.8)$$

Пример 11.3. Показания трех счетчиков на 1 февраля: первого — 845 кВт·ч, второго — 590 кВт·ч, третьего — 905 кВт·ч; показания на 1 марта: соответственно 890, 620 и 940 кВт·ч. Счетчики включены с трансформаторами тока 50/5. Определить расход энергии за февраль.

Решение. 1-й счетчик зарегистрировал: $890 - 845 = 45$ кВт·ч
 2-й » » $620 - 590 = 30$ кВт·ч
 3-й » » $940 - 905 = 35$ кВт·ч

Общий расход с учетом коэффициента трансформации

$$W_{об} = (W_1 + W_2 + W_3) k = 110 \cdot 50/5 = 1100 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

При включении счетчиков в высоковольтную сеть, кроме трансформаторов тока, используют и трансформаторы напряжения. Схема включения трехфазного счетчика активной энергии в сеть высокого напряжения приведена на рисунке 11.13.

Для защиты обслуживающего персонала и включенных во вторичную цепь приборов от высоких потенциалов, которые могут появиться на вторичной стороне, в случае пробоя изоляции вторичные обмотки трансформаторов тока и напряжения нужно заземлять.

Электроснабжающие организации ведут также учет и реактивной мощности. Для этой цели применяют счетчики реактивной энергии. На рисунке 11.14 показана схема включения трехфазного счетчика реактивной энергии.

11.6. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ

Измерительные трансформаторы тока используют как в целях техники безопасности — для отделения измерительной цепи от цепи сетевого напряжения, так и для расширения пределов измерения счетчиков, амперметров и других приборов, которые, как правило, рассчитаны на ток не более 5 А. При измерении токов, превышающих 5 А, используют трансформаторы тока, первичная обмотка которых, как уже было показано на схемах, включается в рассечку силовой цепи, а приборы включают во вторичную цепь. Шкалы приборов при этом градуируют с учетом коэффициента трансформации.

В обозначениях трансформаторов тока буквенные символы означают: Т — трансформатор тока, Ф — с фарфоровой изоляцией между обмотками, П — проходной, Ш — шинный, У — усиленный, Д — с сердеч-

ником для дифференциальной защиты, З — с сердечником для защиты от замыканий на землю, Р — с разъемным сердечником, О — одновитковый, К — катушечный, В — встроенный в выключатель, Л — с изоляцией из литой синтетической смолы, М — модернизированный, Н — для наружной установки и т. д.

В практике сельской электрификации широкое применение в сетях до 0,66 кВ нашли трансформаторы тока типов ТК-20 и ТК-40 с номинальными первичными токами от 5 до 1000 А; в сетях до 3 кВ — типа ТКЛ-3 (от 5 до 600 А); в сетях 6 и 10 кВ — типов ТКЛ-10 (5...200 А), ТПЛ-10 (5...300 А), ТВЛМ и ТПЛМ-10 (от 5 до 1500 А) и др.; в сетях 35 кВ — типов ТПОЛ-35, ТФН-35М, ТФНД-35М и т. д. Номинальный вторичный ток этих трансформаторов 5 А, класс точности 0,5 и 1,0, номинальная вторичная мощность 10 В·А, номинальная вторичная нагрузка 0,4...0,6 Ом (у ТК-20 0,2 Ом).

Трансформаторы тока типа ТНПЛ-0,66 со шкалой токов (А) от 300/5 до 15 000/5 снабжены литой изоляцией и устанавливаются на шинах.

Трансформаторы тока ТП — шинноповесные и опорные — выпускаются со шкалой токов (А) от 300/5 до 1000/5 на 0,66 кВ и т. д.

Особенность эксплуатации трансформаторов тока — необходимость замыкать вторичную обмотку через обмотки измерительных приборов или замыкать накоротко, если измерительные приборы отсутствуют. Большую опасность представляет обрыв вторичной обмотки. Ток первичной обмотки не зависит от нагрузки во вторичной обмотке и целиком определяется нагрузкой главной цепи. Поэтому первичная обмотка имеет магнитодвижущую силу с полными ампер-витками и при разомкнутой вторичной обмотке. При нормальном — замкнутом — состоянии вторичная обмотка создает размагничивающие ампер-витки. При разомкнутой же обмотке размагничивающие ампер-витки отсутствуют, а первичные ампер-витки создают очень большой магнитный поток, который наводит во вторичной, разомкнутой, обмотке напряжение до 15 кВ, опасное для изоляции приборов и обслуживающего персонала. Поэтому, если приборы отключены, вторичная цепь трансформаторов тока должна быть замкнута.

Измерительные трансформаторы напряжения используют для понижения напряжения при питании устройств релейной защиты и автоматики, измерительных приборов и установок контроля изоляции.

Обозначения трансформаторов напряжения расшифровывают так: НОС — трансформатор напряжения однофазный сухой (с воздушным охлаждением); НОСК — то же, с компенсирующей обмоткой, или каскадный, или для комплектования распределительных ящиков; НТС — трехфазный сухой; НОМ — однофазный масляный; ЗНОМ — трехфазный масляный с заземленным выводом первичной обмотки; НТМИ — пятистержневой трехфазный; НКФ — однофазный каскадный в фарфоровом кожухе (на 110...500 кВ первичного напряжения).

Трансформаторы напряжения НОЛ (однофазные с литой изоляцией) предназначены для питания электрических измерительных приборов, цепей защиты и сигнализации в электроустановках переменного тока в сетях напряжением 6 и 10 кВ. Класс точности — 0,2; 0,5; 1,0; 3.

Вторичное номинальное напряжение у трансформаторов напряжения равно 100 В. Каждый из трансформаторов характеризуется предельно допустимой мощностью включаемых во вторичную обмотку приборов. При превышении мощности вторичной нагрузки изменяется коэффициент трансформации и приборы (вольтметры или счетчики) будут давать неверные показания. Выпускают эти трансформаторы четырех классов точности: для точных измерений — 0,2, для включения расчетных счетчиков — 0,5, для обычных измерений мощности и энергии — 1,0, для вольтметров и реле — 3,0.

Трансформатор напряжения 4 (рис. 11.15) включают в сеть высокого напряжения через разъединители 1, добавочные токоограничивающие сопротивления и предохранители 2. Со стороны низковольтной обмотки 5 с целью защиты трансформатора от коротких замыканий во вторичных цепях и приборах устанавливают предохранители 6.

Для контрольных измерений токов в цепях без их разрыва используют трансформатор тока с разъемным сердечником (измерительные клещи). Первичной обмоткой в этом случае служит токоведущая часть распределительного устройства, охватываемая разъемным сердечником (рис. 11.16). На этом сердечнике расположена вторичная обмотка, в которую включен амперметр.

Электроизмерительные клещи выпускают нескольких типоразмеров, класса точности 4,0. Клещи типа Ц-90 для измерения тока рассчитаны для применения в установках до 10 кВ и измерения тока до 600 А, клещи Ц-91 — в установках до 1000 В для измерения тока от 10 до 500 А. Клещи Ц-90 предназначены для измерения мощности в цепях переменного тока напряжением до 500 В. При напряжении в сети 220 В предел измерения мощности составляет от 25 до 75 кВт, при 380 В — от 50 до 150 кВт.

Трансформаторы напряжения применяют и для контроля изоляции высоковольтных установок, который заключается в измерении напряжения между каждой фазой установки и землей. С этой целью используют три однофазных трансформатора напряжения, включаемых в звезду (рис. 11.17, а). Нейтральную точку заземляют. Нейтральную точку вторичных обмоток также заземляют для защиты при пробоях изоляции между обмотками высокого и низшего напряжения.

Если одна из фаз в линии замкнется на землю, обмотка трансформатора, включенного в эту фазу, замкнется. Вольтметр, включенный во вторичную обмотку трансформатора, не покажет напряжения (при полном замыкании на землю). В то же время напряжения исправных фаз по отношению к земле увеличатся до полных линейных напряжений, то есть в 1,73 раза.

Для контроля изоляции изготавливают также пятистержневые трансформаторы напряжения (рис. 11.17, б). Назначение двух крайних стержней заключается в том, чтобы дать возможность магнитному потоку от того тока, который возникает при замыкании на землю в линии, замыкаться через магнитопровод, образуемый двумя крайними сердечниками. На эти стержни наложена дополнительная обмотка, в которой при замыкании линии на землю появляется напряжение. Обмотка питает сигнальные устройства и реле защиты от замыканий на землю.

Рис. 11.15. Схема включения трансформатора напряжения:

1 — разъединители; 2 — предохранитель высоковольтный токоограничивающий; 3 — высоковольтная обмотка; 4 — трансформатор; 5 — обмотка низшего напряжения; 6 — предохранитель низковольтный; 7 — реле напряжения.

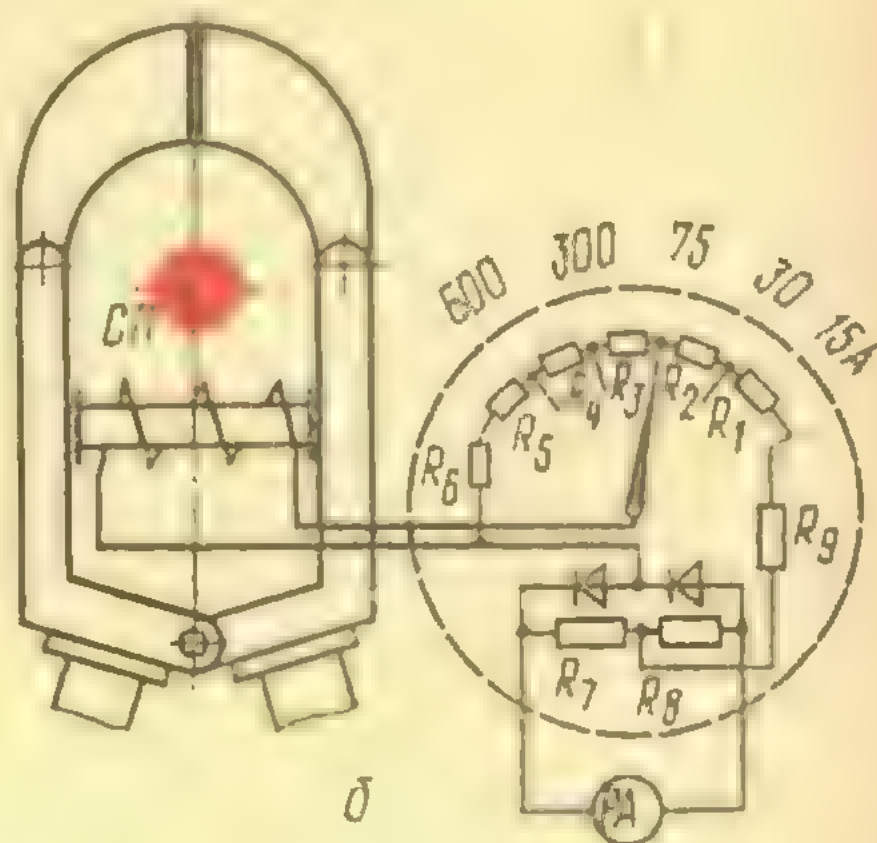
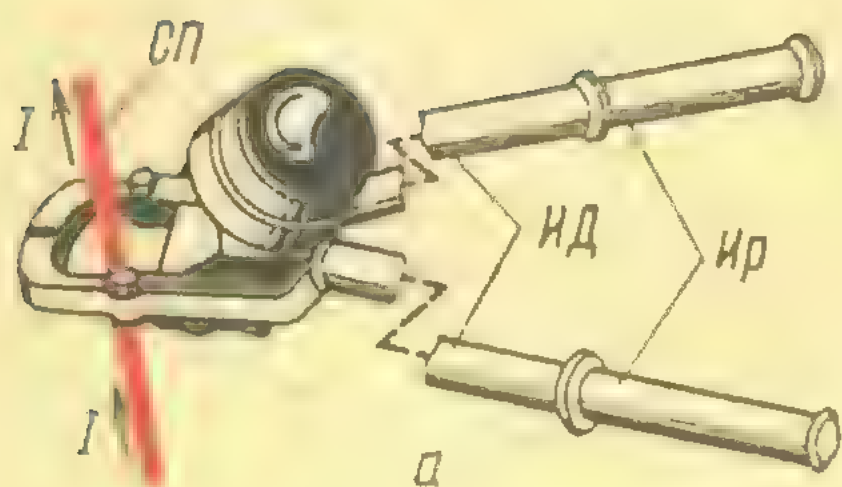
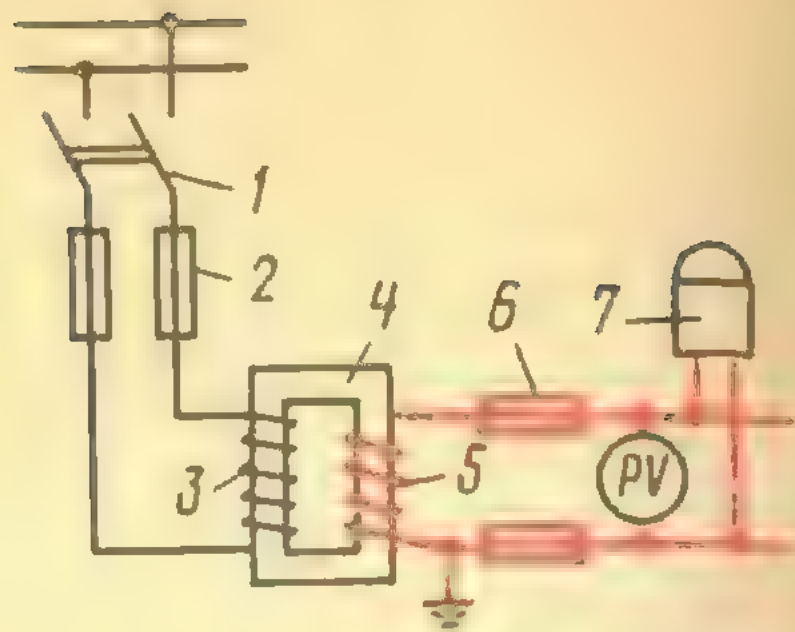


Рис. 11.16. Измерительные клещи:

а — общий вид; б — схема соединений; СП — силовой провод (до 10 кВ); ИД — изолирующие держатели; Ир — изолирующие ручки.

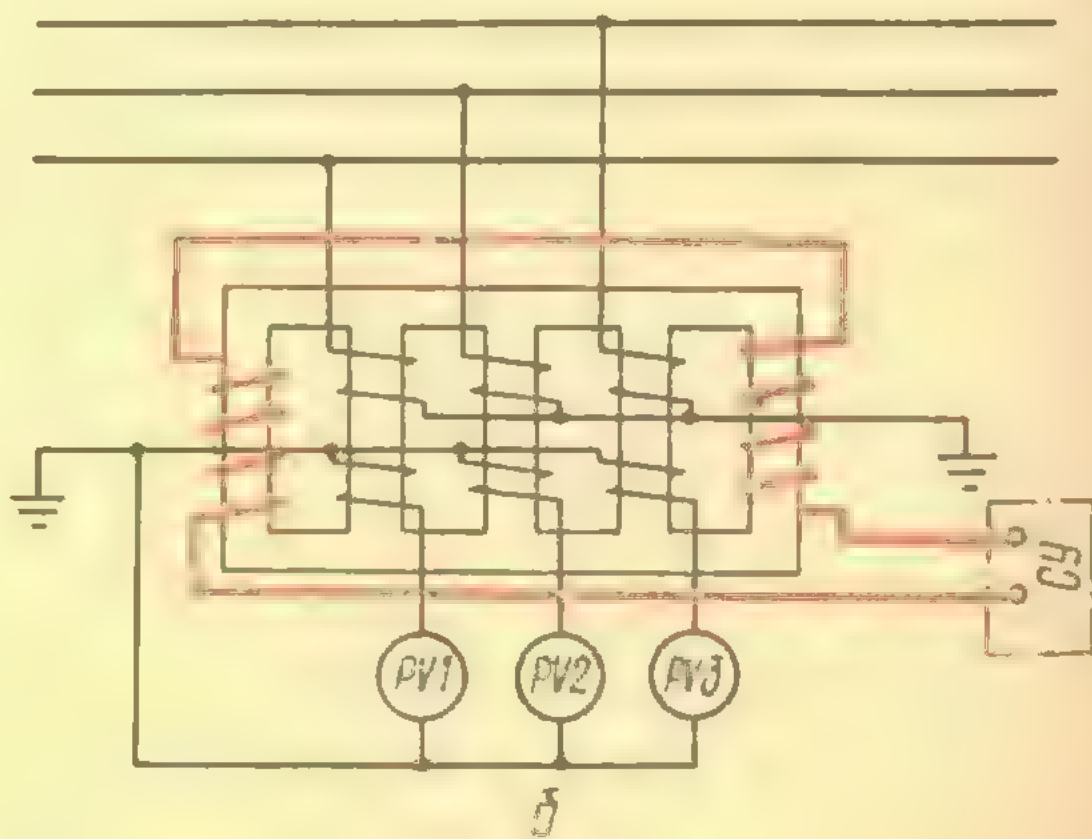
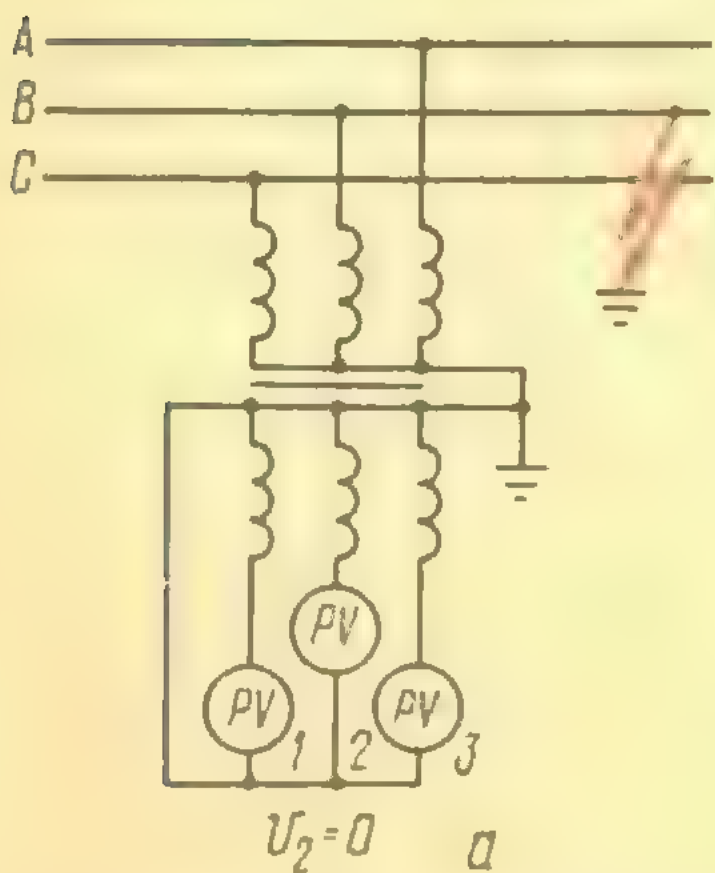


Рис. 11.17. Схемы контроля изоляции:

а — при помощи трех однофазных трансформаторов напряжения; б — при помощи пятистержневого трансформатора напряжения; СУ — сигнализирующее устройство.

Трансформаторы напряжения НОМ-6 и НОМ-10, НТМК-6 и НТМК-10 (трехстержневые), НТМН-6 и НТМН-10 (пятистержневые) используют в высоковольтных установках напряжением соответственно 6 и 10 кВ. В обозначении типа буквы означают следующее: Н — трансформатор напряжения; О — однофазный; Т — трехфазный, или трехобмоточный (если в конце обозначения), или тропического исполнения (если после цифр); Л — с литой изоляцией; М — масляный; С — сухой; З — с одним заземленным высоковольтным выводом; И — измерительный; К — каскадный или с компенсирующей обмоткой; Ф — с фарфоровой крышкой; Д — делитель и т. д.

В сельских электроустановках используют трансформаторы напряжения с первичными напряжениями 380, 6000, 10 000, 35 000 В и вторичным 100 В.

Однофазные трансформаторы типа НОС-0,5 с воздушным охлаждением применяются в установках напряжением до 500 В. Вторичное напряжение у этих трансформаторов 100 В.

Трансформаторы тока и напряжения выбирают по номинальному напряжению установки, номинальному первичному току, классу точности, номинальной и вторичной мощности и типу.

Для точных лабораторных измерений служат трансформаторы тока класса точности 0,1 (И-56), класса точности 0,2 (И-54, УТТ-5 и УТТ-6).

Из лабораторных трансформаторов напряжения распространены УТН-1 на первичные напряжения до 300 В и Н-50 на первичные напряжения 3000, 6000, 10 000 и 15 000 В класса точности 0,2.

11.7. ЛОГОМЕТРЫ. МЕГОММЕТРЫ. ИЗМЕРИТЕЛИ ЗАЗЕМЛЕНИЙ

Логометры — приборы магнитоэлектрической, электромагнитной и электродинамической систем со сдвоенными измерительными механизмами. В них в отличие от других приборов не используется сила упругости противодействующих пружин. Их поэтому называют также приборами без противодействующего момента. Условные обозначения этих приборов приведены на рисунке 11.18.

Магнитоэлектрические логометры применяют в приборах для измерения больших сопротивлений, электромагнитные — в приборах для измерения емкостей, частоты, коэффициента мощности и угла сдвига фаз, электродинамические — в приборах для измерения мощности и т. д.

Стрелка указателя логометра, не испытывая усилия противодействующей пружины, которая в обычных приборах возвращает ее на нулевое деление, обычно может занимать любое положение относительно шкалы при отключенном приборе. При включении прибора ток обтекает катушки, создается вращающий момент и стрелка отклоняется.

Для измерения коэффициента мощности $\cos \varphi$ используют однофазные и трехфазные фазометры, которые выполняют как логометры электромагнитной и электродинамической систем. Приборы имеют двусторонний отсчет с нулевым положением посередине.

Для измерения частоты, кроме частотомеров вибрационной системы,

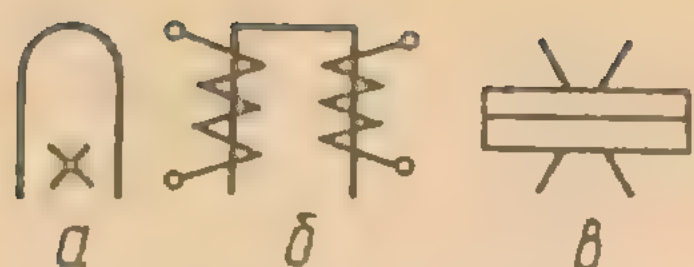


Рис. 11.18. Условные обозначения логометров магнитоэлектрической (а), электромагнитной (б) и электродинамической (в) систем.

применяют частотомеры ферродинамической системы, работающие по принципу логометра.

Мегомметры предназначены для измерения сопротивления изоляции и коэффициента ее абсорбции у различных электрических аппаратов, не находящихся под напряжением. Мегомметры типов М4100/1...М4100/5 представляют собой двухпредельные переносные приборы, выпускаемые в пяти модификациях по выходному напряжению и наибольшему значению измеряемого сопротивления. Прибор питается от встроенного генератора переменного тока, снабженного рукояткой. Частота вращения рукоятки — 120 мин^{-1} .

Для выпрямления переменного тока в приборе используется селеновый выпрямитель. Измерительный прибор — логометр магнитоэлектрической системы.

Мегомметры М4101 и Ф4101 при измерениях подключают к сети 127 и 220 В, а прибор Ф4101, кроме того, получает питание и от внешнего источника постоянного тока 12 В. Электронный мегомметр Ф-2 состоит из источника стабилизированного напряжения и лампового вольтметра. Ламповый вольтметр измеряет напряжение на эталонном сопротивлении, которое пропорционально измеряемому сопротивлению. Питание прибора от сети 127 и 220 В.

Измерители заземлений МС-0,7 (в деревянном футляре) и МС-0,8 (в шатмассовом футляре) в качестве индикаторов снабжены приборами, действующими по принципу логометра. Магнитоэлектрический логометр

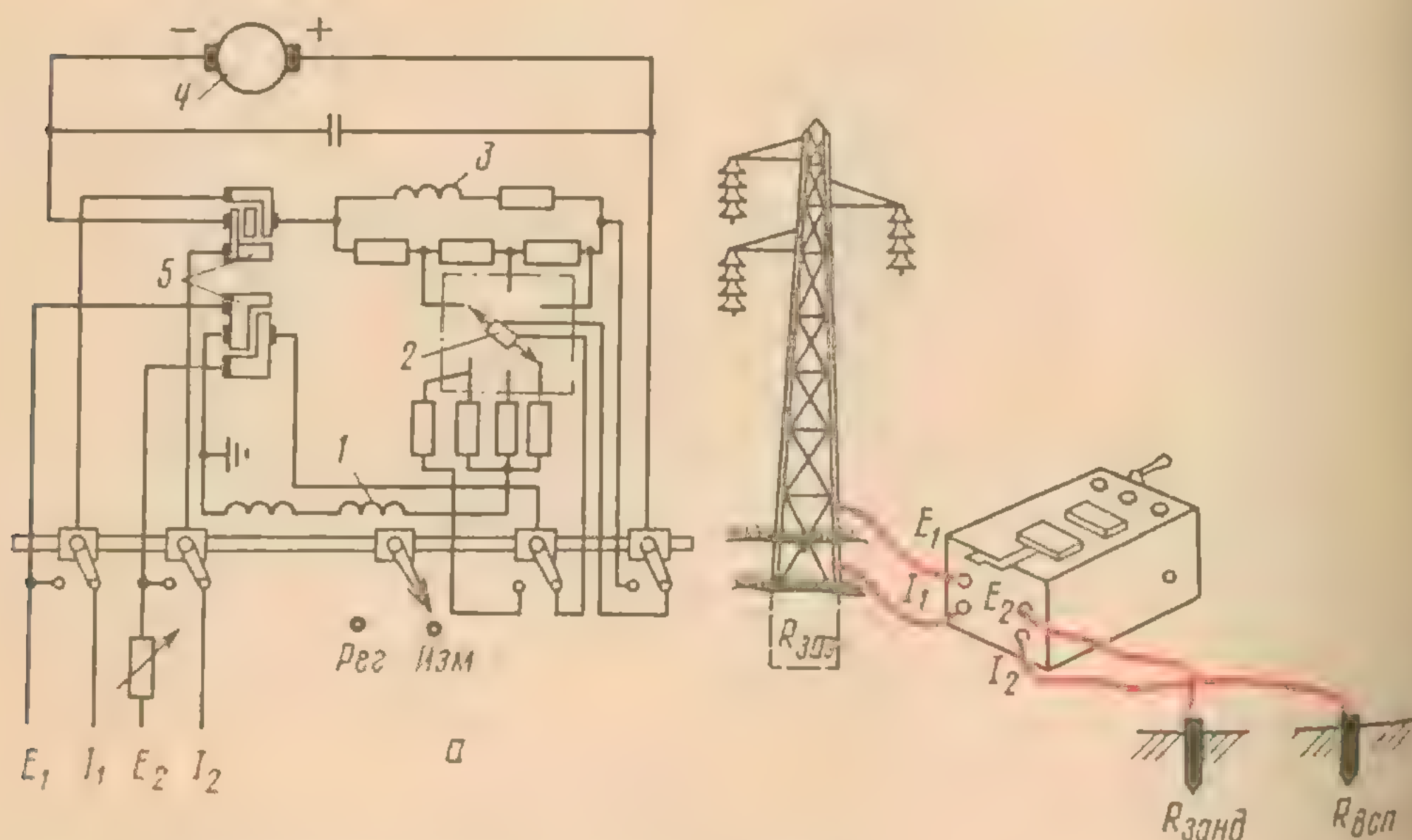


Рис. 11.19. Измеритель заземлений МС-0,8 (МС-0,7):

а — принципиальная схема; б — схема включения; 1 и 3 — обмотки-рамки измерительного прибора; 2 — переключатель пределов измерения; 4 — генератор постоянного тока; 5 — механические прерыватель и выпрямитель тока (коммутатор) в цепи заземления и прибор. Рег. и Изм. — положения переключателя на регулировку прибора и измерение.

имеет две рамки с катушками 1 и 3 (рис. 11.19, а). Внутри прибора помещается электромагнитный генератор постоянного тока 4. При помощи одного из механических прерывателей — коммутаторов 5, работающего синхронно, ток генератора превращается в прерывистый переменный, ибо постоянным током нельзя измерять сопротивления заземлителей вследствие явления поляризации между заземлителем и почвой. Через систему, состоящую из испытуемого заземлителя и двух дополнительных (соответственно $R_{\text{из}}$, $R_{\text{под}}$, $R_{\text{всп}}$ на рисунке 11.19, б), протекают переменные токи, которые, возвращаясь на прибор, выпрямляются вторым коммутатором. Соотношения между токами в последовательной и параллельной обмотках зависят от сопротивления $R_{\text{из}}$.

Измеритель заземления типа М416 питается от батареи из трех элементов типа 373 («Марс» и др.) и имеет транзисторный преобразователь напряжения, при помощи которого к внешней цепи подводится переменное напряжение 15 ± 2 В. Работа прибора основана на принципе компенсации тока в измерительной цепи, то есть путем сравнения измеряемого сопротивления с проградуированным, встроенным в прибор. В момент компенсации ток в индикаторном приборе равен нулю.

11.8. ПРИБОРЫ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ АКТИВНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ, ИНДУКТИВНОСТЕЙ И ЕМКОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОСТОВЫХ СХЕМ

В практике электрических измерений сопротивлений, индуктивностей и емкостей широкое применение нашли приборы, построенные по принципу мостовых схем. На рисунке 11.20 приведена принципиальная схема малогабаритного мостового прибора постоянного тока для измерения сопротивлений в пределах от 0,05 до 50 тыс. Ом (тип ММВ). Прибор имеет пять пределов измерения. В зависимости от положения переключателя показания прибора по шкале умножают соответственно на 0,1, 1, 10, 100 и 1000 Ом. Для питания моста используется батарея напряжением 4...4,5 В. Измеряемое сопротивление подключают к зажимам R_x . Лимбом RP потенциометра, на котором нанесены деления, соответствующие измеряемому сопротивлению, стрелку индикаторного гальванометра H устанавливают на нулевое деление. По делению на лимбе, установившемуся против указателя на крышке прибора, определяют значение измеряемого сопротивления.

Для измерения сопротивлений, индуктивностей и емкостей элементов цепей применяют универсальный мост. В одно из плеч моста включают измеряемый элемент, а другие плечи составляют из эталонных и проградуированных элементов с активным, индуктивным и емкостным

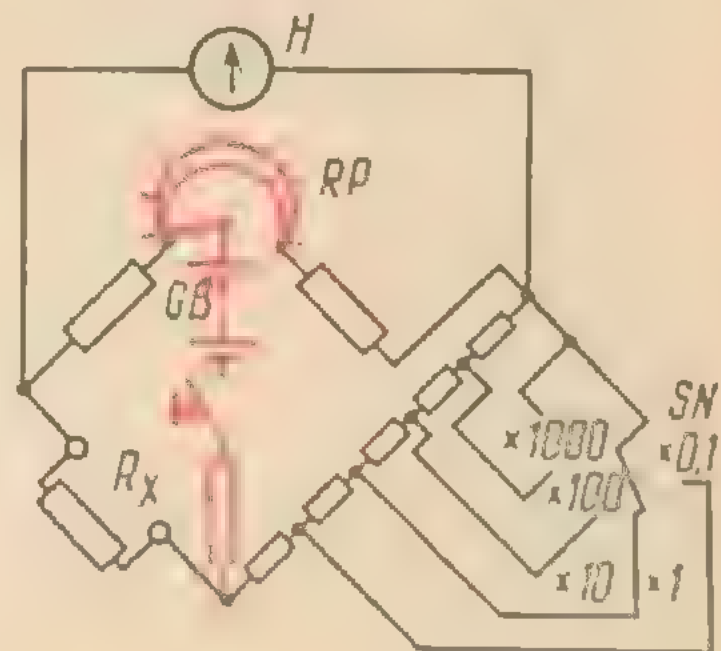


Рис. 11.20. Схема измерительного моста:
 H — гальванометр (индикатор); RP — потенциометр с лимбом и шкалой для отчета значений сопротивления; GB — внутренний источник тока; SN — переключатель пределов измерения.

сопротивлениями. Источником питания в этих мостах служит переменный ток промышленной частоты или переменный ток, генерируемый специальным устройством внутри прибора.

11.9. РЕГИСТРИРУЮЩИЕ ПРИБОРЫ И ОСЦИЛЛОГРАФЫ

При помощи самопишущих приборов (самописцев) исследуют изменения измеряемой электрической величины во времени. Самопишущие гальванометры, вольтметры, амперметры, ваттметры, частотомеры записывают соответствующие величины на бумаге, движущейся с определенной скоростью. На стрелке таких приборов укрепляют специальное перо с запасом чернил.

Для записи быстропротекающих процессов с частотой до 5000 Гц используют *магнитоэлектрические* (вибраторные) осциллографы. Характер изменения процесса записывают на светочувствительную бумагу или пленку.

С целью изучения процессов, протекающих с большей частотой, применяют *электронные* осциллографы. Электронный луч рисует кривую процесса на экране специальной трубки осциллографа.

Для фотографирования кривой с экрана используют специальные приставки с фотоаппаратом.

Контрольные вопросы и задания к главе 12. 1. Какая разница между прибором магнитоэлектрической и прибором электромагнитной системы? 2. Как расшифровать условные обозначения на шкале амперметра и вольтметра? 3. Как расширить пределы измерения вольтметра и амперметра? 4. Какие сведения содержатся на щитке счетчика? 5. Нарисуйте схему включения счетчика с трансформатором тока. 6. Как определить мощность подключенной нагрузки, если известно, что передаточное число счетчика 2500, а диск делзет 10 оборотов за 36 секунд? 7. Нарисуйте схему включения вольтметра в сеть напряжением 220 В с дополнительным сопротивлением R и определите его значение, если внутреннее сопротивление вольтметра равно 5000 Ом, а его полная шкала до 30 В. Предельное отклонение стрелки в схеме должно составлять 240 В. 8. Нарисуйте схему включения амперметра с шунтом и рассчитайте сопротивление шунта, если внутреннее сопротивление амперметра 0,01 Ом, а его шкала до 1 А, но ожидаемый ток — до 20 А. 9. Какие приборы называют логометрами? 10. Как измерить сопротивление растеканию заземлителя? 11. Как измерить сопротивление при помощи измерительного моста? 12. Как определить коэффициент мощности по показаниям ваттметра, вольтметра и амперметра? 13. В каких единицах измеряют активную, реактивную и полную мощность?

Глава 12. АВАРИЙНЫЕ РЕЖИМЫ В ТРЕХФАЗНЫХ СЕТЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА И ТРЕБОВАНИЯ К КОММУТАЦИОННОЙ И ЗАЩИТНОЙ АППАРАТУРЕ

12.1. ВИДЫ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ, ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ И ВОЗМОЖНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ

При выборе аппаратуры управления, средств защиты, а также схем соединений и конструкции распределительных устройств учитывают ожидаемые значения токов короткого замыкания (т.к.з.), от которых

12.1. Виды коротких замыканий и векторные диаграммы токов и напряжений:
 δ — трехфазное к.з.; θ — двухфазное к.з.; θ — однофазное к.з.;
 R_3 — сопротивление растеканию заземляющего устройства.

могут возникнуть механические и термические повреждения в установках.

Коротким замыканием (к.з.) называют всякое не предусмотренное нормальным режимом работы электроустановки замыкание между фазами, а в установках с заземленной нулевой точкой (нейтралью) — еще и замыкание между фазой и нулевым проводом или землей. В установках с незаземленной нейтралью замыкание одной фазы на землю не является коротким замыканием.

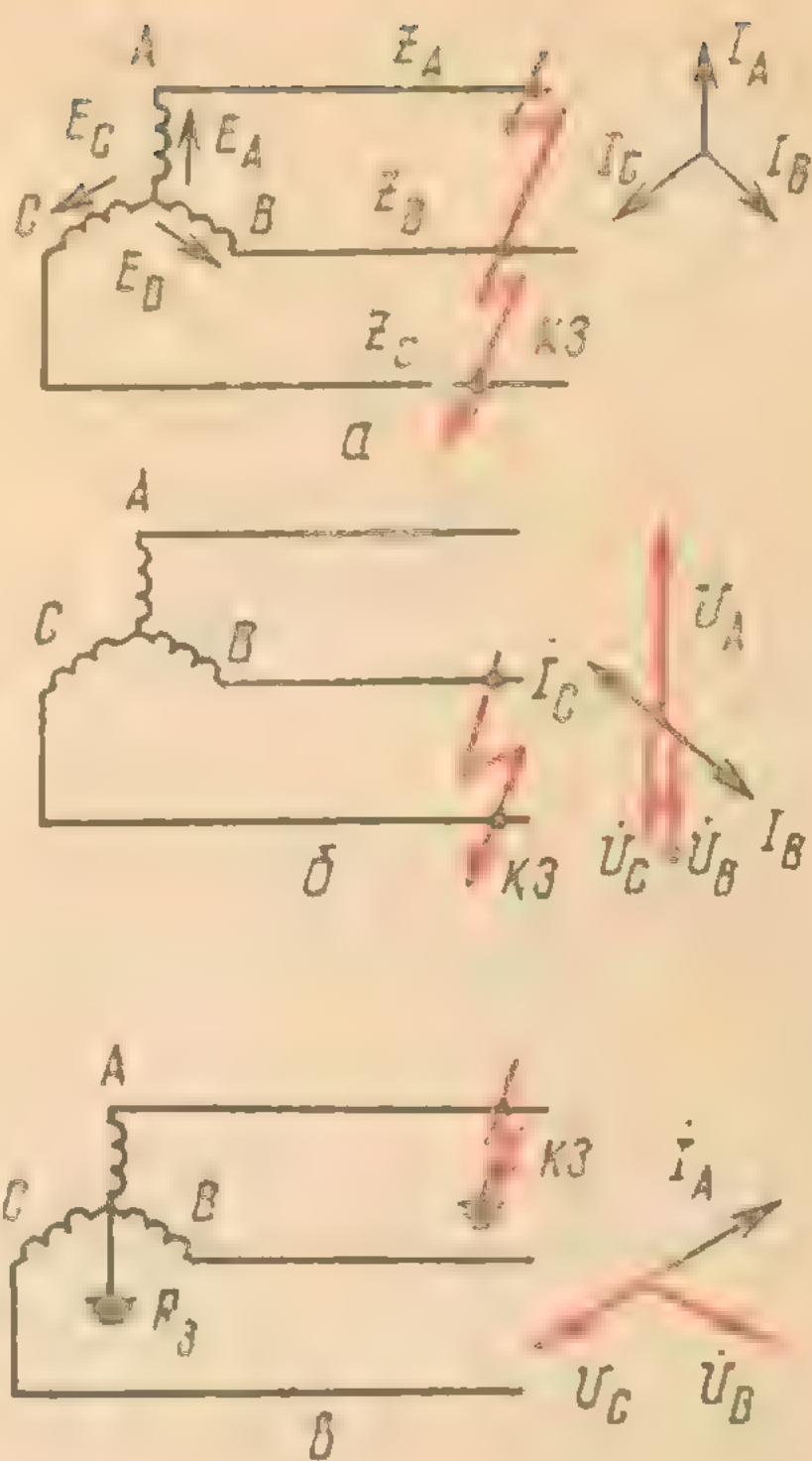
В цепях постоянного тока короткие замыкания бывают между полюсами или между полюсом и землей.

На рисунке 12.1 показаны виды коротких замыканий в трехфазной четырехпроводной сети напряжением до 1000 В.

Короткие замыкания возникают из-за неправильных действий персонала, а также из-за повреждения или естественного износа изоляции. Разрушение изоляции (пробой) могут вызвать перенапряжения, возникающие при разрядах молнии в линию или рядом с ней, а также при явлениях резонанса напряжений в электроустановках. Износ изоляции — это естественный процесс, происходящий в результате колебания температуры и перегрева при аномальных режимах. На старение изоляции отрицательно влияет также примесь паров химически активных соединений, таких, как аммиак, сернистые соединения, дымы от промышленных предприятий, морской воздух и т. д. На воздушных линиях короткие замыкания могут вызвать птицы, животные, а на подстанциях — крысы и другие грызуны и животные.

Токи коротких замыканий могут достигать больших значений и вызывать сильный перегрев генераторов, трансформаторов, двигателей, проводов и т. д. А через 0,01 с после момента короткого замыкания может возникнуть ударный мгновенный ток, который может вызвать значительные динамические усилия на элементах установки и привести к механическому разрушению обмоток трансформаторов, шин, а также выключателей. И, конечно, при коротких замыканиях нарушается нормальное электроснабжение.

Наиболее часто короткие замыкания происходят на воздушных линиях, а затем в кабельных сетях, реже — на трансформаторных подстанциях и в распределительных устройствах электростанции. При возникновении режима короткого замыкания и появлении больших токов короткого замыкания на одном из ответвлений (фидеров) от источника тока (трансформаторной подстанции или электростанции) на шинках



источника тока снижается напряжение. Поэтому падает напряжение и у потребителей, подключенных к другим ответвлениям от источника.

Для предотвращения опасных последствий коротких замыканий применяют релейную защиту, устанавливают плавкие предохранители, которые обеспечивают быстрое отключение участка с коротким замыканием. А для поддержания у рядом находящихся потребителей стабильного напряжения на генераторах используют автоматическую регулировку возбуждения. Сила тока однофазного короткого замыкания всегда меньше, чем двух- или трехфазного, так как в этом случае цепь короткого замыкания питается фазным напряжением, а сопротивление этой цепи больше, так как при замыкании на землю в цепь может быть включено сопротивление растеканию заземляющего устройства (рис. 12.1, в).

Для правильного выбора и настройки защитной аппаратуры необходимо уметь вычислять токи короткого замыкания. При этом следует учитывать, что в момент замыкания ток быстро нарастает и через 0,01 с достигает ударного значения, затем несколько снижается до так называемого установившегося значения, наступающего через 4...5 с. Хорошо отлаженная аппаратура управления должна отключить участок цепи с коротким замыканием не более чем через 0,2...0,3 с от начала замыкания. В противном случае могут наступить разрушительные последствия действия токов короткого замыкания.

12.2. ХАРАКТЕР ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ. УДАРНЫЙ ТОК

Рассмотрим процесс короткого замыкания. Для понимания этого процесса необходимо знать закон коммутации: *в цепях, имеющих индуктивности и емкости, мгновенные значения тока i и напряжения и ЭДС e , магнитного потока Φ и электрического заряда Q не могут в момент коммутации мгновенно изменить свои значения.* И для того, чтобы в цепи был обеспечен непрерывный переход из одного состояния в другое (в нашем случае из нормального режима в режим короткого замыкания), в момент коммутации в цепи появляются свободные ток, напряжение, ЭДС, магнитный поток, заряд, которые обеспечиваются за счет изменения магнитных потоков в индуктивностях и заряда в емкостях. На рисунке 12.2. приведены расчетная схема короткого замыкания и кривая изменения тока в цепи, полученная при помощи осциллографа (сплошная линия). Пунктиром показано, как можно разложить эту кривую на две более простые, поддающиеся детальному анализу. Это, во-первых, кривая $i_{пр}$ принудительного (периодического) тока, который устанавливается через 2...4 с (с учетом нагрева элементов цепи) после момента возникновения короткого замыкания, и, во-вторых, кривая $i_{св}$ свободного (апериодического) тока, обусловленная наличием в цепи магнитных полей и их перераспределением в первые 2...4 с после момента короткого замыкания.

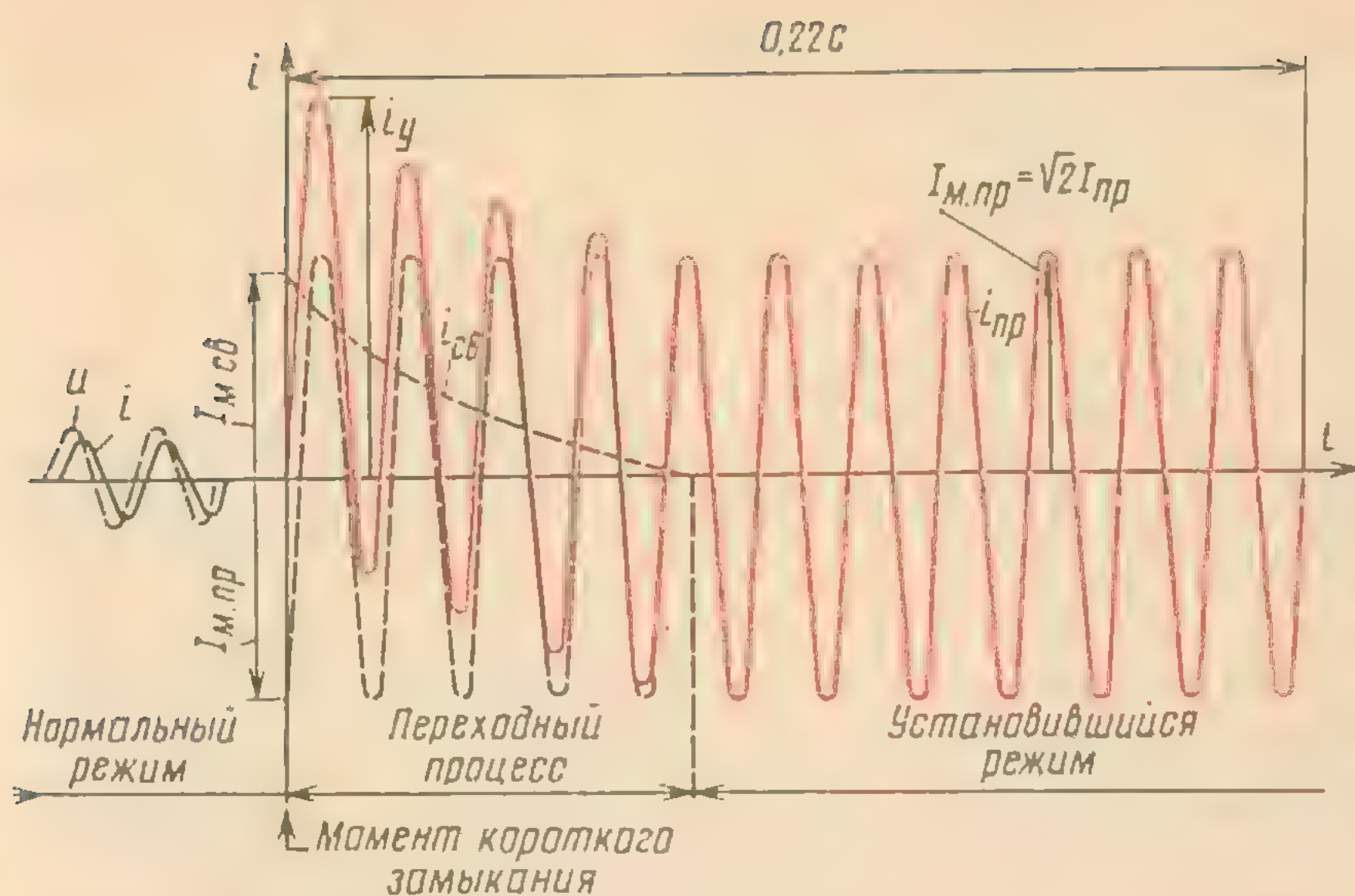


Рис. 12.2. Изменение тока короткого замыкания.

Действующее значение принудительного тока

$$I_{\text{пр}} = \frac{U}{\sqrt{3} Z},$$

где U — напряжение на зажимах источника, Z — полное сопротивление цепи. Амплитуда тока $I_{\text{м.пр}} = \sqrt{2} I_{\text{пр}}$.

Мгновенное значение свободного тока для любого момента времени t

$$i_{\text{св}} = I_{\text{м.св}} e^{-\frac{t}{T}}, \quad (12.1)$$

где $I_{\text{м.св}}$ — начальное значение свободного тока, равное в наиболее тяжелом случае амплитуде $I_{\text{м.пр}}$ тока короткого замыкания; $T = L/r = X/(\omega r)$ — постоянная времени экспоненциальной кривой, описывающей характер изменения свободного тока; L — индуктивность цепи; r — активное сопротивление цепи.

Наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания возникает через полпериода (через 0,01 с) после момента замыкания, то есть в самом тяжелом случае, когда момент замыкания совпал с максимальной амплитудой периодического принудительного тока. Этот мгновенный максимальный ток называется ударным, и он составляет

$$i_y = I_{\text{м.пр}} + I_{\text{м.св}} e^{-\frac{0,01}{T}} = I_{\text{м.пр}} k_y, \quad (12.2)$$

где k_y — коэффициент ударного тока, показывающий, во сколько раз ударный ток больше максимального значения периодической — принудительной составляющей тока короткого замыкания.

Теоретически постоянная времени T может меняться от 0 при $L=0$ до бесконечности при $r=0$. В этих случаях крайние значения ударного коэффициента составят соответственно 1 и 2. На практике максимальное значение $k_y=1,8$. При коротких замыканиях в сетях 10 кВ и 0,38 кВ $k_y=1$.

12.3. СПОСОБЫ РАСЧЕТА И ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЦЕПИ И ВЫБОР РАСЧЕТНЫХ ТОЧЕК КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ В ЦЕПЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Последовательность расчета. Расчет токов короткого замыкания ведут в следующем порядке. Выбирают расчетные условия и метод расчета, составляют схему замещения для расчетной цепи, определяют ЭДС и сопротивления элементов схемы (в именованных или относительных единицах), преобразуют схему в простейшую — с одним источником и одним результирующим сопротивлением и, наконец, определяют значения токов короткого замыкания (напряжения, мощностей).

Когда подсчитывают ток короткого замыкания с учетом общего сопротивления трансформатора, обмотки которого имеют соответственно напряжения U_1 и U_2 , то приходится находить приведенное сопротивление, например, вторичной обмотки к первичной цепи. Оно определяется по формуле

$$z'_2 = z_2 \frac{U_1^2}{U_2^2}; \quad r'_2 = r_2 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2; \quad x'_2 = x_2 \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2, \quad (12.3)$$

т. е. z_2 , r_2 и x_2 — сопротивления вторичной обмотки, приведенные к напряжению в первичной обмотке; U_1 и U_2 — напряжения первичной и вторичной обмоток.

В ряде случаев необходимо определить относительные параметры элементов цепи. Под относительным значением какой-либо величины понимают ее отношение к другой одноименной величине, принятой за единицу измерения. Параметры в относительных единицах помечают звездочкой *. Так, относительные значения активного и индуктивного сопротивлений, включенных в цепь на фазное напряжение U_ϕ , при токе в цепи I составляют

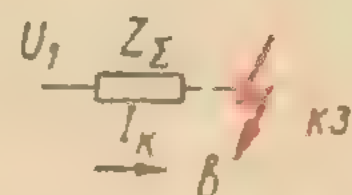
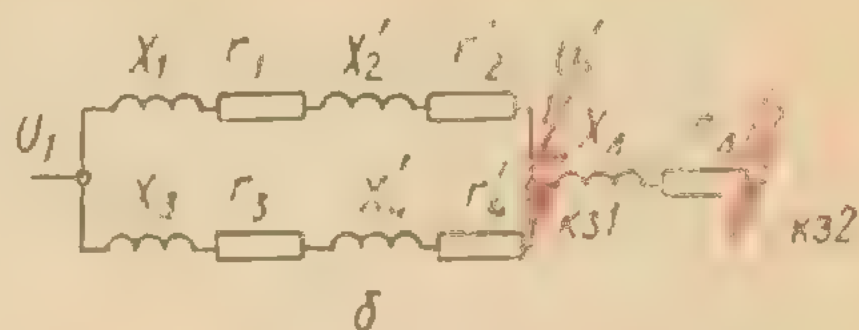
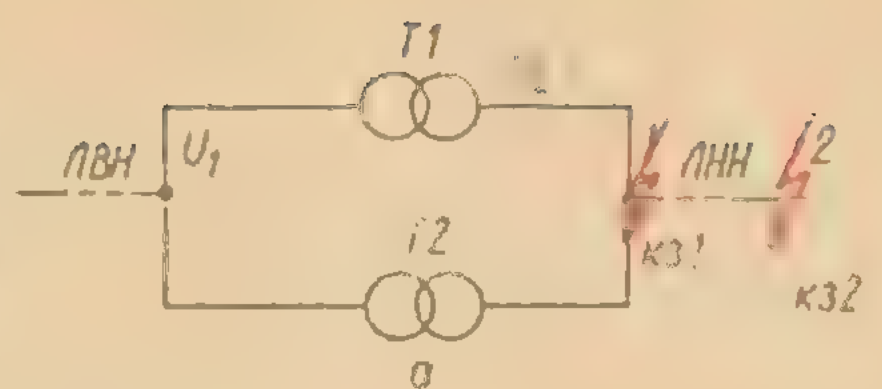
$$R_* = \frac{R}{Z} = \frac{R}{\frac{U_\phi}{\sqrt{3}I}} = \frac{RI}{U_\phi}; \quad X_* = \frac{XI}{U_\phi}; \quad Z_* = \sqrt{R_*^2 + X_*^2}. \quad (12.4)$$

Расчетные точки. Расчетные условия выбирают в зависимости от целей расчета. Например, для проверки высоковольтных аппаратов на подстанции на термическую и динамическую стойкость надо искать наибольшее из возможных значений тока короткого замыкания, когда все источники питания включены, а замыкание произошло непосредственно у места установки аппаратов. Если же надо оценить чувствительность релейной защиты, то расчетные условия должны быть такими, при которых токи короткого замыкания имеют наименьшее значение.

Сельским электрикам необходимо уметь определять токи коротких замыканий в сетях напряжением 380/220 В, реже — в сетях 10 и 35 кВ, но в значительном удалении от источника питания — турбо- или гидрогенератора электростанции.

Расчет токов короткого замыкания непосредственно у источника

Рис. 12.3. Исходная схема для расчета токов короткого замыкания (а), ее схема замещения (б) и окончательная расчетная схема (в):
ЛВН — линия высшего напряжения; ЛНН — линия низшего напряжения; 1 и 2 — расчетные точки на шинах трансформатора и в конце линии; Z_{Σ} — полное суммарное сопротивление.



питания выполняет инженерно-технический персонал электростанций.

Ограничение тока короткого замыкания. Для ограничения токов короткого замыкания на шинах генераторов электростанций с напряжением 6 и 10 кВ или на отходящих от них линиях применяют специальные индуктивные сопротивления, называемые реакторами. Они характеризуются номинальными значениями тока и напряжения, а также индуктивным сопротивлением ($I_{p.n}$, $U_{p.n}$ и X_p , %).

Реактор представляет собой катушку без сердечника, индуктивность которой не зависит от протекающего тока. В зависимости от места размещения различают линейные и шинные реакторы. Ток короткого замыкания вызывает на реакторе большое падение напряжения. Снижается опасность динамических и термических повреждений в генераторах и аппаратах коммутации.

Реакторы применяются также для ограничения пускового тока у мощных высоковольтных (на 6 и 10 кВ) двигателей, применяемых, например, на насосных станциях оросительных систем.

Расчетная схема и ее упрощение. Расчет токов короткого замыкания в сельских сетях до 1000 В, питаемых от энергосистемы через понижающие трансформаторы, проводят при условии, что высшее напряжение трансформатора на шинах — неизменно и равно номинальному.

Расчет проводят для двух точек 1 и 2 (рис. 12.3). Первую точку выбирают на шинах 0,4 кВ трансформатора. В ней определяют значение тока трехфазного короткого замыкания и по нему проверяют стойкость аппаратуры и согласование действия защит трансформатора и линии 0,4 кВ. Вторую точку выбирают в наиболее отдаленном месте линии и в ней определяют ток однофазного короткого замыкания. По этому току проверяют эффективность системы зануления. При расчетах значения сопротивлений элементов цепи удобнее принимать в миллиомах (мОм).

Удельное реактивное сопротивление воздушных линий принимают равным $x_{в.л} = 400$ мОм/км, а кабельных $x_{к.л} = 80$ мОм/км. Сопротивление линий длиной l определяют по формуле $x_{в.л} = x_{уд.л} l$, $x_{к.л} = 80 l$ мОм.

Активное сопротивление воздушных и кабельных линий определяют по формуле

$$r = \frac{l}{\gamma S} 10^6,$$

где l — длина линии, км; γ — удельная проводимость, м/(Ом · мм²); S — площадь поперечного сечения проводов, мм².

Активное и индуктивное сопротивления трансформаторов можно определять по данным каталогов и справочников.

Относительное активное сопротивление трансформатора

$$r_{*T} = \Delta P_k / S_{н.Т},$$

где ΔP_k — потери короткого замыкания в трансформаторе, кВт; $S_{н.Т}$ — номинальная мощность трансформатора, кВ · А.

Относительное индуктивное сопротивление трансформатора находят как

$$x_{*T} = \sqrt{\left(\frac{u_k\%}{100}\right)^2 - r_{*T}^2}.$$

Индуктивное сопротивление шин прямоугольного сечения

$$x = 0,1445 \lg \frac{4a_{ср}}{h},$$

где $a_{ср} = \sqrt[3]{a_{12}a_{13}a_{23}}$ — среднегеометрическое расстояние между фазами, мм; h — высота шины, мм.

Активные и индуктивные сопротивления катушек максимального тока автоматов принимают по заводским данным или результатам измерений.

Часть сопротивлений цепи короткого замыкания может быть задана только в относительных единицах. Чтобы выразить эти относительные сопротивления в миллионах, их надо пересчитать по формуле

$$x = x_* \frac{U_n}{S_n} 10^6.$$

Здесь номинальное напряжение в кВ, а мощность в кВ · А.

Преобразование схемы для определения токов короткого замыкания обычно сводится к сложению последовательно соединенных активных и индуктивных сопротивлений, так как сельские сети до 1000 В обычно имеют одностороннее питание: $x_{\Sigma} = \sum x$, $r_{\Sigma} = \sum r$.

Если встречаются параллельные ветви (рис. 12.3, а), например при питании от двух параллельно работающих трансформаторов, активное и индуктивное сопротивления можно определить по формуле параллельного сложения двух элементов. Если справедливо соотношение

$$\frac{r_1 + r'_1}{x_1 + x'_1} \approx \frac{r_3 + r'_3}{x_3 + x'_3}, \text{ то для точки } I \text{ с учетом формул (12.3):}$$

$$r_{\Sigma 1} = \frac{(r_1 + r'_1)(r_3 + r'_3)}{r_1 + r'_1 + r_3 + r'_3}, \quad x_{\Sigma 1} = \frac{(x_1 + x'_1)(x_3 + x'_3)}{x_1 + x'_1 + x_3 + x'_3};$$

для точки 2:

$$r_{\Sigma 2} = r_{\Sigma 1} + r_2, \quad x_{\Sigma 2} = x_{\Sigma 1} + x_2; \quad z_{\Sigma 2} = \sqrt{r_{\Sigma 2}^2 + x_{\Sigma 2}^2}.$$

Ток трехфазного короткого замыкания (кА) определяют по формуле:

$$I_k = \frac{U_n}{\sqrt{3} \sqrt{r_\Sigma^2 + x_\Sigma^2}} 10^3. \quad (12.5)$$

Ударный ток короткого замыкания находят как

$$i_y = k_y \sqrt{2} I_k,$$

где k_y — ударный коэффициент.

Если не требуется точно определять ударный ток, то при коротком замыкании на главных распределительных щитах, которые питаются от трансформаторов мощностью 560...1000 кВ·А, при $u\% = 5,5$ можно принять $k_y = 1,3$. Для трансформаторов мощностью 100...320 кВ·А с $u\% = 5,5$ $k_y = 1,2$. Если замыкание происходит в более отдаленных точках, то $k_y = 1$.

Влияние асинхронных двигателей учитывается в том случае, если они включены у самого места короткого замыкания. Тогда полное мгновенное значение ударного тока в месте короткого замыкания от питающей сети и электродвигателей составляет

$$i_y = \sqrt{2} (k_y I_k + 4,5 I_{н.дв}) = 1,41 k_y I_k + 6,5 I_{н.дв}, \quad (12.6)$$

где $I_{н.дв}$ — номинальный ток двигателя.

Токи однофазного короткого замыкания $I_k^{(1)}$ в сетях напряжением 380/220 В определяют приблизительно по формуле

$$I_k^{(1)} = \frac{U_\phi}{z_r/3 + z_n}, \quad (12.7)$$

где U_ϕ — фазное напряжение сети; z_r — полное сопротивление трансформатора току замыкания на корпус; z_n — полное сопротивление петли фазный — нулевой провода линии

$$= l \sqrt{(r_{уд.ф} + r_{уд.н})^2 + (x_{уд.ф.внут} + x_{уд.н.внут} + x_{уд.н.внеш})^2},$$

где $r_{уд.ф}$ и $r_{уд.н}$ — удельные активные сопротивления фазного и нулевого проводов; $x_{уд.ф.внут}$, $x_{уд.н.внут}$ — удельные индуктивные внутренние сопротивления; $x_{уд.н.внеш}$ — внешнее индуктивное сопротивление всей петли (цепи).

Все эти сопротивления приводятся в справочниках.

Если линия выполнена проводами разных марок и площадей сечения, то сначала определяют сопротивление петли для каждого участка, а затем суммируют их. Для проводов из любого материала участка принимают: внешнее индуктивное сопротивление петли $x_{уд.н.внеш} = 0,6$ Ом/км. Если провода выполнены из цветных металлов, то их внутренним индуктивным сопротивлением пренебрегают.

Согласование защиты с током короткого замыкания. При защите линий плавкими предохранителями или автоматическими выключателями с тепловыми расцепителями этот ток должен не менее чем в три раза превышать номинальный ток плавкой вставки или установки теплового расцепителя.

Активное сопротивление проводников за время действия короткого замыкания вследствие повышения температуры меняется. Поэтому сначала определяют ток короткого замыкания без учета влияния нагрева проводников. Потом выполняют повторный расчет с учетом изменившихся активных сопротивлений отдельных участков цепи короткого замыкания. Изменившееся вследствие нагрева током короткого замыкания сопротивление (мОм) определяют по формуле

$$r' = r \left[1 + \frac{mt}{1 + 0,004\theta_0} \left(I_k / S \right)^2 \right],$$

где r — сопротивление проводника до момента короткого замыкания, мОм; S — площадь поперечного сечения проводника, мм²; I_k — ток короткого замыкания по предварительному расчету без учета нагрева, кА; m — коэффициент, равный для меди 22, а для алюминия — 5; t — время действия тока короткого замыкания, с; θ_0 — температура проводника перед началом короткого замыкания (можно принимать равной 50°C).

12.4. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К КОММУТАЦИОННОЙ АППАРАТУРЕ

Аппаратура для включения, отключения и переключения цепей должна быть надежной в работе и выдерживать нормированное число коммутационных операций, надежно выполнять функции в ожидаемых аномальных режимах работы, быть безопасной в работе, иметь простое устройство, быть удобной в монтаже и обслуживании, иметь малые расходы материалов и энергии.

Для коммутационной аппаратуры нормируют предельно допустимую температуру токоведущих частей, зависящую от условий окружающей среды и используемых металлов. Контакты выполняют из алюминия и его сплавов, меди и ее сплавов, серебра, из металлокомпозигов, получаемых спеканием порошков двух или более металлов (металлокерамика). Чтобы медные контакты не окислялись, их лудят. Окись серебра является хорошим проводником, поэтому серебряные контакты наиболее надежны. В изготовлении композиционных материалов используют также вольфрам, молибден, кадмий, никель, цинк и другие металлы.

Изоляция аппаратов в процессе эксплуатации должна выдерживать воздействие температуры, электрической дуги и влаги.

При размыкании электрических цепей с током нагрузки или током короткого замыкания на контактах возникает электрическая дуга, вызывающая разрушение контактов, а иногда и всего аппарата. Поэтому аппараты, предназначенные для отключения цепей под током, снабжают приспособлениями для быстрого гашения дуги.

Аппараты на напряжение до 1000 В оборудованы деионными решетками и искрогасительными камерами.

Камеру выполняют из асбестоцементных или керамических стенок и омедненных стальных пластин, размещаемых в пазах стенок поперек плоскости расположения силовых контактов. Электрическая дуга, которая образуется при размыкании больших токов, втягивается в искрогасительные камеры магнитным полем, появляющимся под действием самой дуги, и разбивается на отдельные участки в деионной решетке. Она при этом интенсивно гасится, так как омедненные пластины с

способствуют деионизации искрового промежутка: токоведущие частицы воздуха — ионы — при прохождении через решетку соприкасаются с пластинами и нейтрализуют свой заряд, получая свободный электрон с ее поверхности.

В высоковольтных выключателях дуга гасится в основном при помощи масляной струи или газового (воздушного) дугья (см. гл. 14).

Износ контактов носит механический характер (изменение формы контактной поверхности), химический (коррозия от окисления), электрический (эрозия контакта из-за переноса металла с одного контакта на другой). С целью повышения износостойкости контактов шунтируют сами контакты или индуктивные сопротивления цепи устройствами, состоящими из резисторов, конденсаторов, вентилях. При размыкании цепи в этом случае часть энергии дуги гасится в шунтирующем устройстве.

12.5. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К АППАРАТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ. СТЕПЕНЬ ЗАЩИТЫ АППАРАТОВ ОТ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

Все элементы электроустановок, как правило, выбирают на такую мощность или на такую длительную допустимую нагрузку, при которых не происходит чрезмерного перегрева этих элементов в условиях нормальной эксплуатации. Лишь в аварийных ситуациях допускаются перегрузки, приводящие к некоторому ускорению старения изоляции, но не угрожающие ее разрушением или нарушением работы. Это в равной мере относится к трансформаторам, генераторам, электродвигателям, аппаратам, проводам, кабелям, шинам и т. д. Конструкцию, вид исполнения, способ установки и класс изоляции электрооборудования и материалов выбирают в соответствии с номинальным напряжением сети и условиями окружающей среды.

Обозначение степени защиты электрооборудования при помощи оболочек, кроме оболочек электробытовых приборов, проводов, кабелей, и других монтажных материалов состоит из двух букв латинского алфавита IP* и двух цифр (табл. 12.1). Первая цифра характеризует степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими или движущимися частями оборудования под оболочкой, а также степень защиты оборудования от попадания внутрь оболочки твердых посторонних предметов. Вторая цифра характеризует степень защиты оборудования от проникновения воды.

Первая цифра может быть 0...6 и означать следующее:

0 — отсутствует какая-либо защита персонала от возможности соприкосновения с токоведущими или движущимися частями внутри оболочки, а также от попадания под оболочку твердых посторонних предметов;

1 — защита от случайного соприкосновения большого участка поверхности человеческого тела с токоведущими или движущимися частями; отверстия в ограждении таковы, что сквозь них не проходит шар диаметром 52,5 мм;

* International Protection — международные нормы защиты (ГОСТ 14254-80).

12.1. Предпочтительные степени защиты электрооборудования

Степень защиты от прикосновения и попадания посторонних тел	Обозначение защиты электрооборудования при степени защиты от проникновения воды								
	0	1	2	3	4	5	6	7	8
0	IP00	IP01	—	—	—	—	—	—	—
1	IP10	IP11	IP12	IP13	—	—	—	—	—
2	IP20	IP21	IP22	IP23	—	—	—	—	—
3	IP30	IP31	IP32	IP33	IP34	—	—	—	—
4	IP40	IP41	IP42	IP43	IP44	—	—	—	—
5	IP50	IP51	—	—	IP54	IP55	IP56	—	—
6	IP60	—	—	—	—	IP65	IP66	IP67	IP68

2 — защита от соприкосновения пальцев человека с токоведущими или движущимися частями и от попадания посторонних предметов размером 12,5 мм в поперечнике;

3 — защита от проникновения под оболочку инструмента, проволоки и твердых предметов диаметром не менее 2,5 мм;

4 — то же, при диаметре не менее 1 мм;

5 — защита от соприкосновения с любым предметом и от вредного отложения пыли;

6 — полная защита от попадания пыли.

Вторая цифра может иметь значение от 0 до 8, каждая из которых соответствует следующему содержанию:

0 — защита от проникновения воды отсутствует;

1 — имеется защита от вертикально падающих капель (капли падают на оболочку, не попадая внутрь на оборудование);

2 — защита от капель, падающих под углом 15° к вертикали;

3 — защита от дождя, падающего под углом от 0 до 60° к вертикали;

4 — защита от брызг любого направления;

5 — защита от водяных струй любого направления;

6 — защита от захлестывания водой, например морской волной на палубе корабля;

7 — при погружении в воду она не проникает внутрь в течение времени, указанного в стандарте на оборудование;

8 — при неограниченно долгом пребывании под водой она не проникает внутрь.

Если для изделия нет необходимости в одном из видов защиты, допускается в условном обозначении проставлять знак X вместо цифры.

Условные обозначения степеней защиты наносят на оболочке изделия, на табличке с паспортными данными или на других обусловленных техническими условиями местах.

Контрольные вопросы к главе 12. 1. Какие виды коротких замыканий могут возникнуть в трехфазных сетях? 2. Каковы причины коротких замыканий? 3. Для чего необходимо знать максимальные и минимальные значения токов коротких замыканий? 4. Как формируется ударный ток при коротком замыкании? 5. Почему ударный ток возникает через 0,01 с после момента короткого замыкания? 6. Как рассчитывают ток короткого замыкания в сети напряжением до 1000 В? 7. Что такое ударный коэффициент? 8. Каково назначение реактора?

Глава 13. КОММУТАЦИОННАЯ И ЗАЩИТНАЯ АППАРАТУРА В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

13.1. РУБИЛЬНИКИ И ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

В качестве аппаратов для включения, переключения и выключения цепей постоянного и переменного тока в сетях напряжением 127/220 и 220/380 В используются рубильники, переключатели, пакетные выключатели, контакторы, магнитные пускатели.

Рубильники — простейшие аппараты для нечастых неавтоматических включений и отключений цепей напряжением до 1000 В — изготавливают одно-, двух- и трехполюсными. По конструкции рубильники могут быть открытого исполнения, предназначенные для компоновки распределительных устройств станций и подстанций, и защищенного исполнения с защитными кожухами — для отдельных электрических установок. Для применения в комплектных устройствах выпускаются следующие типы аппаратов.

Рубильники на номинальный ток 100...600 А типа Р могут быть одно-, двух- и трехполюсными. В обозначении, например, Р24 цифра 2 означает двухполюсный, 4 — на 400 А, Р36 — трехполюсный, на 600 А. Для привода этих рубильников используют центральную рукоятку с передним или задним присоединением. Рубильники на ток 100...600 А с центральным рычажным приводом типа РПЦ могут быть двух- и трехполюсными (рис. 13.1).

Рубильники на 800...1500 А также обозначают буквой Р, но с четырехзначной цифрой. Управляют ими при помощи либо центральной рукоятки, либо штанги или маховичного привода.

Переключатели на ток 100...600 А обозначают буквой П с двумя цифрами (например, П21 — двухполюсный, на 100 А), если для привода используется центральная рукоятка, или буквами ППЦ, если привод центральный рычажный. Переключатели на 800...1500 А обозначают буквой П с четырехзначным числом.

Рубильники и переключатели с боковой рукояткой обозначают соответственно РБ, РПБ, ПБ, ППБ, а рубильники с управлением штангой — РШ, со смешанным приводом — РС.

Рубильники и переключатели некоторых типов оборудованы дугогасительными камерами или разрывными контактами с пружинами для ускорения размыкания. Предельный отключаемый ток рубильников и переключателей без дугогасительных камер и без разрывных контактов составляет до 30% номинального при 380 В в сети переменного тока. Цепи напряжением 500 В отключать под током не допускается. Рубильниками и переключателями с дугогасительными камерами или разрывными контактами допускается при напряжении до 380 В отключать номинальный ток, а при напряжении 500 В — 50% номинального.

На напряжение 660 В изготавливают рубильники Р11 на номинальный ток 100...250 А с боковой рукояткой, Р15 и Р16 на ток 100...250 А для встраивания в ящики, однополюсные и трехполюсные рубильники-разъединители Р2000 на номинальный ток 800...4000 А и др.

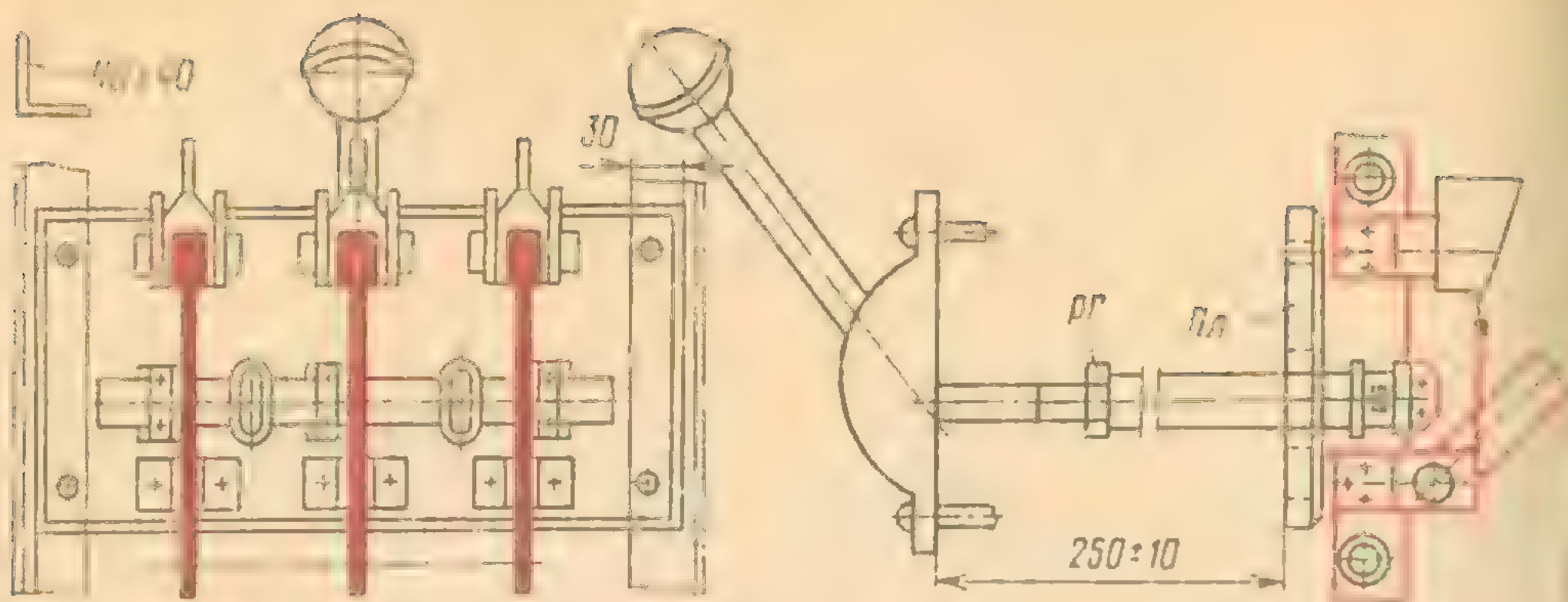


Рис. 13.1. Эскиз рубильника РПЦ с рычажным центральным приводом: РГ — гайка, регулирующая расстояние между панелью *Пан* и плитой *Пл*.

Нажимные вибростойкие пускатели серий ПНВ-30 открытого исполнения и ПНВ-32 защищенного предназначены для управления трехфазными асинхронными электродвигателями мощностью до 4,5 кВт при напряжении до 500 В, а пускатели серий ПНВС-10 и ПНВС-10Т защищенные и ПНВС-12 открытые — для управления двигателями мощностью до 0,6 кВт при напряжении до 380 В. Контактная система, состоящая из изолирующей планки с закрепленными на ней подвижными контактными мостиками, после нажатия кнопки «Пуск» удерживается в фиксированном замкнутом состоянии пружинной защелкой. При нажатии кнопки «Стоп» защелка освобождает планку с контактами, и цепь размыкается.

В пускателях ПНВС средний контактный мостик после прекращения действия на кнопку «Пуск» остается в разомкнутом состоянии. Этот пускатель предназначен для пуска конденсаторных однофазных двигателей; конденсаторы при этом подключают к среднему мостику; после разгона электродвигателя и прекращения нажатия на кнопку «Пуск» пусковой конденсатор отключается.

Рубильники и переключатели для электроустановок выбирают по номинальному напряжению, предельному отключаемому току, типу исполнения.

13.2. ПАКЕТНЫЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ И ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛИ

Пакетные выключатели и переключатели типов ПВМ и ППМ применяют в качестве коммутационных аппаратов в цепях с током до 400 А при напряжении 220 В и до 250 А при напряжении 380 В.

Выключатель состоит из отдельных пакетов, каждый из которых образует полюс, включаемый в одну цепь выключателя. Неподвижные контакты каждого пакета занимают определенное положение, смещенное по отношению к контактам других пакетов. В пакетных выключателях применен механизм мгновенного переключения: скорость коммутационных операций не зависит от скорости вращения рукоятки пакетного выключателя рукой. В этом их важное преимущество перед рубильниками. Кроме того, пакетные выключатели компактны.

Рис. 13.2. Пакетные выключатели:

а — эскиз трехполюсного пакетного выключателя типа ПВМ-3; б — схема включения трехполюсного пакетного выключателя; в — схема коммутации переключателя типа ПП-2-10 / Н2 на 2 направления.

хорошо изолированы от внешней среды и не только быстро, но и надежно (на каждом полюсе в двух местах) разрывают значительные токи. В зависимости от способа монтажа пакетные выключатели и переключатели выпускают следующих исполнений: 1, 2 — с задним присоединением внешних проводов к панели и 3 — с передним присоединением.

По роду защиты от внешних воздействий различают открытое, защищенное и герметизированное исполнение этих аппаратов.

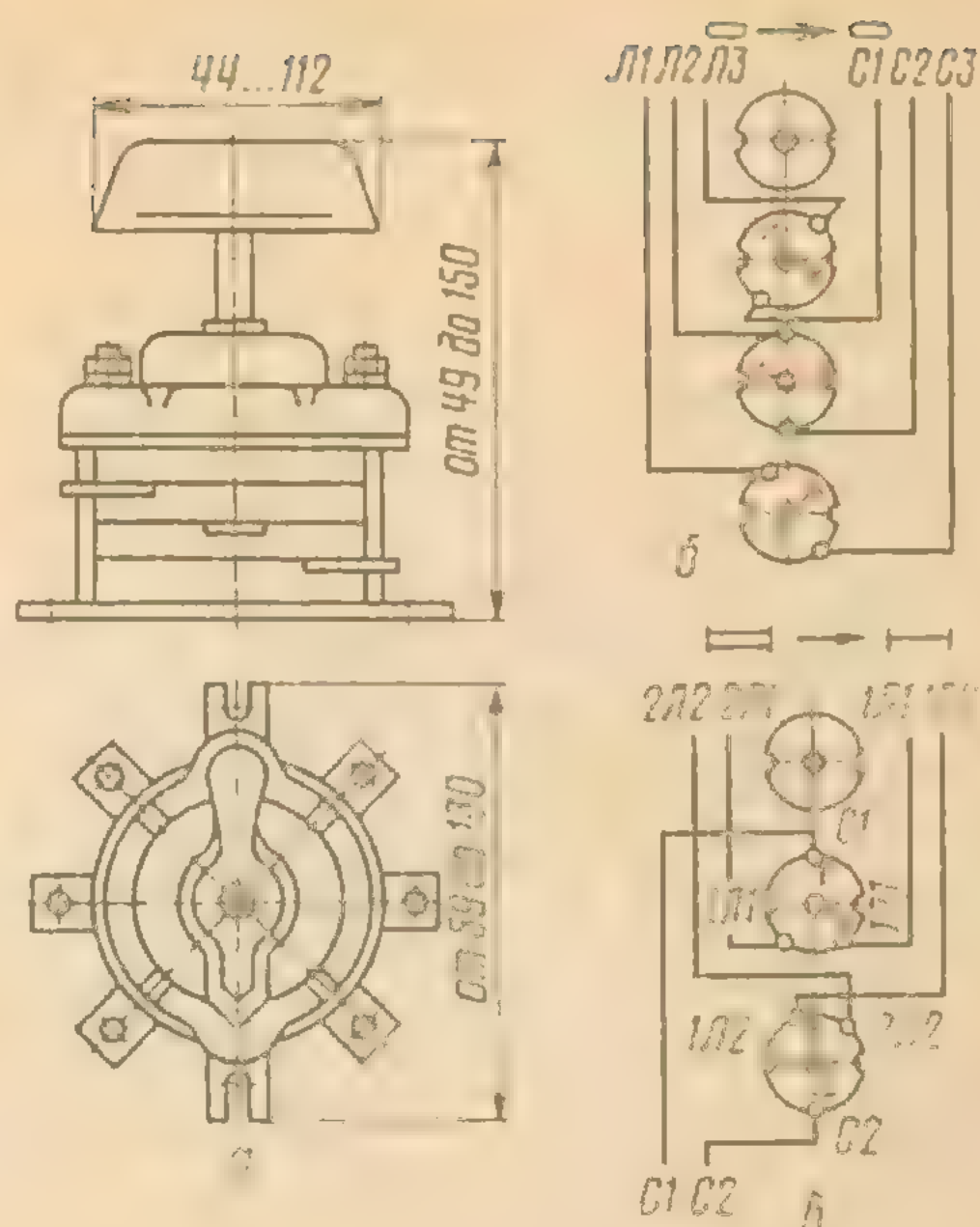
В обозначении выключателя зашифрованы следующие данные: например, ПВМ-3-10 — пакетный выключатель открытого исполнения, трехполюсный, на номинальный ток 10 А; ГППМ-2-60/Н2 — пакетный переключатель герметизированный, двухполюсный, на 60 А, на 2 направления; ВПКМ-3-25 — в брызгонепроницаемом исполнении, трехполюсный, на 25 А; ВГПМ-2-10 — пакетный выключатель герметизированный (в пластмассовой оболочке), двухполюсный, на 10 А.

На рисунке 13.2, а и б показаны эскиз и схема выключателя ПВМ-3, а на рисунке 13.2, в — схема переключателя ПП-2-10/Н2.

Барабанные переключатели серий БП предназначены для ручного включения, отключения и реверсирования короткозамкнутых асинхронных электродвигателей, а переключатели серий БП и БПК — для переключения полюсов многоскоростных двигателей, а также для использования в схемах автоматики. Переключатели БП выпускают открытого и защищенного исполнения, на три фиксированных положения — левое, среднее (отключение), правое, а переключатели БП и БПК — с 2...5 положениями рукоятки для переключения от 3 до 18 цепей на номинальные токи 2,5; 5; 10; 35 и 50 А.

Пакетно-кулачковые переключатели и выключатели серий ПКП и ПКВ на номинальные токи 10, 25, 63, 100 и 160 А предназначены для коммутации электрических цепей переменного тока с номинальным напряжением 380 В, для включения, отключения и переключения полюсов асинхронных короткозамкнутых электродвигателей.

В некоторых барабанных переключателях, например в переключателях со звезды на треугольник (типа ЗТ), рукоятка вращается только в одном направлении, предохраняя от ошибок при пуске электродвигателей: из нейтрального положения можно включить обмотку только звездой, а затем следующим переключением — треугольником. После этого — положение «выключено».



Общим недостатком пакетных аппаратов следует считать сравнительно небольшой срок службы, определяемый состоянием выступов основного рабочего элемента — фиксирующей шайбы.

13.3. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ВЫКЛЮЧАТЕЛИ (АВТОМАТЫ)

Автоматические выключатели предназначены для ручного включения и отключения электрических цепей, для автоматического их отключения при перегрузке, коротком замыкании, снижении напряжения, а также для пуска и защиты асинхронных двигателей.

В сельскохозяйственных установках применяются в основном автоматы типов АП150, АК63, АЗ100, АЕ3700, АЕ2000, АЕ1000.

В связи с введением в ГОСТ напряжения 660 В разработана серия автоматических выключателей АЕ3700. Они имеют коммутационную способность до 200 кА и долговечность до 16 млн. циклов включения и отключения. Номинальные токи 160, 250, 400, 630 А. В обозначении АЕ3700 после номера серии (37) вместо нулей могут быть цифры и буквы (АЕ37 $X_1 X_2 X_3 X_4$), которые расшифровываются так:

X_1 — величина выключателя: 1 — 160 А, 2 — 250 А, 3 — 400 А, 4 — 630 А.

X_2 — число полюсов выключателя и вид расцепителя: 1 — двухполюсный с электромагнитным расцепителем, 2, 4 и 6 — трехполюсные с расцепителями соответственно электромагнитными, полупроводниковыми и электромагнитными, тепловыми и электромагнитными, 3 — двухполюсный с полупроводниковыми и электромагнитными расцепителями или только с полупроводниковыми, 7, 8 — двухполюсный и трехполюсный без расцепителей;

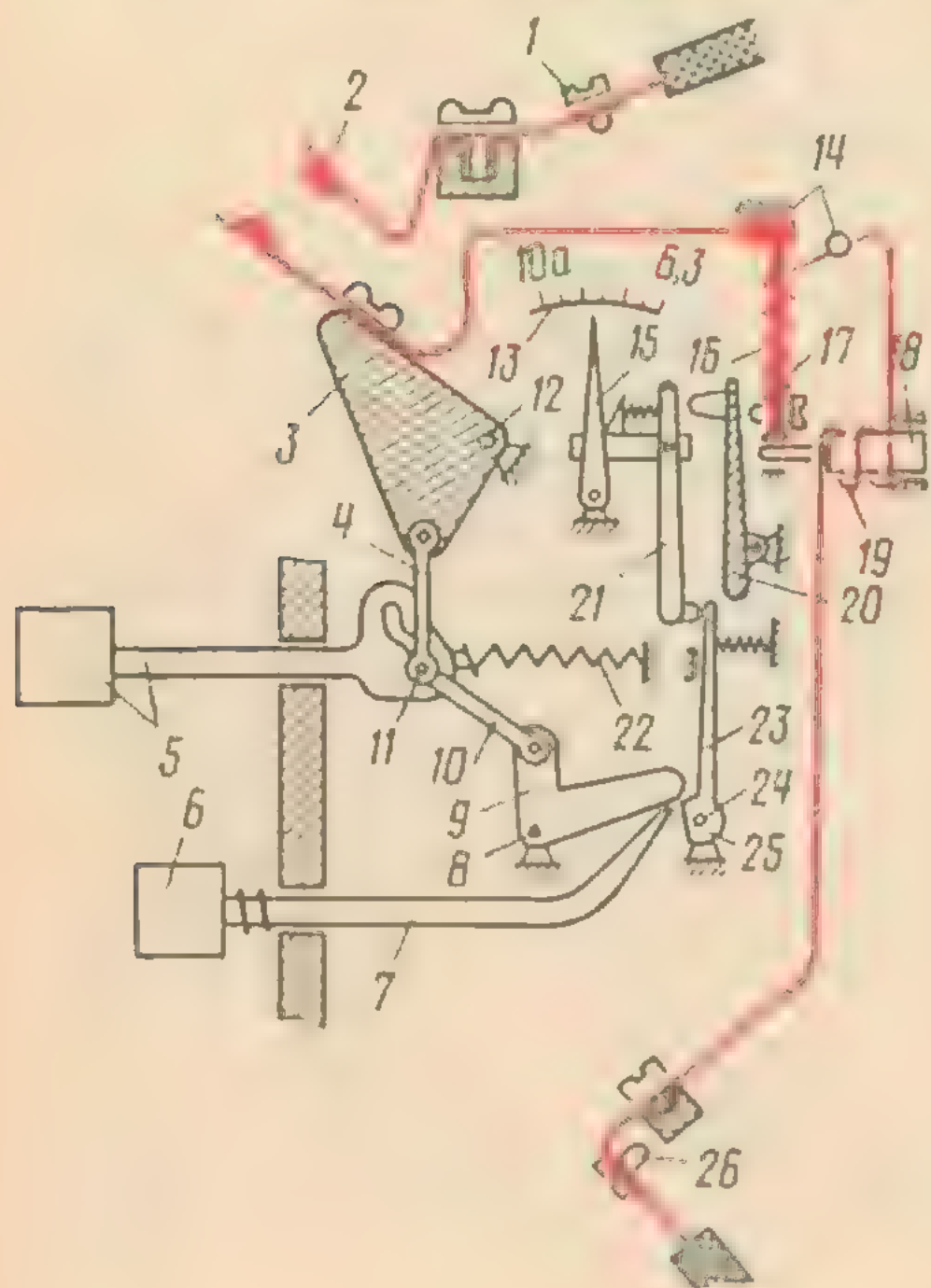
X_3 — род защиты: Б — токоограничивающая, С — селективная, Н — неавтоматическая;

X_4 — страна для экспорта: У — с умеренным климатом, Т — с тропическим климатом, ХЛ — с холодным климатом.

Принцип действия автомата АП150 можно уяснить, пользуясь его электромеханической схемой, приведенной на рисунке 13.3. Три пары силовых контактов 2 укреп-

Рис. 13.3. Электромеханическая схема автомата АП150:

1 — контакты для присоединения сети; 2 — контакты силовой цепи; 3 — поворотная траверса из изоляционного материала; 4, 9 и 10 — рычаги механизма свободного расцепления; 5 и 6 — кнопки включения и отключения; 7 — рычаг кнопки отключения; 8 и 11 — оси рычагов; 12 — ось траверсы; 13 — шкала уставок теплового расцепителя; 14 — зажимы для подключения теплового расцепителя; 15 и 21 — рычаги механизма автоматического отключения; 16 — биметаллическая пластина; 17 — нагревательный элемент; 18 — сердечник электромагнитного расцепителя; 19 — катушка электромагнитного расцепителя; 20 — траверса; 22 — пружина; 23 — рычаг защелки; 24 — ось защелки; 25 — защелка; 26 — контакты для присоединения силовой нагрузки.



лены на траверсах из изоляционного материала. Нижняя траверса 3 может поворачиваться относительно оси 12. Включают аппарат, нажав (вправо на рисунке) кнопку 5. При этом развилка кнопки толкает ось 11 шарнирного соединения рычагов 4 и 10 механизма свободного расцепления. Траверса 3 и рычаги 4, 9 и 10 механизма свободного расцепления занимают спрямленное положение: силовые контакты замкнуты, ось 11 оказалась правее линии, соединяющей противоположные оси рычагов 4 и 10, а свободное плечо рычага 9 упирается в защелку 25. Пружина 22 сжата и напряжена. В этом состоянии автомат пребывает до момента выключения.

Чтобы отключить аппарат вручную, нажимают кнопку 6. При этом рычаг 7 кнопки выводит защелку 25 из зацепления с рычагом 9. Под действием пружины 22 механизм свободного расцепления занимает положение, при котором контакты 1 (сеть) отъединены от контактов 26 (электродвигатель): автомат отключил установку от сети.

Автоматическое отключение при перегрузках выполняет тепловой расцепитель, состоящий из биметаллической пластины 16 и нагревательного элемента 17. Тепловой расцепитель включен в силовую цепь тока (зажимы 14) и может быть при помощи винта отрегулирован по шкале 13 на различные значения тока срабатывания. Когда ток в цепи превышает установленный, биметаллическая пластина нагревается сильнее обычного и нижним концом толкает влево траверсу 20 (она расположена вдоль всех трех тепловых и электромагнитных расцепителей). Траверса передает усилие на плечо рычага 21, который нижним концом отклоняет вправо плечо защелки 25. Поворачиваясь относительно оси 24, защелка выводит из зацепления рычаг 9 механизма свободного расцепления, и автомат отключается. Уставку тока теплового расцепителя можно задать, перемещая рычаг 15 относительно шкалы 13 и меняя тем самым расстояние между рычагом 21 и траверсой 20.

При коротких замыканиях функции отключения выполняет электромагнитный расцепитель, состоящий из катушки (несколько витков силового провода) и находящегося внутри нее сердечника 18 с голкателем. В момент короткого замыкания при токе, в 7...10 раз большем номинального, сердечник втягивается в катушку, голкатель ударяет в траверсу 20, та воздействует на рычаг 21, этот рычаг — на плечо 23 защелки 25, освобождающей пружину, — автомат отключается практически мгновенно. Если в автомате установлены только тепловые расцепители, то последовательно с ним должны быть включены предохранители, защищающие установку от токов короткого замыкания.

Силовые контакты могут быть снабжены искрогасительными (дугогасительными) камерами с деионными решетками.

Автоматы АИ150, получившие наибольшее распространение в сельском хозяйстве, могут быть настроены для работы с электродвигателями мощностью до 20 кВт при напряжении 380 В и до 14 кВт при напряжении 220 В.

Если трехфазный (цифра 3) автомат снабжен только тепловым расцепителем, его обозначение АИ150-3Т; если только электромагнитным — АИ150-3М; если же тем и другим — АИ150-3МТ. В автомате АИ150 могут быть установлены тепловые расцепители на номинальные токи (с регу-

лированием уставки в пределах от 63 до 100% их значений): 1,6; 2,5; 4; 10; 16; 25; 40; 50 А. Гарантийный срок службы составляет 20 000 включений и отключений при номинальных значениях тока и напряжения.

Автоматы типов АК50 и АЕ20 выпускают со шкалой номинальных токов расцепителей от 0,6 до 50 и от 0,6 до 63 А соответственно. Выключателям АЕ20 свойственна более высокая отключающая способность, поскольку токоведущие контакты выполнены с двойным разрывом, а дуга гасится в камерах с деионной решеткой.

Автоматические выключатели АЕ2000 цепей напряжением до 600 В переменного тока с электромагнитными и комбинированными расцепителями выпускаются трех величин: 4 — на номинальный ток 63 А, 5 — на 100 А, 6 — на 160 А. Автоматы АВВ — быстродействующие взрывобезопасные, предназначены для помещений с повышенной взрывоопасностью. Для цепей постоянного тока предназначены автоматы АЕ25.

Автоматы серии Э — «Электрон» выпускаются на номинальные токи 630 А (Э-06В), 1000 А (Э-10В), 1600 А (Э-16В), 2500 А (Э-25В), 4000 А (Э-40В) для напряжений до 660 В.

Автоматические однополюсные выключатели серии АЕ1000, предназначенные для защиты от перегрузок, коротких замыканий и нечастой коммутации (до 6 в 1 ч) осветительных сетей, устанавливают в однофазных цепях переменного тока до 25 А напряжением до 240 В. Уставки номинального тока расцепителя 6, 10, 16 и 25 А.

Пробочные автоматы, ввертываемые в корпуса обычных пробочных предохранителей (вместо пробок), автоматически отключают линию при перегрузках и коротких замыканиях. Чтобы вновь включить автомат, необходимо нажать кнопку, расположенную на пробке.

13.4. КОНТАКТОРЫ. МАГНИТНЫЕ ПУСКАТЕЛИ

Контакторы переменного тока служат для дистанционного включения и выключения электроустановок. Контакторы КТП-6000 на напряжение 660 В выпускаются пяти величин на токи соответственно 100, 160, 250, 400, 630 А. Контакторы КТУ — на 63, 125 и 250 А, на напряжение до 660 В.

В обозначении контактора после букв следует ряд цифр, последняя из которых указывает величину контактора, предпоследняя — число полюсов, третья от конца — исполнение, отличное от основного (с дугогашением, без дугогашения).

Схема включения контактора приведена на рисунке 13.4. При нажатии кнопки SB2 катушка контактора КМ, по которой протекает ток, втягивает якорь магнитной системы и замыкает контакты КМ силовой цепи и блокировочный. Блокировочные контакты включены параллельно кнопке SB2 и оставляют цепь питания катушки замкнутой и после того, как кнопка SB2 будет отпущена.

При нажатии кнопки SB1 цепь катушки размыкается и якорь магнитной системы под действием пружины разъединяет силовые и блокировочные контакты.

Магнитные пускатели используют, как правило, для дистанционного управления (включение, отключение, реверсирование) трехфазными асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором мощностью до 75 кВт, напряжением до 500 В и для их защиты (автоматическое отключение двигателя при снижении напряжения на 50...60% номинального и, если есть тепловое реле, при перегрузках). Для защиты электроустановки от коротких замыканий последовательно силовым контактам магнитного пускателя устанавливают предохранители, которые должны быть рассчитаны на ток, не превышающий четырехкратный ток уставки теплового реле. В противном случае при коротком замыкании может сгореть нагревательный элемент теплового реле.

Широко применяемые магнитные пускатели серий ПАЕ, ПМЕ и заменяющие их ПМЛ (с трехполюсными тепловыми реле серии РТЛ) различают по габаритам, то есть по величине в зависимости от тока, по роду защиты от воздействия окружающей среды, по возможности реверсирования, по наличию или отсутствию тепловой защиты от перегрузки, по максимальному числу блок-контактов, встраиваемых в реле, и другим параметрам. Все эти данные зашифрованы в типовом обозначении магнитного пускателя: например, ПМЛ — $X_1X_2...X_7$. Буквы ПМЛ, ПМЕ, ПАЕ и др. обозначают серию пускателя. Цифры и буквы, записанные после серии, расшифровываются следующим образом:

X_1 — величина пускателя по номинальному току 1 — на 10 А, 2 — на 25 А, 3 — на 40 А, 4 — на 63 А, 5 — на 80 А, 6 — на 125 А, 7 — на 200 А;

X_2 — исполнение пускателей по назначению и наличию теплового реле 1 — нереверсивный без теплового реле, 2 — нереверсивный с тепловым реле, 5 — реверсивный пускатель без теплового реле с электрической и механической блокировками, 6 — реверсивный пускатель с тепловым реле с электрической и механической блокировками, 7 — пускатель «звезда-треугольник»;

X_3 — исполнение пускателей по степени защиты и наличию кнопок (0 — IP00 без кнопок, 1 — IP54 без кнопок, 2 — IP54 с кнопками «Пуск» и «Стоп», 3 — IP54 с кнопками и сигнальной лампой);

X_4 — число контактов вспомогательной цепи;

X_5X_6 — климатическое исполнение и категория размещения;

X_7 — исполнение по износостойкости (А — 2...4 млн. циклов, Б — 1 млн. циклов, В — 0,3 млн. циклов).

Электромагнитные пускатели серии ПМА выпускают четырех величин: 3 — номинальный ток 40 А, 4 — 63 А, 5 — 100 А, 6 — 160 А. Их защищают электротепловыми токовыми реле серии РТТ.

Пускатели ПМ712А — масляные, повышенной надежности против коррозии. Пускатели серий ПМЕ и ПАЕ 1, 2 и 3 габаритов защищают от перегрузок при помощи тепловых реле типа ТРН, а пускатели 4, 5 и 6 габаритов — при помощи реле типа ТРП.

Замыкают и размыкают цепь обмотки электромагнита пускателя

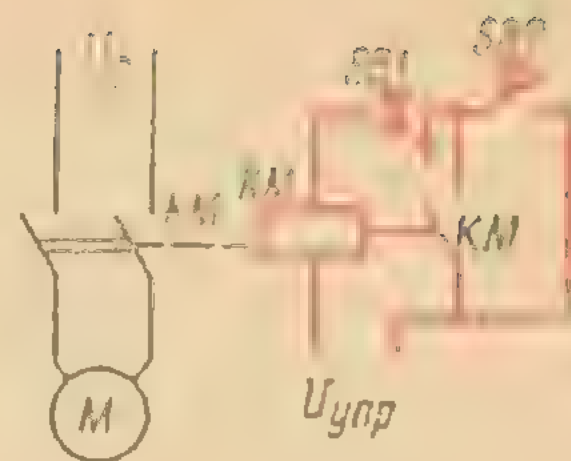


Рис. 13.4. Схема включения двухполюсного контактора:

КМ — силовые контакты, катушка и блокировочный контакт контактора; U_c — сеть, $U_{упр}$ — цепь управления.

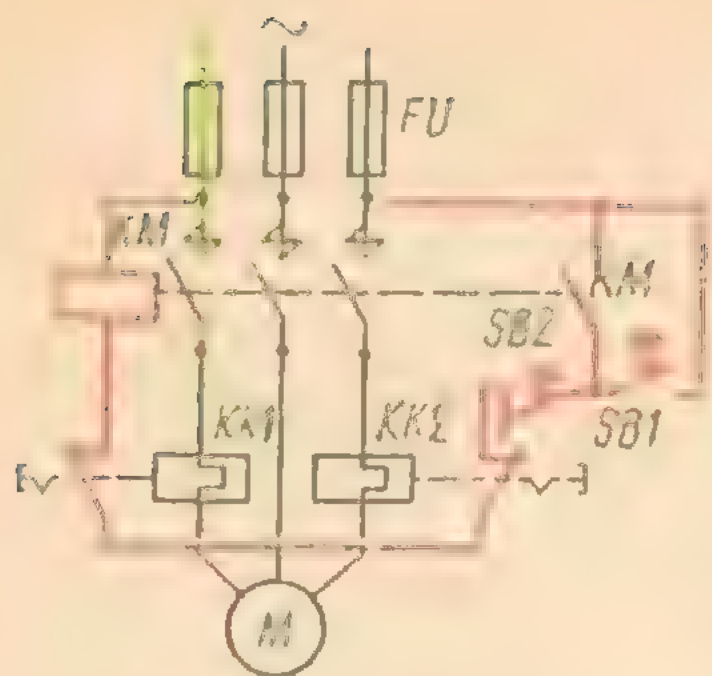


Рис. 13.5. Схема включения магнитного пускателя:

FU — предохранители, $KK1$ и $KK2$ — тепловые реле, нагревательные элементы которых установлены в цепи тока электродвигателя, а размыкающие контакты — в цепи управления магнитным пускателем.

кнопками управления, включенными в эту цепь последовательно.

Пускатели надежно включаются при напряжении сети от 85 до 105% номинального. Эти аппараты обладают высокой механической изнosoустойчивостью и без токовой нагрузки на контакты допускают 4...7 млн. циклов срабатывания (включения и отключения). Принципиальная схема включения магнитного пускателя с тепловым реле изображена на рисунке 13.5.

Магнитные пускатели серии ПМ11 в пыленепроницаемом (химостойком и общепромышленном) исполнении выпускаются 1...4 величин. Они предназначены для работы с короткозамкнутыми асинхронными электродвигателями напряжением 660 В при температуре от -40 до $+40^{\circ}\text{C}$ и влажности до 98% (при 20°C) и допускают до 240 включений

в 1 ч при повторности включений ПВ=40%. Тепловые реле типа ТРТ встроены в каждую фазу.

Устройство тепловых реле, а также других реле защиты электродвигателей подробно рассмотрено в главе 27.

Ручное дистанционное управление контакторами, магнитными пускателями и другими аппаратами осуществляется при помощи кнопок, кнопочных станций, постов управления, выпускаемых в различных исполнениях.

13.5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЛЕ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ЦЕПЯХ УПРАВЛЕНИЯ И СИГНАЛИЗАЦИИ

Электрические реле, то есть реле, реагирующие на изменение электрических величин (тока, напряжения, мощности, частоты), по принципу действия подразделяют на электромагнитные, индукционные, тепловые, электродинамические и некоторые другие.

Электромагнитные реле, получившие самое широкое распространение, просты по устройству, надежны, работают как на постоянном, так и на переменном токе. Собственное время их срабатывания — сотые доли секунды; они могут быть снабжены также механизмом выдержки времени. По конструкции различают электромагнитные реле клапанного и соленоидного типов и с поворотным якорем.

К реле клапанной конструкции относятся, в частности, различные промежуточные реле (рис. 13.6,а) типа РП, РПУ и др. В нормальном положении клапан 4 реле оттянут от сердечника пружиной 3 и его контакты 2 разомкнуты, а 1 замкнуты. Когда по катушке реле протекает ток, клапан реле притягивается к сердечнику. При этом замыкающий контакт 2 замыкается, а размыкающий 1 размыкается. Некоторые реле этого типа снабжены короткозамкнутым витком 5, назначение которого — снизить вибрации клапана (и контактов) при работе на пере-

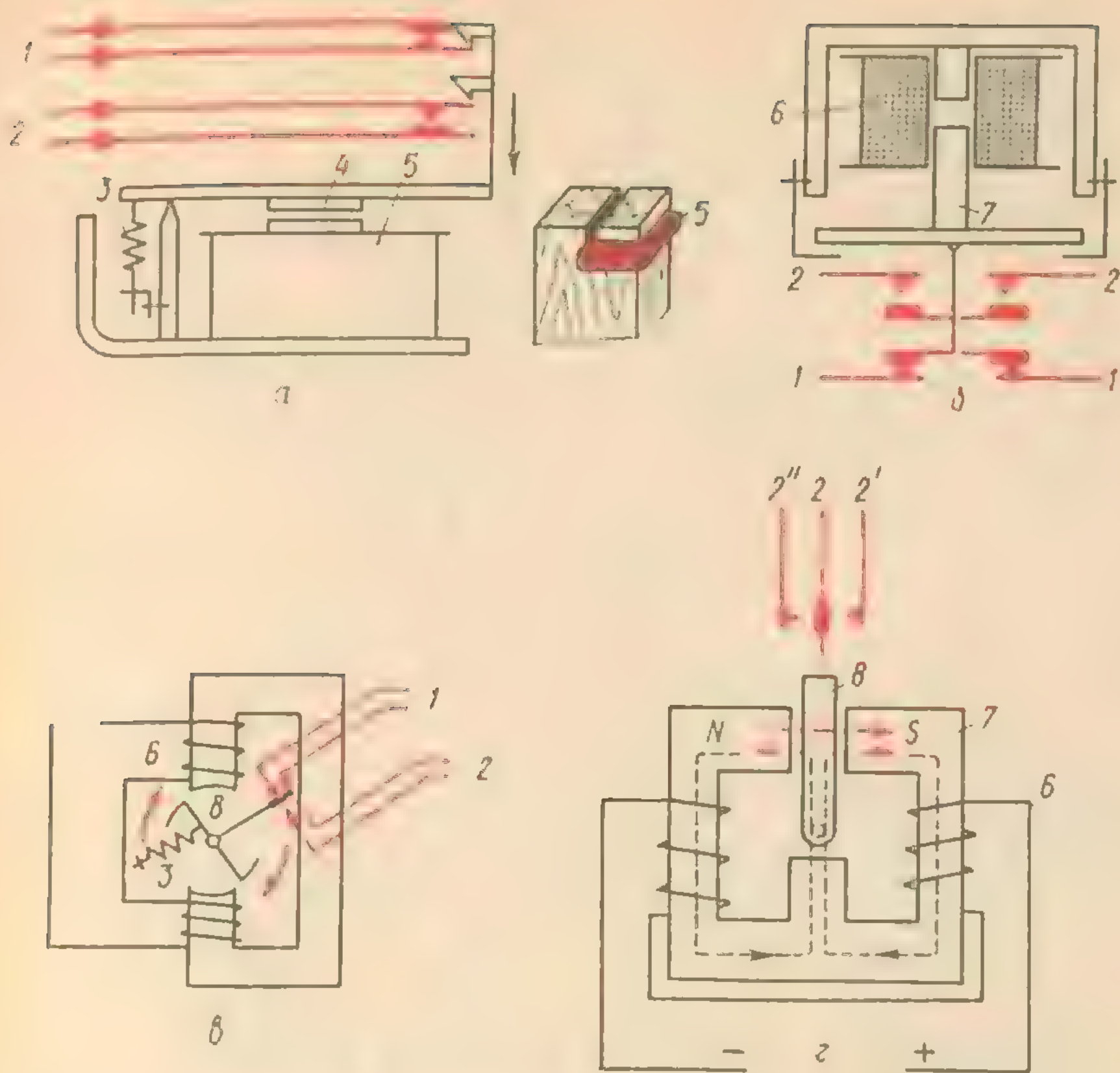


Рис. 13.6. Схемы конструкций электромагнитных реле:

а — клапанного; *б* — соленоидного; *в* — с поворотным якорем; *г* — поляризованного;
 1 — размыкающие контакты; 2 — замыкающие контакты; 3 — пружина; 4 — клапан реле;
 5 — короткозамкнутый виток; 6 — катушка реле; 7 — сердечник; 8 — якорь.

менном токе. В этом витке под действием первичного магнитного потока индуцируется ток витка, который изменяет общий поток части сердечника, охваченный витком, несколько сдвигая его во времени по отношению к основному потоку сердечника реле. Суммарный поток сглаживается, благодаря чему вибрации уменьшаются.

К реле соленоидной конструкции (рис. 13.6, б) относится ряд реле управления. В нормальном положении контакты 2 разомкнуты, а контакты 1 замкнуты. Когда же по катушке 6 протекает ток, сердечник 7 втягивается и контакты 2 замыкаются, а контакты 1 размыкаются.

В реле с поворотным якорем в нормальном положении якорь 8 под действием пружины 3 занимает несколько наклонное положение. При этом контакты 1 замкнуты, а контакты 2 разомкнуты. Если по катушке 6 протекает ток, то якорь 8 занимает вертикальное положение. Контакты 1 размыкаются, а контакты 2 замыкаются.

Поляризованное высокочувствительное реле получило такое название потому, что его срабатывание зависит от полярности тока катушки. Магнитный поток создается здесь не только обмоткой катушки, но и постоянным магнитом *N-S*. Благодаря этому при появлении незначительного магнитного поля в катушке якорь реле притягивается к тому полюсу, поле которого оказалось более сильным. Если, например, на

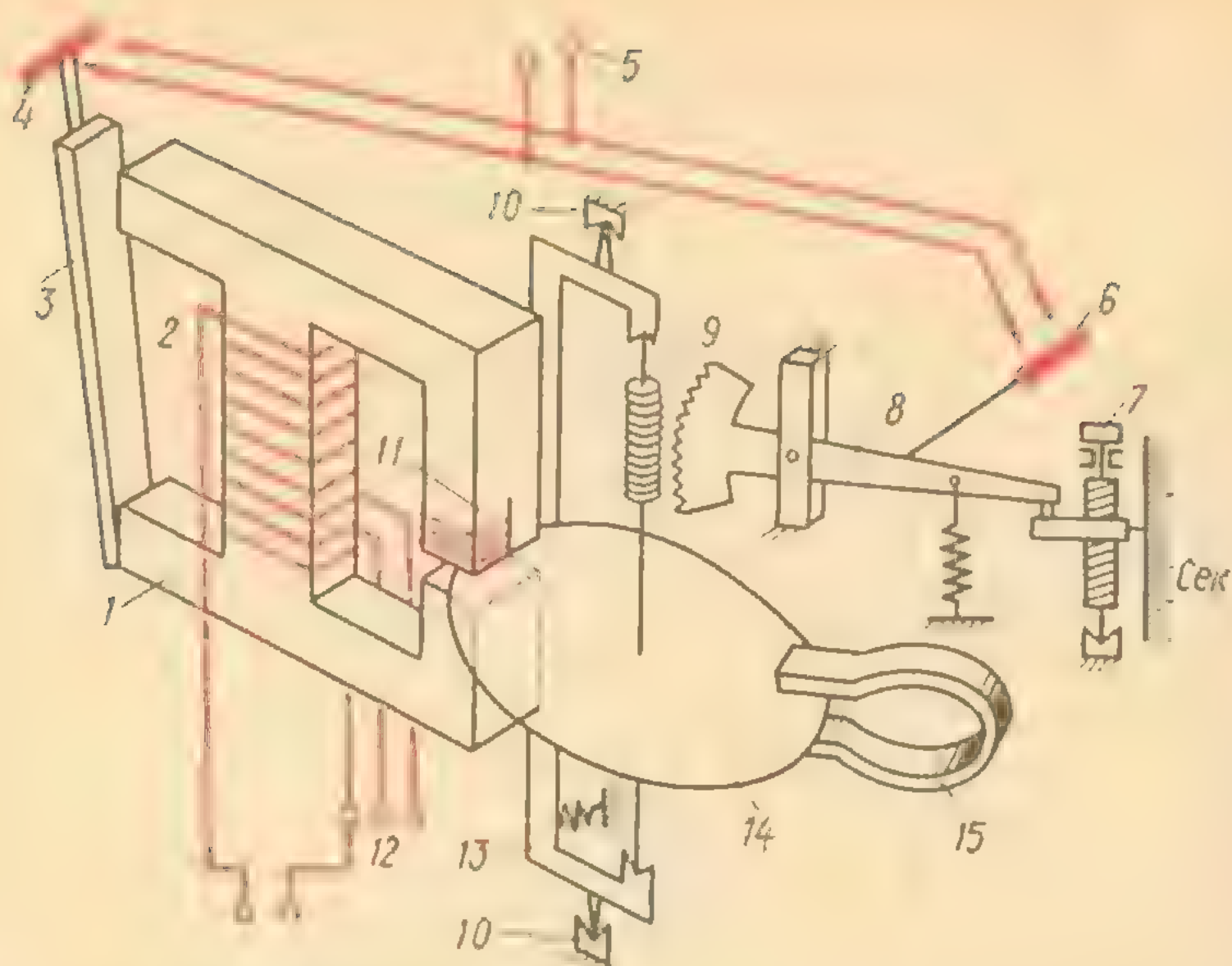


Рис. 13.7. Схема устройства индукционного реле РТ-80:

1 — магнитная система; 2 — катушка; 3 — якорь для мгновенного срабатывания реле при токах короткого замыкания (токах отсечки); 4 и 6 — контакты в цепи исполнения; 5 — исполнительная цепь; 7 — механизм начальной установки сектора (регулировка выдержки времени); 8 — зубчатый поворотный сектор; 9 — червяк на оси диска; 10 — подшипники рамки; 11 — короткозамкнутые витки; 12 — отводы от витков катушки (для регулировки тока срабатывания); 13 — стальная поворотная рамка; 14 — алюминиевый диск; 15 — постоянный магнит.

катушку реле подан сигнал с полярностью, указанной на рисунке 13.6,з, то магнитный поток катушки будет распределен так, как показано пунктиром. Поле полюса *S* будет усилено, а полюса *N* — ослаблено. Якорь реле сработает в сторону полюса *S* и замкнет контакты 2' и 2. При изменении полярности на входе якорь реле замкнет контакты 2" и 2.

Чувствительность поляризованных реле в сотни раз превышает чувствительность нейтральных реле типа РП.

Индукционные реле — это реле максимального тока типа РТ-80 (ИТ-80), реле направления мощности, реле разности частот, реле понижения частоты. Применяются они только в цепях переменного тока. Принцип действия реле РТ-80 показан на рисунке 13.7. В разрезе магнитной системы 1 вращается алюминиевый диск 14. Ось диска укреплена в подшипниках на рамке 13, которая поворачивается на небольшой угол в подшипниках 10. На полюсы электромагнита насажены витки 11, которые способствуют созданию вращающего момента, действующего на диск 14. В качестве тормоза для исключения явления самовращения диска используется постоянный магнит 15. При обтекании катушки 2 током магнитные усилия в полюсах системы приводят диск 14 во вращение. При пересечении краем диска магнитных силовых линий постоянного магнита 15 в диске появляются местные круговые токи, создающие местные магнитные потоки, которые противодействуют вращению. Поэтому при прекращении тока в катушке реле диск притормаживается. Диск начинает вращаться, когда ток катушки составляет 20...40% тока срабатывания реле. Но при таком токе вращение диска не приводит к срабатыванию контактной системы, состоящей из

зубчатого сектора 8 и замыкающей пластины 6, так как червяк 9, сидящий на оси диска, не находится пока в зацеплении с зубчатым сектором 8. При увеличении тока катушки до значения, заданного путем изменения ступеней 12, диск начинает вращаться быстрее, вследствие возрастания усилия рамка 13 притягивается к сердечнику 1. При этом червяк 9 входит в зацепление с зубчатым сегментом, и сегмент начинает поворачиваться, перемещая замыкающую пластину 6. Время, по истечении которого после появления аварийного тока замкнутся контакты 5, устанавливается путем изменения относительного расположения сегментов и червяка 9 передаточного механизма при помощи устройства регулирования выдержки времени 7.

Сила притяжения рамы к сердечнику возникает в результате не только увеличения скорости вращения диска, но и увеличения притяжения магнитным потоком рассеяния самой стальной рамы.

При увеличении тока, протекающего через катушку, до определенного максимального значения (тока отсечки) возрастает магнитный поток, и к магнитной системе мгновенно притягивается якорь 3. Пластина 4 замыкает контакты. Релейная защита срабатывает почти мгновенно, собственное время срабатывания реле при этом составляет 0,05...0,1 с. Силу тока мгновенного срабатывания реле (ток отсечки) можно регулировать путем изменения воздушного зазора между якорем 3 и магнитной системой 1.

Принцип действия индукционных реле мощности подобен принципу действия счетчиков.

На рисунке 13.8 приведена схема включения такого реле. Поскольку одна из катушек включена в цепь напряжения, а другая — в цепь тока, вращающий момент пропорционален мощности. Если диск будет иметь возможность вращаться только в одну сторону, то такое реле будет реагировать и на направление мощности.

Способы включения реле. Электрические реле по способу включения подразделяют на *первичные* и *вторичные*. Катушки первичных реле включают непосредственно в защищаемую цепь рабочего тока (рис. 13.9). По способу воздействия на цепь отключения различают *реле прямого* и *реле косвенного действия*. Примером первичного реле прямого действия может служить токовый расцепитель воздушного автомата типа АП50 и др. Когда ток в первичной цепи превышает установленный уровень, катушка 1 (рис. 13.9, а) подтягивает сердечник, который выбивает защелку 2 из зацепления. Рабочие контакты 3 под действием пружины 4 отключают цепь тока. В реле косвенного действия (рис. 13.9, б) при аварийном токе втягивается сердечник катушки 1, замыкаются контакты 5, оказывается под током вспомогательная катушка 6, сердечник которой выбивает защелку 2 автомата.

Токи и напряжения срабатывания реле принимаются по стандартной

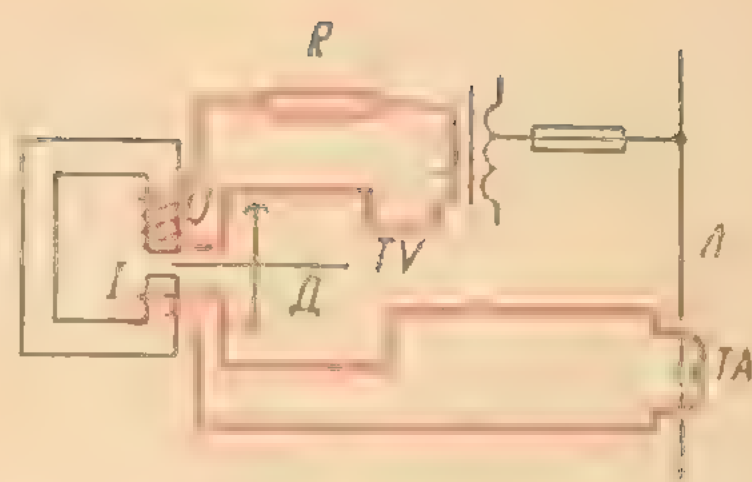


Рис. 13.8. Схема включения реле мощности:

Л — линия, ТА — трансформатор тока; TV — трансформатор напряжения; Д — диск.

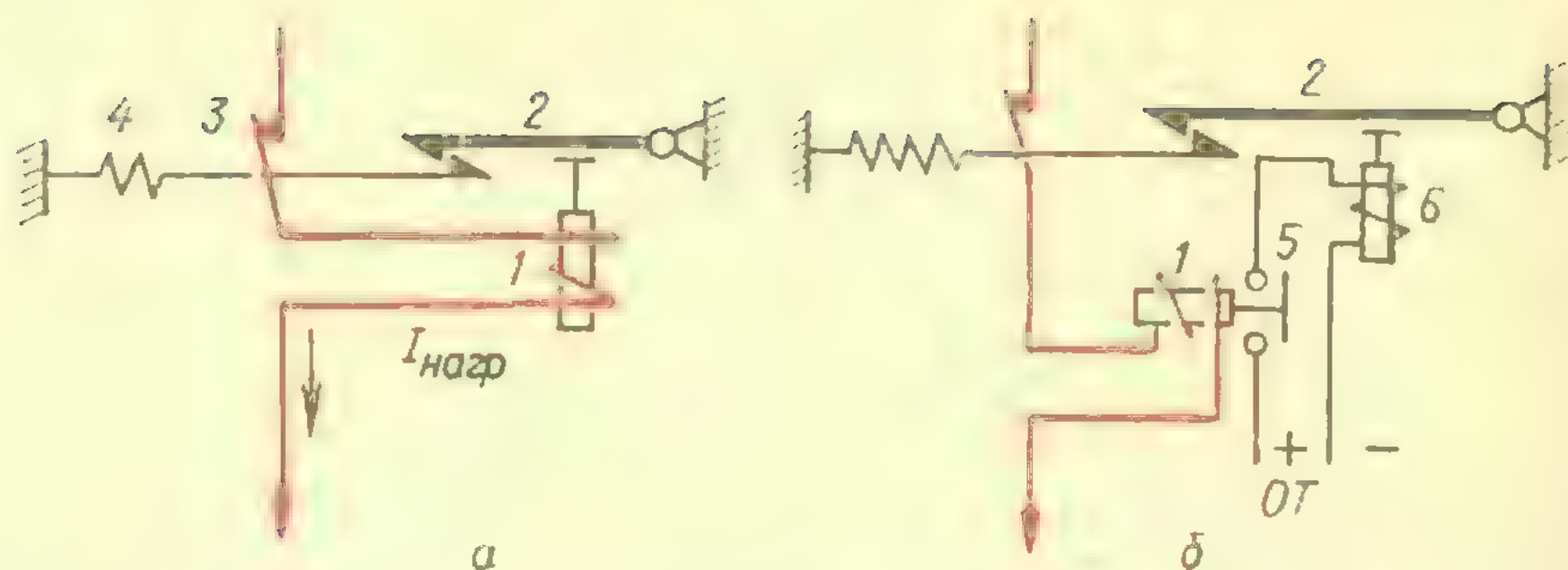


Рис. 13.9. Схемы включения первичных реле:

a — прямого действия; *б* — косвенного действия; 1 — токовая катушка; 2 — защелка; 3 — рабочие контакты; 4 — пружина; 5 — контакты в цепи оперативного тока; 6 — вспомогательная катушка; ОТ — оперативный ток.

шкале (для реле тока и напряжения). Для промежуточных реле и реле времени номинальные напряжения равны 12, 24, 48, 110, 220, 380 В. Срабатывать реле должно и при меньших напряжениях. Для промежуточных реле и реле времени это напряжение срабатывания составляет не менее 60% номинального. Мощность, потребляемая катушками электромагнитных реле, составляет до 30 В · А.

Важным параметром для реле является также ток размыкания контактов. У многих электромагнитных реле он равен 5 А.

Промежуточные реле РПЛ-40, РПЛ-22, РПЛ-31 с общим числом замыкающих и размыкающих контактов соответственно 4 и 0; 2 и 2; 3 и 1 предназначены для использования в сетях напряжением до 660 В и для установки в закрытых шкафах, нишах станков и других местах, защищенных от попадания воды, пыли и посторонних предметов. Степень их защиты IP00. Номинальный ток контактов 10 А, а напряжение катушек 24, 36, 42, 110, 127, 220, 230, 240, 380, 415, 500, 660 В.

К этим реле, а также к пускателям серии ПМЛ разработаны пневматические приставки выдержки времени серии ПВЛ. Эти приставки обладают следующими достоинствами: их выдержка времени не зависит от изменения напряжения в сети, они нечувствительны к пыльной среде, мало чувствительны к колебаниям температуры и т. д. Для реле РПЛ и пускателей ПМЛ предназначены также контактные приставки серии РПЛ (для увеличения числа контактов в цепях управления).

Из других типов реле для схем сельскохозяйственных установок представляют интерес промежуточные реле на герконах типа РПГ, реле тока для схем защиты от замыканий на землю РТЗ, реле тока обратной последовательности РТФ (фильтровые) для защиты генераторов и трансформаторов при несимметричных коротких замыканиях и при перегрузке токами обратной последовательности.

13.6. ПРЕДОХРАНИТЕЛИ ДЛЯ ЗАЩИТЫ УСТАНОВОК НАПЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

Устройство предохранителей. Плавкий предохранитель — простейшее и самое распространенное устройство для защиты электроустановок от больших перегрузок и коротких замыканий. При защите электриче-

ских сетей и установок во всех случаях, когда предохранители могут обеспечить необходимые чувствительность и избирательность защиты, рекомендуется использовать их вместо автоматических выключателей и реле. Последние целесообразно использовать в случаях, когда необходимо автоматизировать управление и обеспечить более скорое восстановление напряжения, чем это позволяют предохранители, а также при частых аварийных отключениях.

Принцип действия предохранителя прост. Его плавкая вставка при протекании тока нагревается. При перегрузке или коротком замыкании плавкая вставка перегорает. Цепь тока при этом разрывается. Чтобы в случае перегорания плавкой вставки не появлялась опасная электрическая дуга, которая может повредить оборудование или представить опасность для обслуживающего персонала, плавкие вставки помещают, например, в фарфоровые трубки. Когда плавкая вставка перегорает, давление в трубке значительно повышается от нагрева воздуха и появления паров металла, образуется дутье вдоль трубки, и пары газа и металла выдуваются, деионизируясь при этом. Предохранители такого устройства могут разрывать мощность до $500 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ при напряжении до 660 В . Однако для большей мощности они непригодны: дутье недостаточно сильно, в результате чего дуга, поддерживаемая очень большим током, не может быть прервана.

Трубки предохранителей на большие мощности отключения заполняют кварцевым песком. Некоторые предохранители выпускаются с фибровыми трубками, в которые помещена плавкая вставка. При перегорании плавкой вставки фибровая трубка выделяет газы, давление в трубке значительно увеличивается и дуга деионизируется и гасится.

Плавкие вставки предохранителей изготавливают из свинца, его сплавов, цинка, алюминия, меди, серебра. Вставки из свинца и его сплавов имеют низкую температуру плавления и обладают тепловой инерцией вследствие большой удельной теплоемкости этих материалов. Поэтому кратковременные перегрузки такие плавкие вставки не отключают. Но, с другой стороны, из-за сравнительно высокого удельного сопротивления этих материалов площадь поперечного сечения плавких вставок на большие токи получается большей, и при перегорании разбрызгивается значительное количество металла.

Плавкие вставки из меди и серебра имеют намного меньшую площадь поперечного сечения, так как обладают хорошей электропроводностью. Температура их плавления также значительно выше.

Применяются также плавкие вставки, работающие по принципу металлургического эффекта. Этот принцип заключается в следующем. Если на медную или серебряную проволоку нанести оловянный шарик, то при нагреве атомы олова проникают в материал проволоки, образуя сплав. Так как температура плавления сплава всегда ниже температуры плавления входящих в сплав металлов, то в месте нахождения шарика плавкая вставка перегорает при температуре, меньшей, чем температура плавления олова.

К основным параметрам предохранителей относят номинальный ток, номинальное напряжение и предельно отключаемый ток. Важным

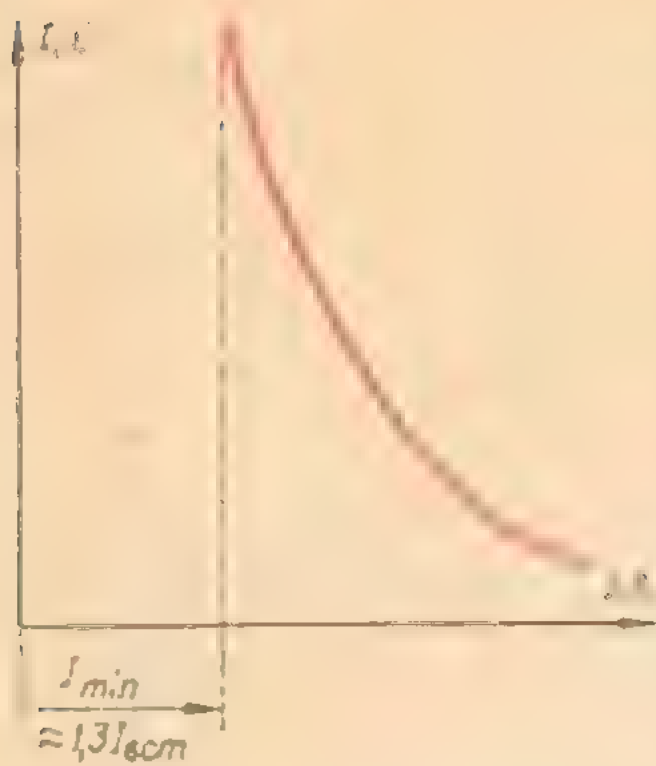


Рис. 13.10. Ампер-секундная характеристика предохранителя.

параметром предохранителя является ампер-секундная (время-токовая) характеристика вставки, представляющая собой зависимость времени перегорания вставки от протекающего по ней тока I (рис. 13.10). Как видно из рисунка, время перегорания плавкой вставки быстро уменьшается с увеличением тока.

Предохранители выбирают по номинальному току плавкой вставки $I_{вст}$, на который она рассчитана, по номинальному току предохранителя $I_{пр}$, на который рассчитан сам предохранитель, то есть его токоведущие части, по предельно отключаемому предохранителем току и проверяют на селективность действия.

В предохранитель с определенным номинальным током могут быть встроены плавкие вставки на различные токи. Низковольтные предохранители должны выдерживать ток, равный 130% номинального тока плавкой вставки, неопределенно длительное время, а ток, составляющий 160% номинального, — до 1 ч. При токах 200...250% номинального время перегорания снижается до нескольких секунд.

Далее приводятся сведения о предохранителях, получивших широкое применение в электроустановках напряжением до 1000 В.

В зависимости от конструкции плавких вставок предохранители выполняют разборными, допускающими замену плавкой вставки на месте эксплуатации, и неразборными, у которых заменяется вся плавкая вставка с держателем. По форме корпуса их выполняют цилиндрическими (трубчатыми), призматическими; по наличию наполнителя, окружающего плавкую вставку, — с наполнителем и без наполнителя; по виду контактов плавкой вставки — с ножевыми или врубными контактами, вставляемыми в гребки контактов основания, с болтовым контактом для присоединения к проводникам комплектного устройства и др. (рис. 13.11).

Конструктивные особенности предохранителей. Предохранители серии ПН-2 с песчаным наполнителем и фарфоровым корпусом имеют высокую отключающую способность. Их изготавливают на номинальные токи от 40 до 600 А на напряжения до 660 В. Сменной частью предохранителя является патрон, состоящий из плавкого элемента, корпуса, наполнителя и контактов.

Предохранители серии ПР-2 имеют фибровый корпус и цинковый плавкий элемент переменной площади сечения на номинальные токи от 6 до 1000 А. Их устанавливают в сетях напряжением до 660 В. Плавкую вставку можно заменять на месте эксплуатации без применения специального инструмента. В связи с отсутствием наполнителя предохранители ПР-2 имеют большие размеры, чем ПН-2, чтобы обеспечить надежное гашение дуги при срабатывании.

Резьбовые предохранители ПДС имеют керамическое основание, в которое вставляется плавкая вставка, удерживаемая винчиваемой в основание головкой предохранителя. Эти предохранители имеют

рис. 13.11. Предохранитель серии ПРС (а), грубчатый предохранитель типа ПР-2 (б), предохранитель типа ППТ-10 (в):

1 — основание предохранителя; 2 — ввертываемый цилиндрический корпус с плавкой вставкой; 3 — контактные ножи; 4 — плавкая вставка; 5 — фибровый патрон; 6 — крышка предохранителя; 7 — отверстие для патрона 8 с плавкой вставкой.

визуальный указатель срабатывания. Их выпускают на токи от 1 до 600 А и применяют для защиты оборудования при небольших токах короткого замыкания. Достоинство предохранителей ПДС — возможность замены плавкой вставки под напряжением. Устанавливают их непосредственно на шины, привинчивая или приклепывая.

Резьбовые предохранители серии ПРС в пластмассовых корпусах используют в небольших комплектах устройств. Их можно устанавливать на изоляционных и металлических панелях. Для установки в три фазы применяют блоки из трех предохранителей.

Предохранители серий ПП-23 и ПП-24 имеют плавкие вставки на токи от 2 до 100 А, рассчитаны для применения в сетях напряжением до 660 В переменного и 400 В постоянного тока. Они унифицированы с зарубежными предохранителями фирмы «Сименс».

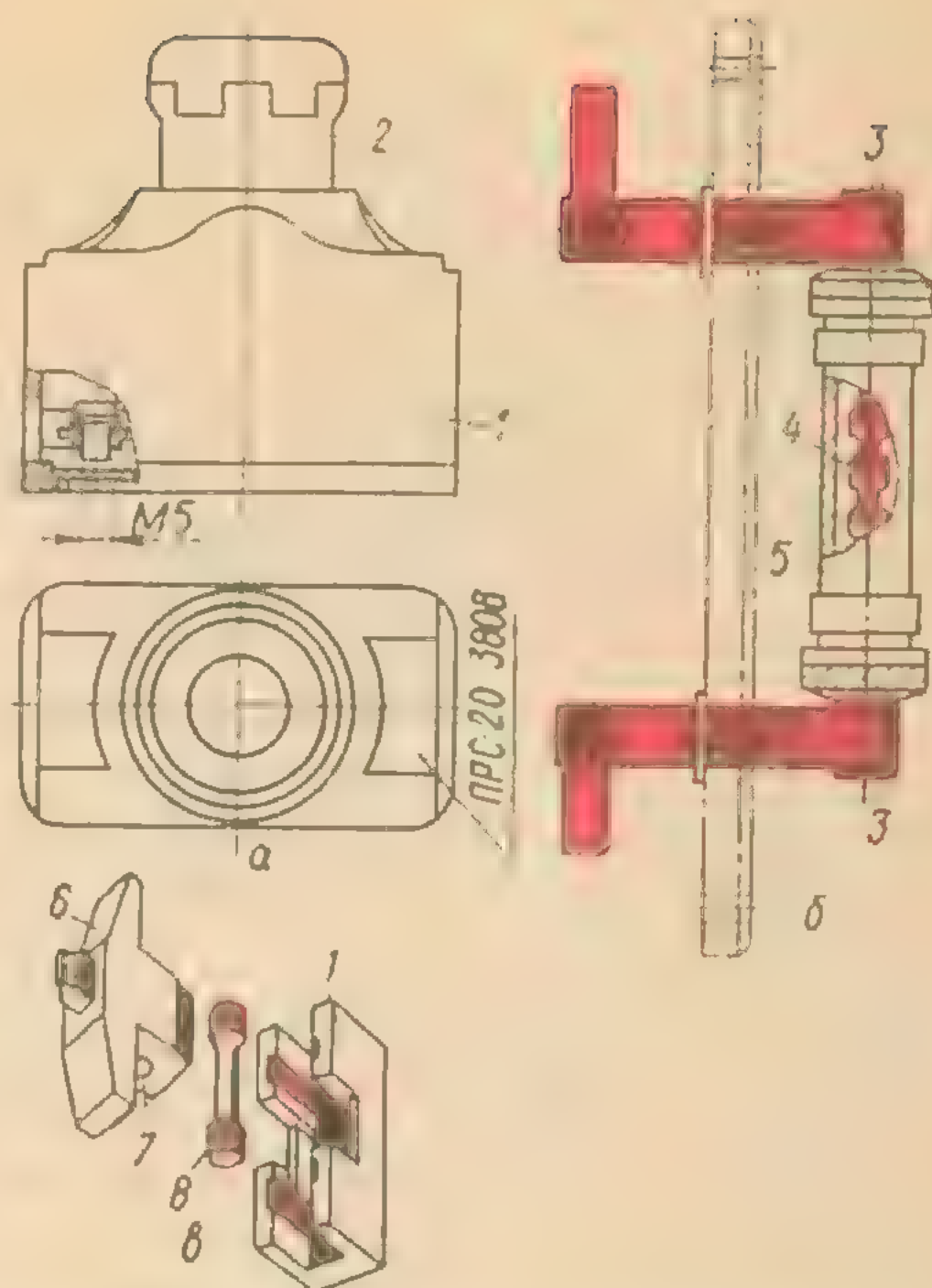
Для защиты полупроводниковых приборов предназначены быстродействующие предохранители серии ПП-57 и др.

Для бытовых электропроводок выпускаются пробочные резьбовые предохранители серии Ц27ПК-2.

Для низковольтных сетей предназначены предохранители серий ИП, ТП и др.

Во всех случаях следует отдавать предпочтение плавким предохранителям с наполнителем. Предохранители с закрытой плавкой вставкой без наполнителя (например, ПР-2) допускается применять в небольших, преимущественно передвижных установках и при расширении действующих установок с такими предохранителями.

Для защиты сетей низшего напряжения переменного тока от появления в них потенциала при пробое изоляции со стороны высокого напряжения предназначены предохранители-разрядники низшего напряжения типа ПП-А/3 (рис. 13.12). Такие предохранители устанавливают непосредственно на крышке бака силовых трансформаторов, рядом с выводами обмоток низшего напряжения. Один из контактов предохранителя присоединяют к выводам обмоток низшего напряжения, а второй — к баку трансформатора. Предохранитель срабатывает (искровой промежуток пробивается) в диапазоне напряжений 351...600 В (исполнение I) или 701...1000 В (исполнение II)



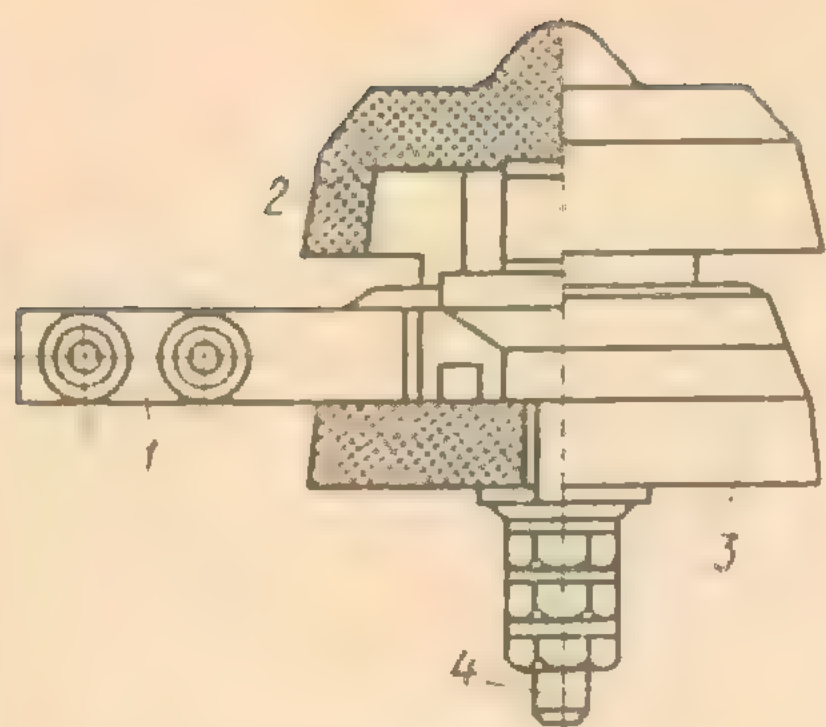


Рис. 13.12. Пробивной предохранитель ПН-А/3:

1 — скоба — контакт для соединения с обмоткой низшего напряжения; 2 — головка; 3 — основание; 4 — шпилька — контакт для соединения с крышкой бака трансформатора

и допускает прохождение тока силой 200 А в течение 10 мин. Разряд происходит в четырех отверстиях слюдяной прокладки, по воздушному промежутку между контактом, соединенным с обмоткой низшего напряжения, и контактом, соединенным с корпусом трансформатора.

Предохранители следует применять только с калиброванной плавкой вставкой. Заменять их нужно при снятом напряжении. Если снять напряжение невозможно, то грубчатые и резьбовые предохранители можно заменять под напряжением, но при отключенной нагрузке с обязательным использованием защитных средств (очков, диэлектрических перчаток или специальных клещей).

Замену предохранителей на высоте с приставной лестницы должен выполнять электромонтер с квалификационной группой не ниже III (см. гл. 25) в присутствии второго лица с группой не ниже II, которое может прийти на помощь в случае необходимости.

13.7. КОМПЛЕКТНЫЕ УСТРОЙСТВА УПРАВЛЕНИЯ

Станции управления. Для управления асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором мощностью до 75 кВт предназначены *станции управления*, объединяющие на общей конструкции комплектные устройства для дистанционного управления какой-либо электрической установкой. Станции разделяют на *блоки управления* (БУ) и *панели управления* (ПУ). Блок управления — это станция, смонтированная на одной изоляционной плите без рамы. Панель управления состоит из нескольких изоляционных плит с аппаратами, смонтированными на общей раме.

Тиристорные станции управления типа ТСУ, КТСУ, ТСУР предназначены для плавного пуска, реверса, торможения и защиты трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Их основным элементом являются мощные тиристоры, подключаемые между двигателем и сетью по схеме управляемого мостового выпрямителя. Напряжение на двигатель подается плавно, при помощи переменного резистора, установленного в цепи управления, выполненной на логических элементах.

В обозначении пультов управления (САА), шкафов (ШОА и др.), блоков (БУ и др.), ящиков (ЯАА и др.) первые две цифры означают соответственно класс (5 — управление асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором, 8 — ввод и распределение энергии, и т. д.) и группу устройства (4 — прямой пуск и реверс, 6 — распределение энергии с применением предохранителей, 7 — управление многоскоростным двигателем, 9 — управление несколькими двигате-

лями и т. д.). Далее следуют две цифры, означающие, как правило, порядковый номер разработки устройства. Две следующие цифры — указывают исполнение по току, затем — по напряжению.

Последние две цифры, или буквы, и цифра указывают климатическое исполнение и категорию размещения.

На рисунке 13.13 приведена электрическая схема блока управления БУ-5120.

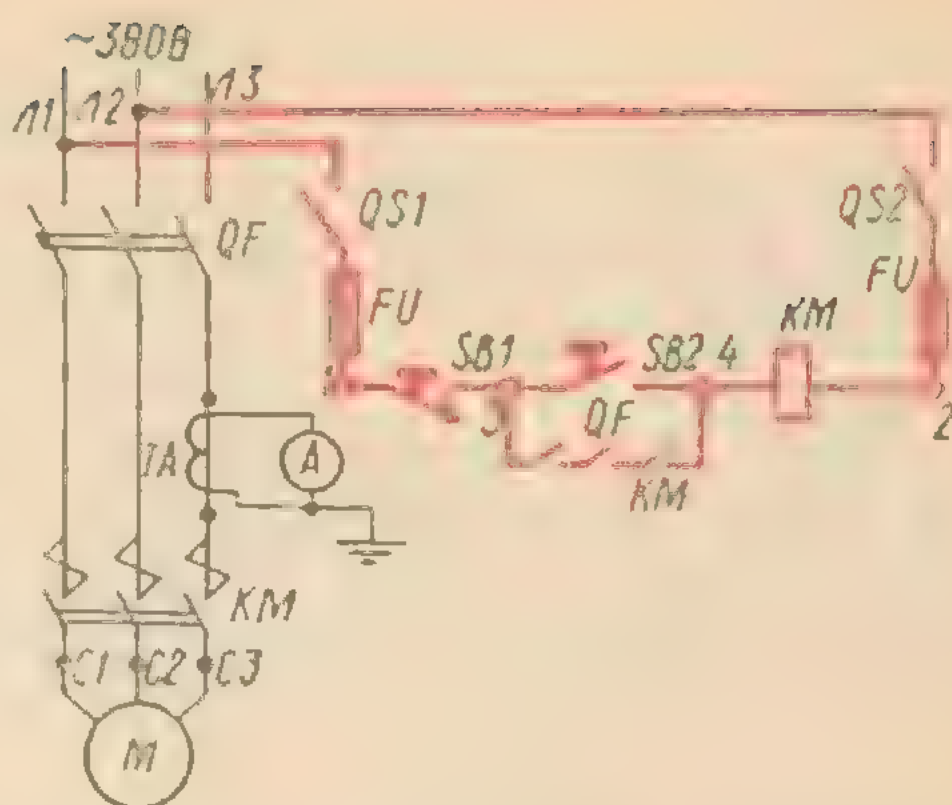


Рис. 13.13. Схема блока управления БУ-5120.

Ящики управления. Для включения и отключения магистральных и реже групповых осветительных сетей, а также для защиты электрооборудования и сети от токов перегрузки и короткого замыкания при-

меняют *однофидерные ящики*. Ящики типов ЯРВ и ЯРВМ в пыле-брызгозащитном исполнении устанавливают как внутри, так и снаружи зданий, с рубильниками и предохранителями или без них. Ящики типов ЯВЗ и ЯВЗБ (с барабанным зажимом), ЯВЗШ (со штепсельным разъемом) защищенного исполнения устанавливают внутри зданий с рубильниками и предохранителями. Ящик типа ЯПВ в защищенном исполнении с уплотнением устанавливают с пакетными выключателями и предохранителями внутри и снаружи зданий.

Для линий и отдельных токоприемников, не требующих частых включений, предназначаются ящики типа ЯБПВ с блоком предохранитель — выключатель (БПВ), выполняемые на номинальные токи 100, 200 и 350 А.

Неавтоматическое включение и выключение передвижных токоприемников (сварочных трансформаторов, электрических дрелей и т. п.) выполняют при помощи ящиков серии ЯВШ, которые выпускаются двух- и трехполюсными на токи 25, 60, 100 А; выключатель, встроенный в ящик, пакетный, типа ПВ-2 или ПВ-3, со штепсельным разъемом.

Для сельскохозяйственных целей выпускаются также ящики типа ЯАА, ЯСА, шкафы ШАИ, ШАП, ШОА и т. д.

Устройства для группового управления. Для управления группой токоприемников предназначены *силовые щиты, распределительные пункты, распределительные щиты* и т. д.

При индивидуальной установке используют типовые *распределительные шкафы* СП-62, а в пыльных помещениях — СПУ-62. Шкафы комплектуют предохранителями ПН-2 и рубильником с боковым приводом.

Шкафы специального назначения Э4Б-10 и Э6Б-20А предназначены для управления электрооборудованием птичников по выращиванию соответственно 10 и 20 тыс. цыплят на мясо, а шкафы ШУН — для управления артезианскими насосами и водонапорными башнями.

Электропромышленность изготавливает также шкафы специаль-

ного назначения для сельскохозяйственных объектов: ШАУ — АВ — шкафы автоматического управления системами активной вентиляции и отопления в хранилищах картофеля и овощей, без искусственного охлаждения; ДКТЭ-4МР — комплект из пульта, термоподвесок (термометров сопротивления) и релейных шкафов для дистанционного контроля температуры зерна в силосах элеваторов.

Для управления электроприводами зерноочистительных агрегатов выпускаются пульты управления серии САА5900 и т. д. Комплектное электрооборудование КИИС-108 и КИИС-54, состоящее из шкафов и ящиков управления, предназначено для оснащения свиноводческих комплексов на 108 и 54 тыс. голов.

В связи с введением новой системы потребительского напряжения 660/380 В и заменой автоматов серии АЗ100 автоматами серий АЕ2000, АЕ3700 разработаны новые серии распределительных пунктов ПР22 и ПР11. Они заменяют щитки СУ9400 и пункты ПР9000 с выключателями серии АЗ100. Пункты ПР11 на номинальное напряжение до 660 В и токи 63, 100, 160, 250, 400 и 630 А имеют от 2 до 12 встраиваемых выключателей. Степень защиты IP21 и IP54. Способы установки — навесной, напольный и в нише.

Если необходимо иметь ток уставки автомата более 100 А, нужно использовать пункты ПР22.

Контрольные вопросы и задания к главе 13. 1. Какой предельно допускаемый ток разрешается отключать рубильниками без дутогасительных камер и с дутогасительными камерами при напряжении 380 В? 2. Как устроен пакетный выключатель? 3. Как устроен автоматический выключатель АП50? 4. Как действуют тепловые и электромагнитные расцепители? 5. Нарисуйте и объясните схему включения магнитного пускателя. 6. Какие сведения содержатся в обозначении магнитного пускателя? 7. Как устроены реле клапанного, соленоидного и поляризационного типа? 8. Как работает индукционное реле? 9. Расскажите об отключающей способности предохранителя. 10. Какие вы знаете комплектные устройства управления?

Глава 14. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АППАРАТУРЕ УПРАВЛЕНИЯ НА НАПРЯЖЕНИЕ ВЫШЕ 1000 В. РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ

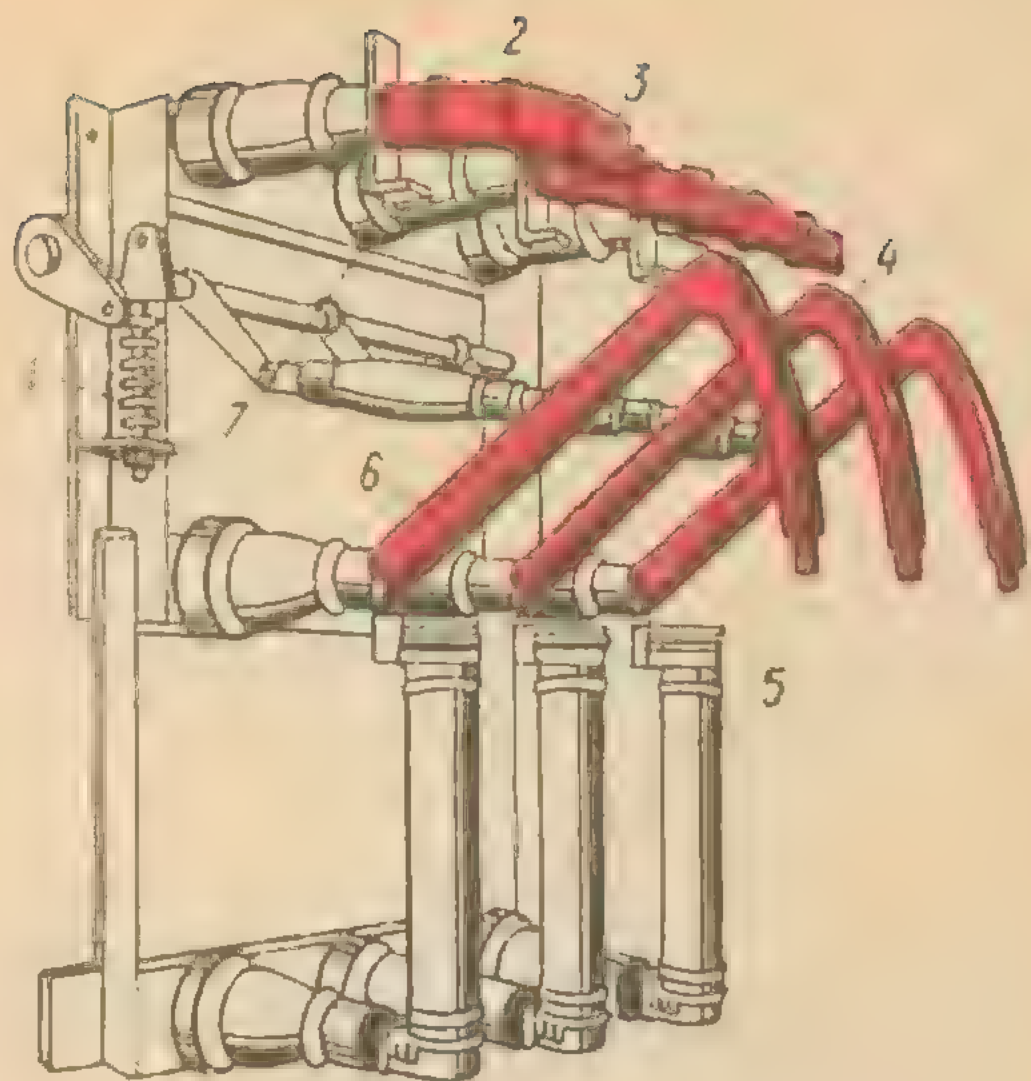
14.1. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ РАЗЪЕДИНИТЕЛИ И ВЫКЛЮЧАТЕЛИ НАГРУЗКИ

К коммутационной аппаратуре высокого напряжения, используемой на электрических станциях и подстанциях, прежде всего относят разъединители, выключатели нагрузки, автоматические выключатели.

Разъединители предназначены для включения и отключения электрических цепей высокого напряжения без нагрузки и создания в них видимого разрыва. Вместе с разъединителями используют высоковольтные предохранители, которые защищают установку от коротких замыканий.

рис. 14.1. Выключатель нагрузки ВНП:

1 — отключающая пружина; 2 — дугогасительная камера; 3 — вкладыш из органического стекла; 4 — нож дугогасительной системы; 5 — плавкие предохранители; 6 и 7 — рабочие контакты (силовая цепь).



Разъединители изготавливают для внутренней или для наружной установки, однополюсными и трехполюсными, с горизонтальным или вертикальным расположением ножей, с ножами заземления или без них.

Разъединители выбирают по номинальному напряжению и току, роду установки (наружная, внутренняя) и проверяют на термическую и динамическую стойкость токам коротких замыканий.

В сетях напряжением 10, 20 и 35 кВ применяют однополюсные и трехполюсные разъединители типа РВК (внутренней установки) с приводом ПР-2 и ПР-3; разъединители типов РОН, РЛНД, РОНЗ. В обозначении аппарата: Р — разъединитель, В — внутренней установки, Н — наружной установки, О — однополюсный (одноколонковый), Л — линейный, Д — двухколонковый, З — с заземляющими ножами; числами выражены номинальное напряжение (кВ) и номинальный ток (А) и т. д.

Разъединители можно применять для отключения и включения тока замыкания на землю до 5 А на линиях 20 и 35 кВ и до 30 А на линиях 10 кВ и ниже, уравнительного тока до 70 А в сетях до 10 кВ, нагрузочного тока до 15 А в сетях до 10 кВ при условии, что отключение выполняется трехполюсным разъединителем с механическим приводом.

Правила устройства электроустановок допускают применять разъединители для отключения тока холостого хода в тех случаях, когда мощности установок не превышают при напряжениях 10, 22, 35 и 110 кВ следующих значений соответственно: 750, 10000, 20000 и 40000 кВ · А.

При внутренней установке разъединителей применяют ручные приводы типов ПЧ-50 (червячный) и ПР-3 (рычажный), а при наружной — типов ПРН и ПЧН, снабженные сигнальными блок-контактами КСА.

Выключатели нагрузки служат для включения и отключения высоковольтных (6 и 10 кВ) электрических цепей небольшой мощности при нагрузке в несколько сотен ампер. Последовательно с ними устанавливают плавкие предохранители.

Выключатель нагрузки отличается от разъединителя главным образом наличием пристроенных к отключающим ножам дугогасительных камер.

В пластмассовый корпус дугогасительной камеры 2 (рис. 14.1) вставлены вкладыши из органического стекла. Нож 4 входит в щель,

образованную вкладышами, и у основания дугогасительной камеры резко внедряется в неподвижные контакты. При отключении между контактами и ножом возникает дуга, под действием которой с поверхности вкладышей выделяется большое количество газов. Давление в камере значительно возрастает, теплопроводность газа увеличивается, дуга охлаждается и гаснет.

Высокая скорость движения контактов — около 4 м/с — создается специальными пружинами. Без смены вкладышей выключатели выдерживают от 150 до 200 выключений.

Выключатель нагрузки ВН-11Т (Т — тропического исполнения) — трехполюсный, автогазовый, с заземляющим устройством, внутренней установки — предназначен для коммутации (включения и отключения) электрических цепей напряжением до 10 кВ под нагрузкой. Наибольший отключаемый ток 400 А, номинальный ток 200 А. Без смены дугогасящих вкладышей выключатель допускает 75 отключений тока 200 А и всего 3 отключения тока 400 А. Эти выключатели устанавливаются в малогабаритных комплектных распределительных устройствах.

Выключатели нагрузки ВНП-16 и ВНП-17 выполнены на общей раме с предохранителями, причем последний имеет устройство, автоматически отключающее его при перегорании плавкой вставки любого предохранителя. Эти выключатели комплектуются приводом ПРА-17.

Высоковольтные выключатели масляные баковые, маломасляные горшковые, безмасляные воздушные и другие предназначены для включения и отключения электрических цепей высокого напряжения под нагрузкой (в рабочем режиме) и для их отключения при коротких замыканиях.

Последовательно с высоковольтными автоматическими выключателями устанавливают разъединители, которые служат для отъединения отключенных выключателей от сети (например, при осмотре, ремонте).

Высоковольтные выключатели — наиболее ответственные аппараты в электрических установках. Основная их характеристика — это отключающая способность, то есть наибольший ток короткого замыкания, который они могут надежно отключать.

В баковом масляном выключателе (рис. 14.2) контакты всех трех фаз размещены в одном баке, заполненном маслом, которое изолирует фазы одну от другой и служит для гашения дуги при размыкании цепи: образующиеся в масле газы способствуют ее охлаждению и деионизации. Недостаток этих аппаратов — большой объем масла и сравнительно малая отключающая способность.

В маломасляных выключателях контакты каждой фазы помещены в отдельные цилиндрические бачки (горшки) с трансформаторным маслом, которое также выполняет роль изоляции фаз. При размыкании контактов процесс гашения дуги усиливается благодаря интенсивному поперечному движению масла под действием образующихся газов по специальным направляющим каналам.

В горшковых малообъемных масляных выключателях масло исполь-

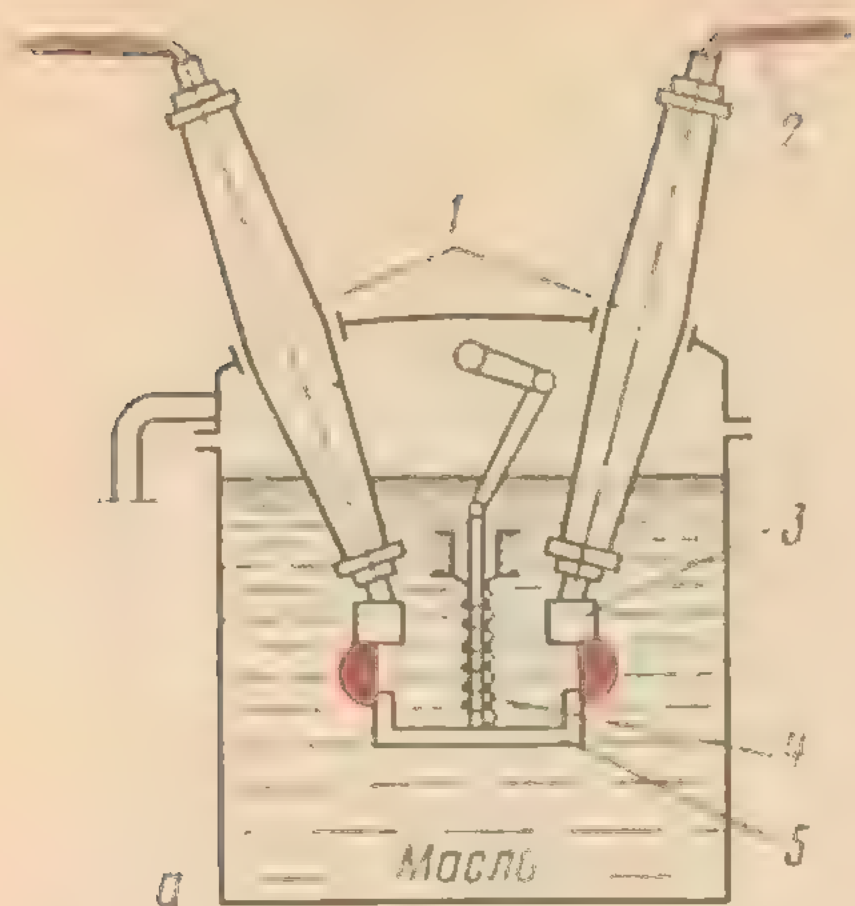


Рис. 14.2. Схема однобакового масляного выключателя (а) и его внешний вид с приводом (б):

1 — фарфоровые изоляторы; 2 — силовая цепь; 3 — неподвижные контакты; 4 — отключающая пружина; 5 — подвижные контакты; 6 — реле максимального тока; 7 — привод; 8 — бак выключателя.

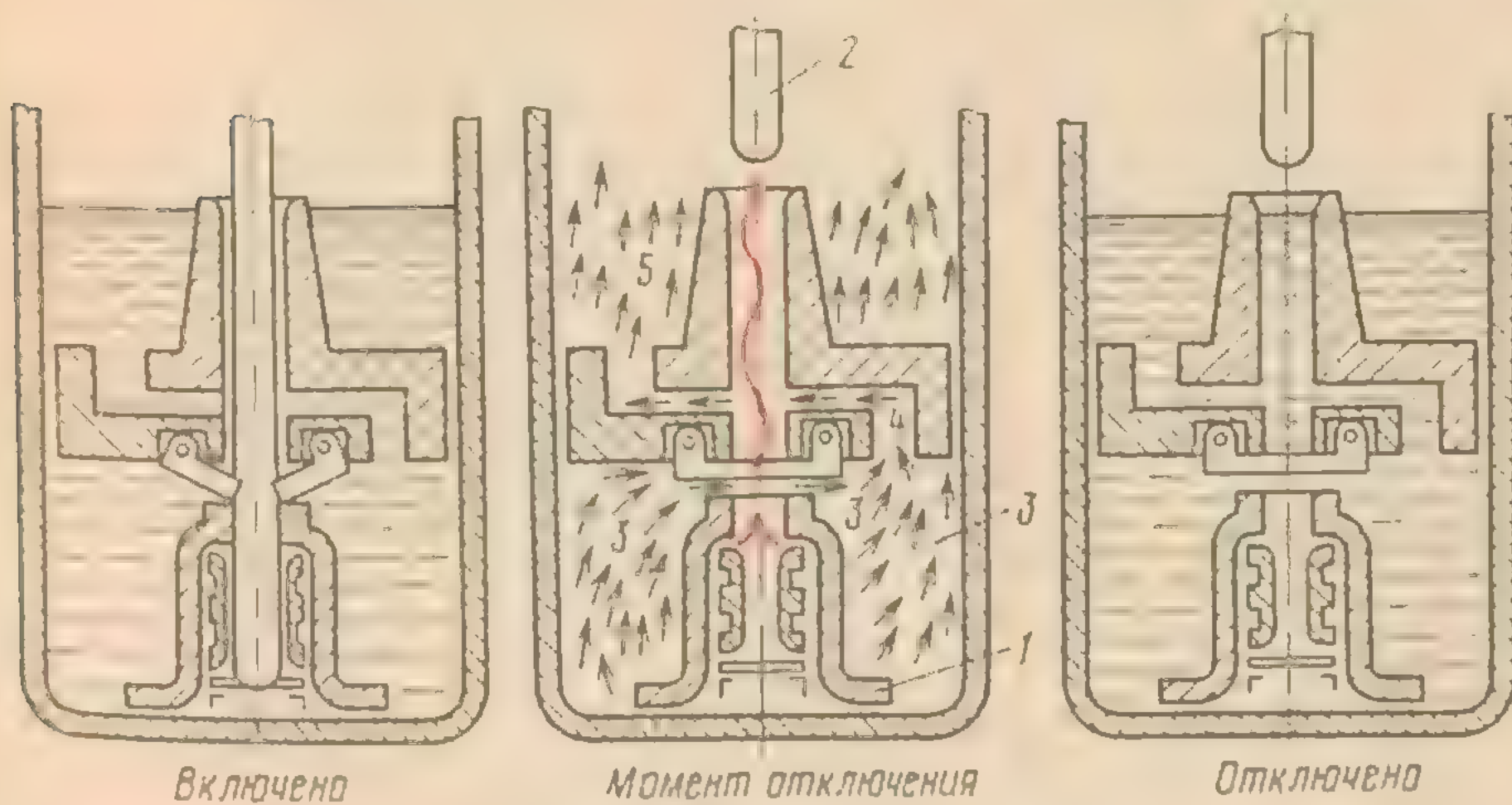
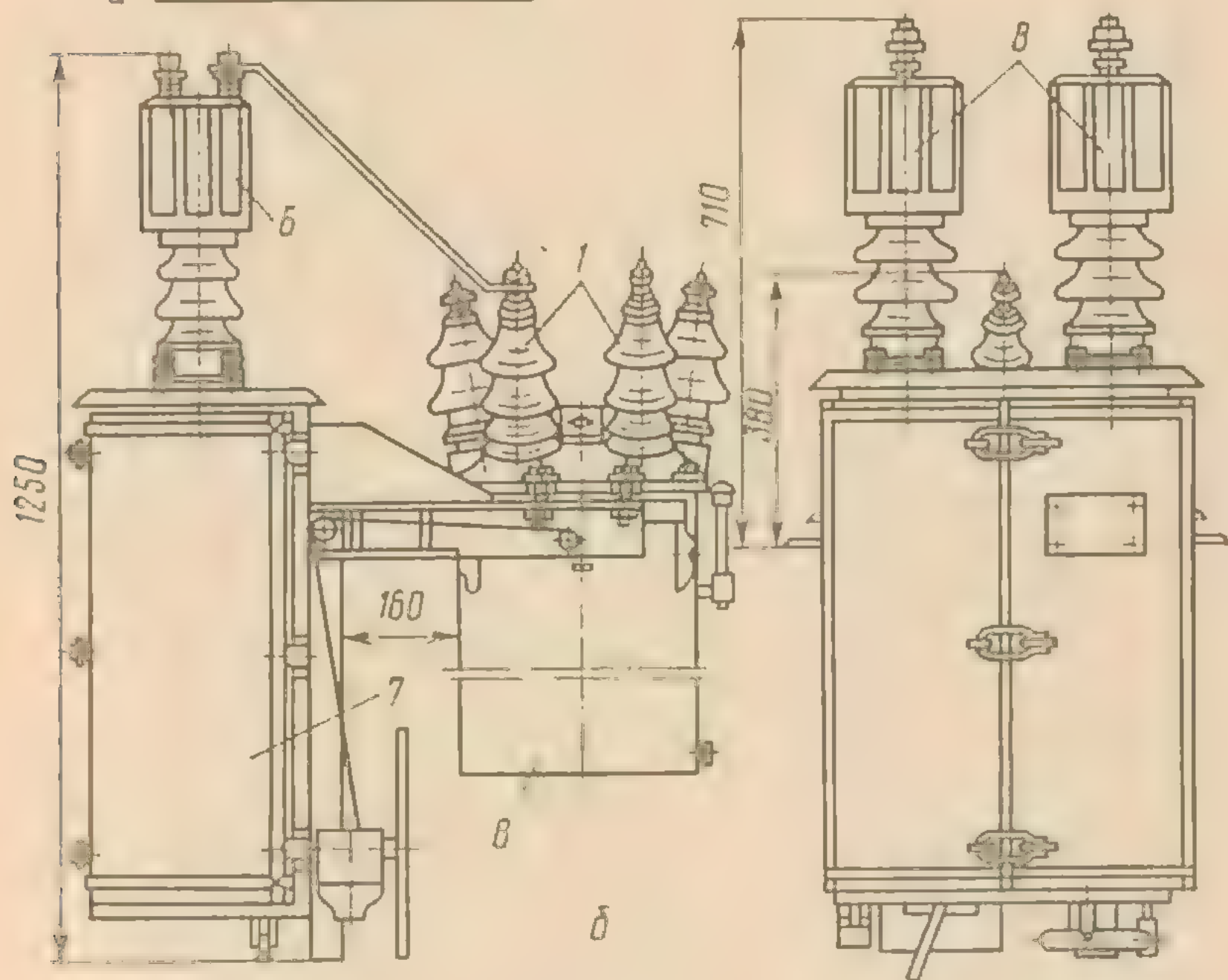


Рис. 14.3. Схема гашения дуги у выключателя типа МГТ:
1 и 2 — силовые контакты; 3 и 5 — полости; 4 — канал.

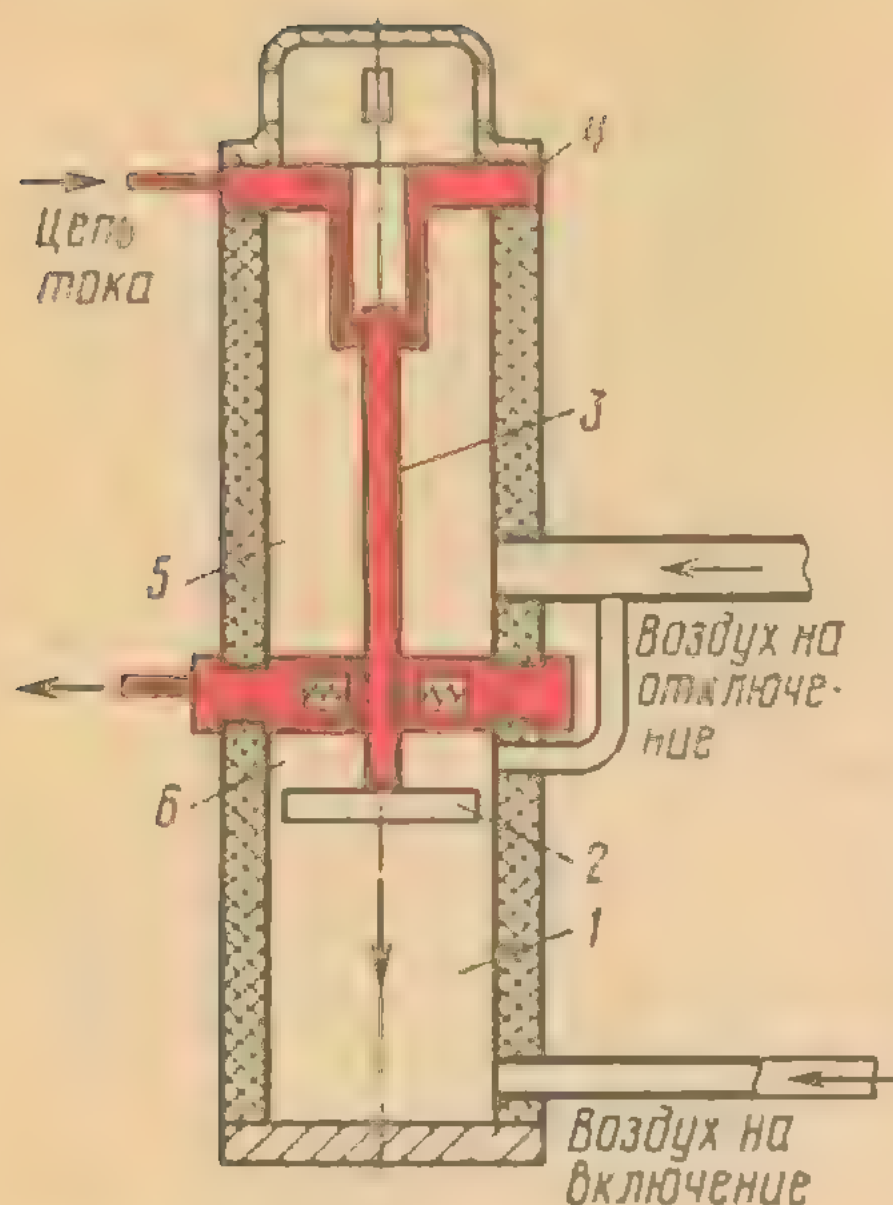


Рис. 14.4. Принцип действия выключателя с воздушным дутьем:

1 — полость, куда подается сжатый воздух при включении; 2 — поршень; 3 — подвижный контакт; 4 — неподвижный контакт; 5 — камера, в которой воздух под давлением выдувает дугу в момент размыкания контактов; 6 — полость, откуда поступает сжатый воздух для отключения.

зается лишь как средство для гашения дуги и не играет роли изоляционной среды между фазами. Фазы изолированы одна от другой и от земли твердыми изоляторами. В местах разрыва каждой фазы устанавливают масляные баки-горшки. Если в фазе два разрыва, монтируют два масляных бака на фазу.

В горшках создана система камер, благодаря которым дуга, возникающая при размыкании, выдувается и быстро

гаснет (рис. 14.3). При расхождении силовых контактов 1 и 2 дуга возникает в полости 3. Под давлением образующихся при этом газов масло из полости 3 под большим давлением выходит в полость 5 и через канал 4 выдувает образующуюся электрическую дугу. Происходит интенсивная деионизация искрового промежутка. Отключаемая мощность у горшковых выключателей значительно больше, чем у баковых многообъемных.

В воздушных выключателях гашение дуги происходит под интенсивным действием сжатого воздуха.

Принцип работы выключателя, схема которого приведена на рисунке 14.4, заключается в следующем. При включении сжатый воздух подается в камеру 1, давит на поршень 2 и поднимает подвижный контакт 3, соединяя его с неподвижным контактом 4. При отключении сжатый воздух подается в камеру 1 сверху и в камеру 5. Поршень 2 идет вниз, подвижный 3 и неподвижный 4 контакты расходятся, образующаяся при этом дуга выдувается сжатым воздухом из камеры 5. Такие выключатели устанавливают в каждой фазе.

В современных элегазовых выключателях на напряжение 110, 220 кВ и выше используют специально созданный химиками элегаз — идеальную диэлектрическую среду на основе соединения серы с фтором. Элегаз в 5 раз тяжелее воздуха, бесцветен, не имеет запаха, нетоксичен. При атмосферном давлении его изоляционная способность в 3 раза выше, чем у воздуха, а при повышении

Рис. 14.5. Схема управления приводом:

ТА — трансформаторы тока; TV — трансформатор напряжения; КА — реле максимального тока; КУ — реле минимального напряжения; SB — кнопка дистанционного отключения; З — защелка.

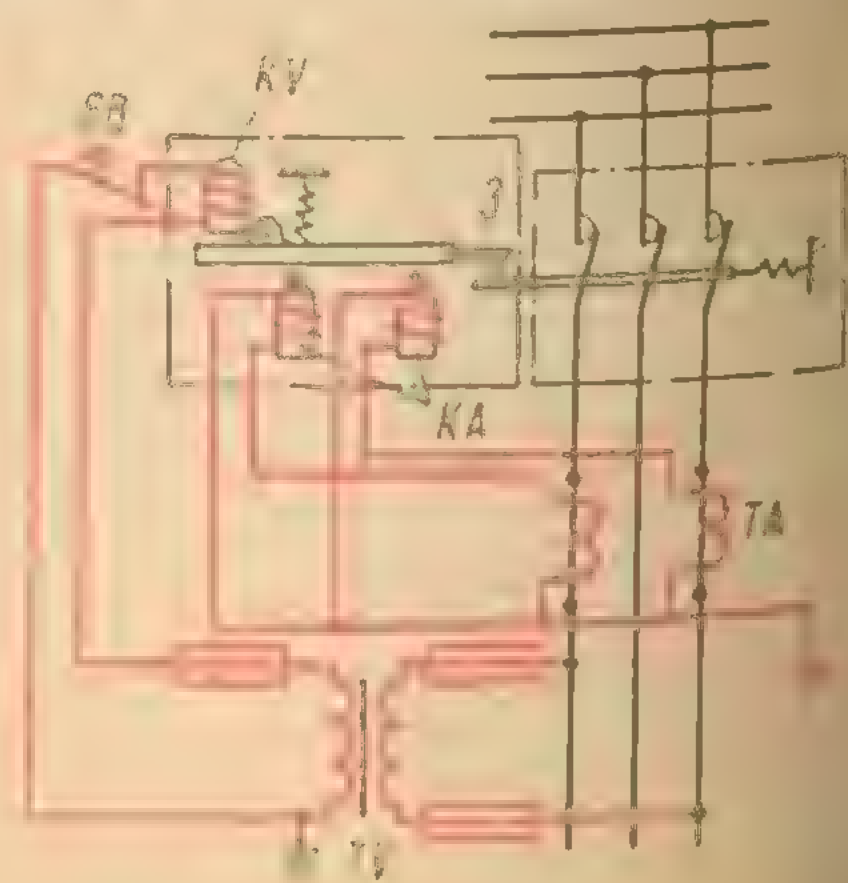


рис. 14.6. Схема действия АПВ с отделителями:
1 — выключатель на головном участке линии; 2 и 3 — отделители на от-
ветвлениях; КЗ — место короткого замыкания.

давления — увеличивается. Поэтому при размыкании высоковольтных контактов успешно гасится возникающая электрическая дуга, контакты не успевают подгореть, не происходит акустического взрыва. Эти выключатели значительно меньше воздушных. Наружный диаметр оболочки с элегазом у 220-киловольтного выключателя всего 0,8 м, а длина (высота) 3,5 м. Ширина трехфазного блока — до 3 м. Разработаны целые элегазовые подстанции, в которых все токоведущие элементы размещены в оболочках с элегазом. Эти подстанции компактны, почти не нуждаются в обслуживании, долговечны. Утечка элегаза вследствие его небольшого давления весьма незначительна. Ширина традиционного воздушного выключателя ВВН-220 больше 6 м, а высота более 8 м.

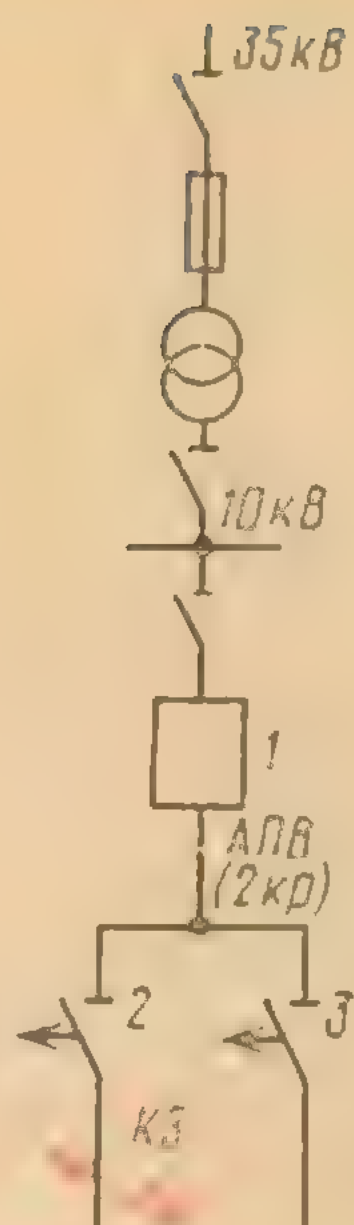
В электромагнитных выключателях (ВЭМ) гашение дуги происходит под действием магнитного дутья в специальных камерах с лабиринтной щелью, где дуга растягивается, охлаждается и гаснет.

Приводы высоковольтных выключателей должны обеспечивать надежное включение цепей, а также отключение при возникновении аварийных режимов. Для отключения служит специальная катушка, которая получает сигнал от реле защиты и вызывает отключение выключателя. Усилие при этом тратится только на выбивание защелки из запорного механизма, а раздвигают контакты выключателя мощные пружины.

Приводы к высоковольтным выключателям разделяют по роду расходуемой во время процесса включения энергии на *ручные* (штурвальные и рычажные) и *двигательные*. Ручные приводы могут быть с автоматическим отключением или без него. Двигательные приводы подразделяют на *приводы прямого действия* — электромагнитные, с дистанционным управлением, потребляющие энергию во время включения непосредственно от вспомогательного источника электроэнергии, и *приводы косвенного действия* — пружинные, грузовые, пневматические, осуществляющие включение за счет предварительно запасенной энергии.

На рисунке 14.5 приведена одна из многочисленных и разнообразных схем управления приводом. Схема выполнена на двух реле тока мгновенного действия K_A и одном реле минимального напряжения K_U , которое питается от трансформатора напряжения TU . Кнопка SB служит для дистанционного отключения выключателя.

В сельских сетях напряжением 6 и 10 кВ широко применяются грузовые приводы, обеспечивающие надежное мгновенное автоматическое повторное включение (АПВ) после кратковременных коротких замыканий, которые возникают от склестывания проводов и касания их веток деревьев при сильном ветре, а также из-за гроз, когда



возникает перекрытие электрической дугой изоляторов или промежутков в трубчатых разрядниках. Такие аварии ликвидируются, если линию отключить от источника питания на очень короткий период — 0,5...1 с.

Секционирование электрических сетей — одно из средств повышения надежности электроснабжения сельских потребителей. На отдельных отходящих линиях устанавливают автоматические выключатели, которые, например, при коротком замыкании на линии отключают поврежденный ее участок.

Автоматические отделители — это упрощенные секционирующие аппараты, выполняемые на базе разъединителей и применяемые на линиях напряжением 35 кВ и выше для секционирования сетей с АПВ (рис. 14.6). Отделители 2 и 3 отключают соответствующие участки линии при отсутствии напряжения до АПВ — во время бестоковой паузы, создаваемой выключателем 1 на головном участке линии. На отделителях установлены счетчики операций выключения и токовое реле, а на выключателе 1 головного участка — привод многократного АПВ.

При коротком замыкании на одной из отходящих линий отключается выключатель 1 и под действием механизма АПВ снова включается. Если короткое замыкание устранилось, линия остается в работе. В момент повторного отключения выключателя 1 (если короткое замыкание устойчивое) отделитель 2, счетчик импульсов которого зафиксировал два импульса тока короткого замыкания, отключается, а неповрежденная часть линии остается в работе. Отделитель отключается пружиной, которая заводится при ручном включении отделителя (с земли).

Короткозамыкатели типа КЗ на номинальные напряжения 35...220 кВ предназначены для создания искусственного короткого замыкания на линии электропередачи (чтобы вызвать отключение установки) при повреждении в трансформаторе понижающей подстанции.

14.2. ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛИ

Для защиты высоковольтных установок от коротких замыканий предназначены предохранители серий ПК, ПКУ (увеличенная мощность отключения), ПКИ (наружной установки), ПКЭ (экскаваторные — способные работать в условиях грязи и вибрации), ПКТ (для защиты цепей трансформаторов напряжения) и др.

Предохранитель серии ПК состоит из двух опорных изоляторов 1 (рис. 14.7, а), контактов 2, укрепленных на изоляторах, и патрона 3, вставляемого в контакты. Патрон (рис. 14.7, б) заполнен кварцевым песком. Внутри находится плавкая вставка, изготовленная из одной или нескольких медных посеребренных проволок (у ПКТ — проволоки константановые). Каждая проволока имеет ступени различных диаметров в целях ограничения перенапряжений при расплавлении от токов короткого замыкания. На проволоки плавких вставок напаяны оловянные шарики для снижения перегрева предохранителя при небольших перегрузках.

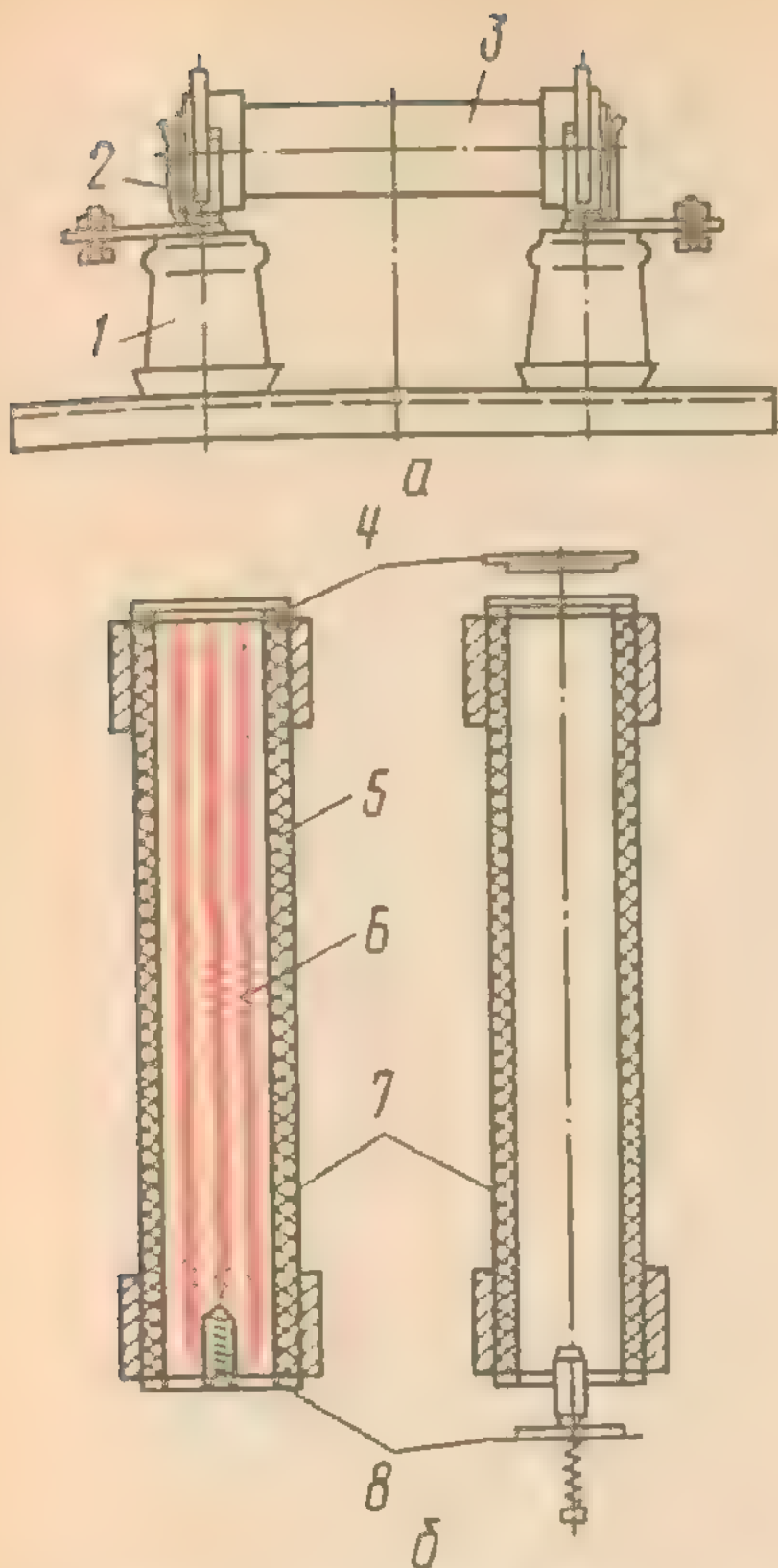


Рис. 14.7. Общий вид предохранителя ПК (а) и патрон предохранителя заряженный (б) и сработавший (в):

1 — изоляторы; 2 — контакты; 3 — патрон; 4 — крышка; 5 — кварцевый песок; 6 — плавкая вставка; 7 — кожух; 8 — указатель срабатывания.

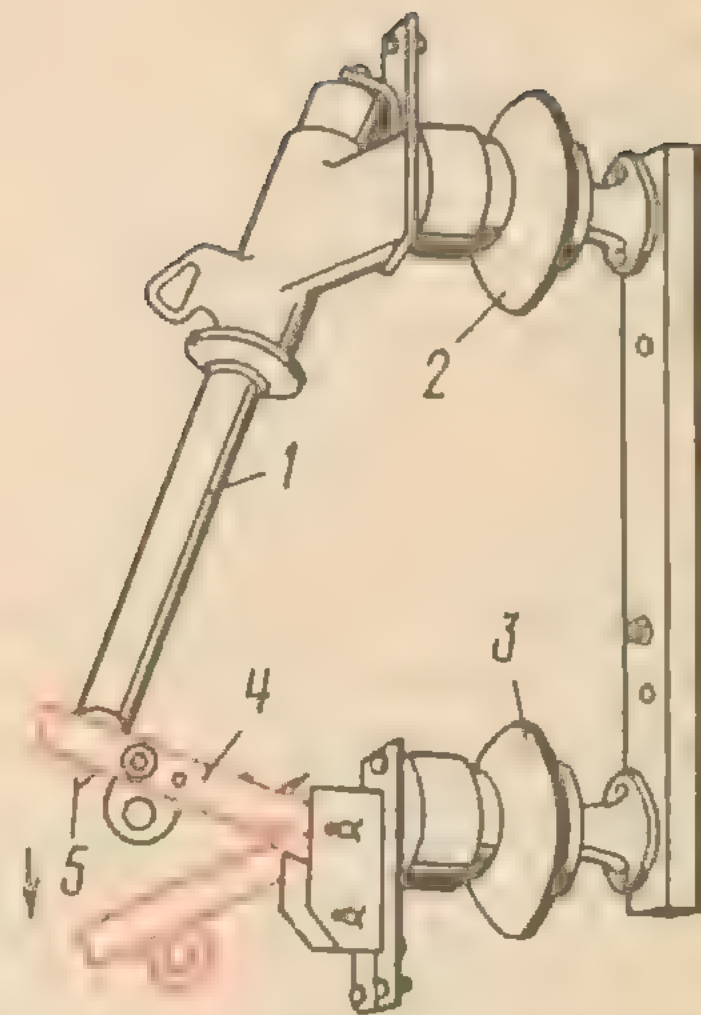


Рис. 14.8. Предохранитель стреляющего типа ПСН-35:

1 — трубка предохранителя; 2 и 3 — изоляторы; 4 — подвижный нож; 5 — металлический наконечник.

Предохранители серий ПК, ПКУ, ПКЭ снабжены указателем срабатывания. Нормальное положение этих предохранителей — вертикальное, указателем вниз.

В обозначении предохранителей ПК, например ПК-10н/30, первое число указывает номинальное напряжение, второе — наибольший номинальный ток плавкой вставки, которой может быть снабжен данный предохранитель (до 30А). Если в обозначении нет буквы «н» (наружная установка), то предохранитель предназначен для внутренней установки.

Предохранители стреляющего типа ПСН-35 широко применяются в установках напряжением 35 кВ. Они действуют следующим образом. Трубка 1 (рис. 14.8) предохранителя устанавливается несколько наклонно на изоляторах 2 и 3. Нижний изолятор 3 снабжен ножом 4 с пружиной, которая стремится повернуть нож в положение, показанное пунктиром. В нормальном положении нож 4 связан с плавкой вставкой при помощи металлического наконечника 5. При этом пружина натянута. Когда плавкая вставка перегорает, нож под действием пружины при помощи гибкой проволоочной связи вытягивает через наконечник 5 плавкую вставку, которая помещается внутри трубки, ближе к верхнему изолятору 2. Дуга распространяется вдоль трубки, давление оказывается очень высоким. Чем больше ток короткого

замыкания, тем сильнее давление и тем интенсивнее гаснет дуга. Перегорание предохранителя при этом сопровождается звуком, подобным выстрелу. Предельная мощность отключения предохранителей типа ПСН-35 составляет 550 МВ · А.

14.3. РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НАПРЯЖЕНИЕМ ДО 1000 В

На каждой электрической станции или подстанции есть распределительное устройство, назначение которого состоит в том, чтобы принять электрическую энергию от генератора или трансформатора и передать ее потребителям. Приборы и аппараты, установленные в распределительном устройстве, позволяют включать и отключать отдельные потребители или их группы, учитывать потребляемую ими энергию, измерять мощность, ток, напряжение, частоту и т. д. В распределительных устройствах сосредоточены аппараты защиты от повреждений на отходящих линиях.

Распределительные устройства могут быть закрытого типа, когда все элементы схемы электрических соединений — выключатели, разъединители, измерительные трансформаторы, приборы и др. — расположены внутри помещения, и открытого типа, размещаемые вне помещений. Распределительные устройства на напряжение 35 кВ и выше сооружают, как правило, открытого типа. Измерительные приборы и аппаратуру релейной защиты устанавливают в этом случае в специальных шкафах. Широкое применение на станциях и подстанциях находят комплектные распределительные устройства (КРУ, КРУН).

В низковольтных распределительных устройствах используют распределительные щиты каркасного типа одностороннего и двухстороннего обслуживания. Распределительный щит комплектуется из отдельных панелей — вводных, линейных, секционных и торцовых — различных конструкций.

На рисунке 14.9 приведены эскиз и схема линейной панели щита типа ЩОБ. Панель состоит из каркаса, на котором смонтированы блоки БПВ (блок предохранитель — выключатель), БВ (блок с ножами вместо выключателей, имеющими двойной разрыв цепи) и измерительные приборы. Каркас по вертикали разбит на пять отсеков. В среднем отсеке размещены сборные шины и приборы, над ним и под ним — блоки, в верхнем — только приборы, а в нижнем — концевые разделки линий. Крышки отсеков выполнены съемными. Это позволяет проводить монтаж, ревизию и ремонт с лицевой стороны щита.

Для электростанций малой мощности (от 35 до 150 кВ · А) промышленность выпускает стандартные щиты управления типа ЩУП. Далее в обозначении щита следует цифра, указывающая мощность генератора, для которого предназначается щит. Такой щит укомплектован всеми необходимыми приборами и аппаратами управления генератором, контроля за его работой и распределением энергии между потребителями. На рисунке 14.10 изображена схема

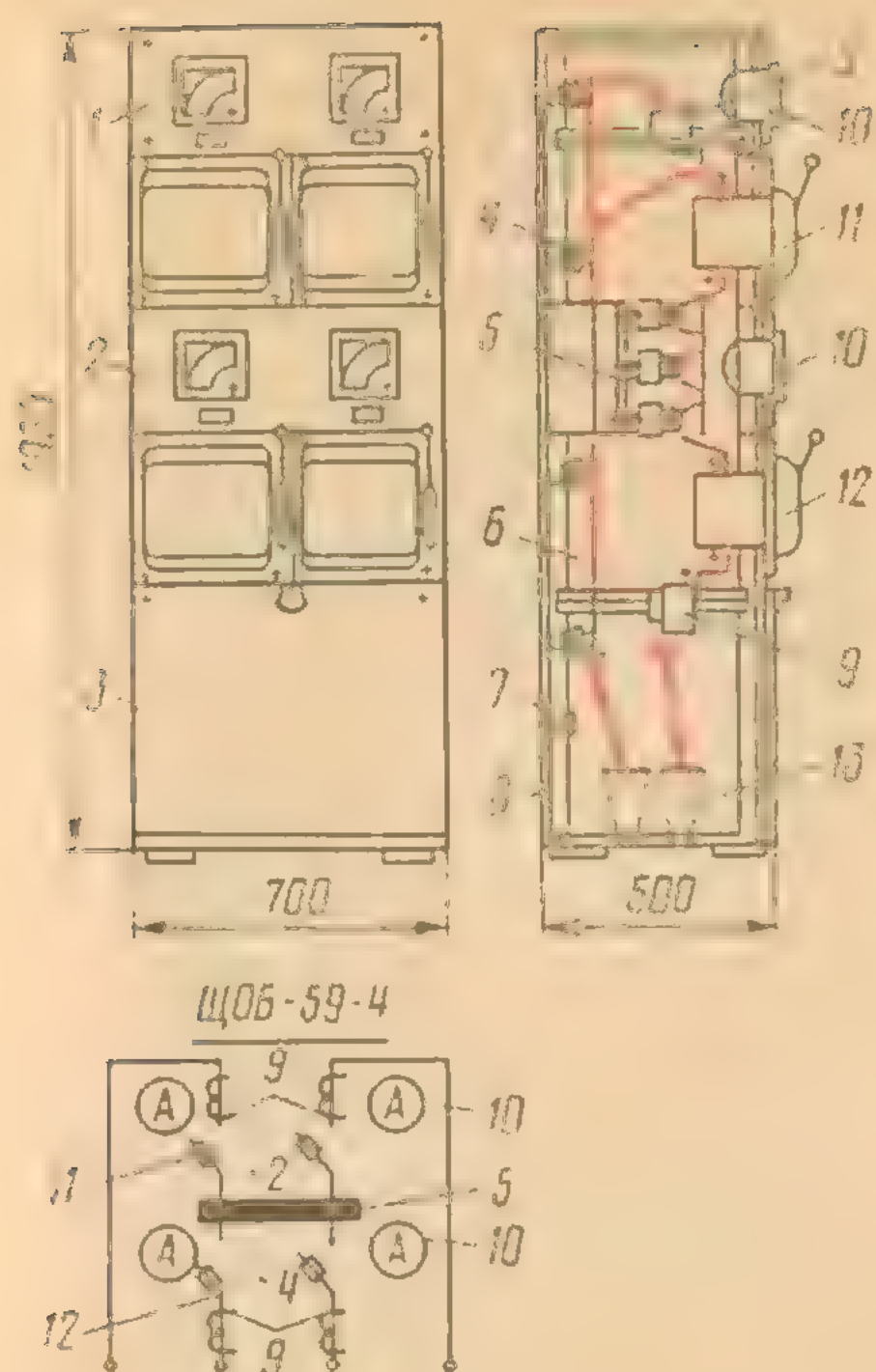


Рис. 14.9. Эскиз вводной панели ЩОБ-3 и схема панели ЩОБ-4:

1 — крышка верхнего отсека; 2 — крышка среднего отсека; 3 — крышка нижнего отсека; 4 — изоляторы; 5 — сборные шины; 6 — шинный спуск; 7 — держатель нулевой шины; 8 — каркас; 9 — трансформатор тока; 10 — прибор; 11, 12 — блоки БПВ; 13 — отсек для концевых разделок.

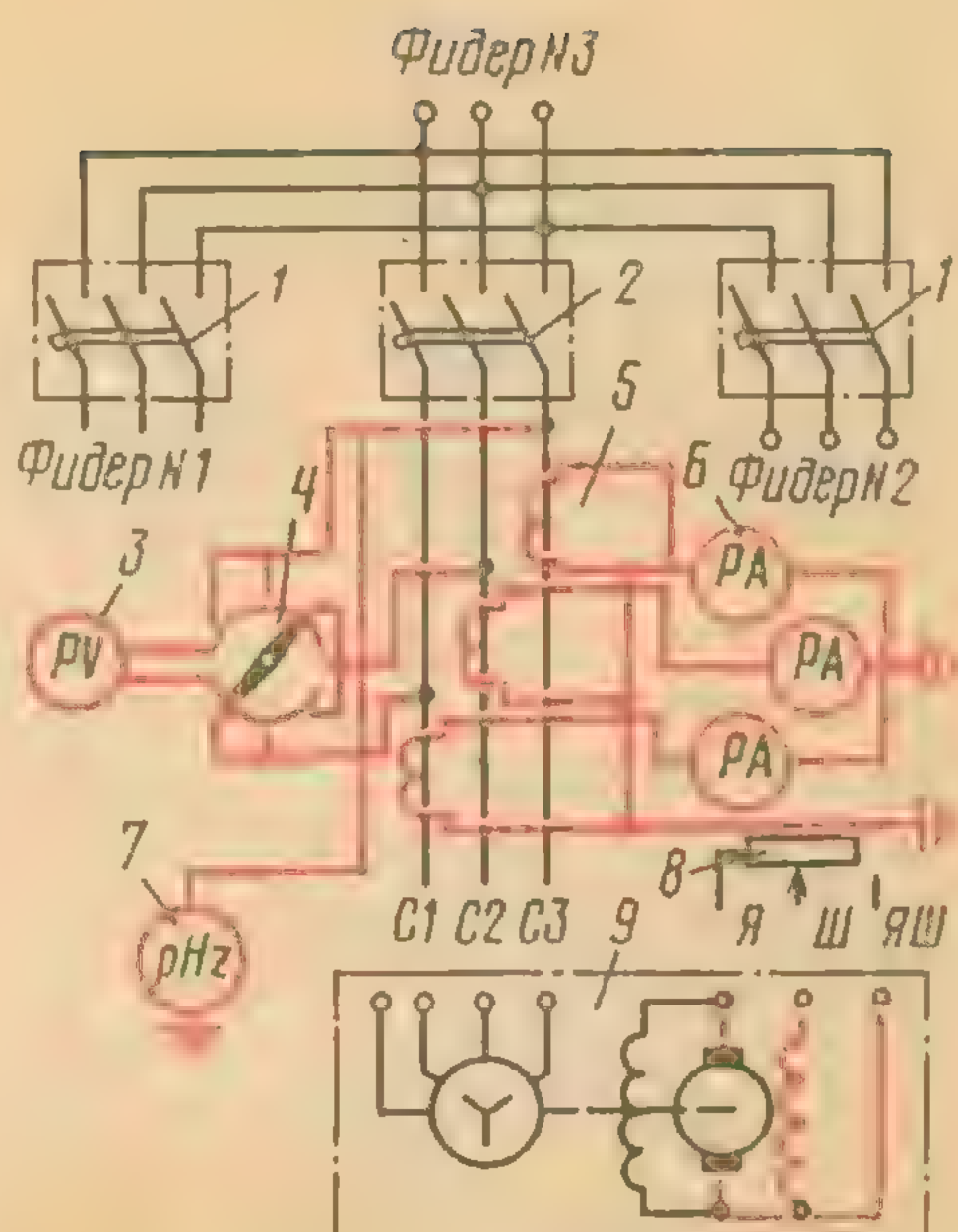


Рис. 14.10. Схема щита типа ЩУП

1 и 2 — автоматы; 3 — вольтметр; 4 — переключатель; 5 — трансформатор тока; 6 — амперметр; 7 — частотомер; 8 — реостат возбуждения; 9 — генератор с возбудителем.

щита типа ЩУП-35Р (с ручным регулированием напряжения) для управления генератором мощностью 35 кВ · А. По аналогичной схеме выполнены щиты ЩУП-60Р и ЩУП-125.

Генератор с возбудителем присоединяют к соответствующим зажимам щита — C_1 , C_2 , C_3 и Я, Ш, ЯШ. Энергия от генератора поступает через автомат 2 типа АЗ100 на фидеры потребителей № 1, 2 и 3, которые включаются и выключаются автоматами 1 того же типа, оборудованными встроенной тепловой защитой от перегрузок. Автомат 2, кроме того, снабжен электромагнитным расцепителем для защиты от коротких замыканий. Напряжение регулируют вручную реостатом 8, включаемым в цепь обмотки возбуждения возбудителя.

Ток в каждой из фаз измеряют амперметрами 6, включенными через трансформаторы тока 5, напряжение между любыми двумя фазами — вольтметром 3 с переключателем, частоту — частотомером 7. Для получения фазного напряжения на щите внизу предусмотрены два зажима с условным обозначением земли. Щит управления типа ЩУП-125Р снабжен дополнительно счетчиком энергии типа СА4.

В заказе на щит управления обязательно следует указывать тип генератора, его мощность, напряжение, число фаз и фидеров, ток фидеров.

14.4. ЗАКРЫТЫЕ ВЫСОКОВОЛЬТНЫЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НАПЯЖЕНИЕМ 6 И 10 кВ

Закрытые распределительные устройства размещают в специально выстроенных для этой цели помещениях, разделенных на отсеки или ячейки. В каждой из ячеек устанавливают аппараты и приборы, относящиеся лишь к одной цепи тока.

На рисунке 14.11 показаны ячейки закрытого распределительного устройства, с которых сняты панели.

Распределительное устройство состоит из пяти ячеек. Над ячейками вверху проложены сборные шины 9. Они укреплены на опорных изоляторах 3. В первой слева ячейке находятся элементы, относящиеся к цепи присоединения трансформатора напряжения. В ячей-

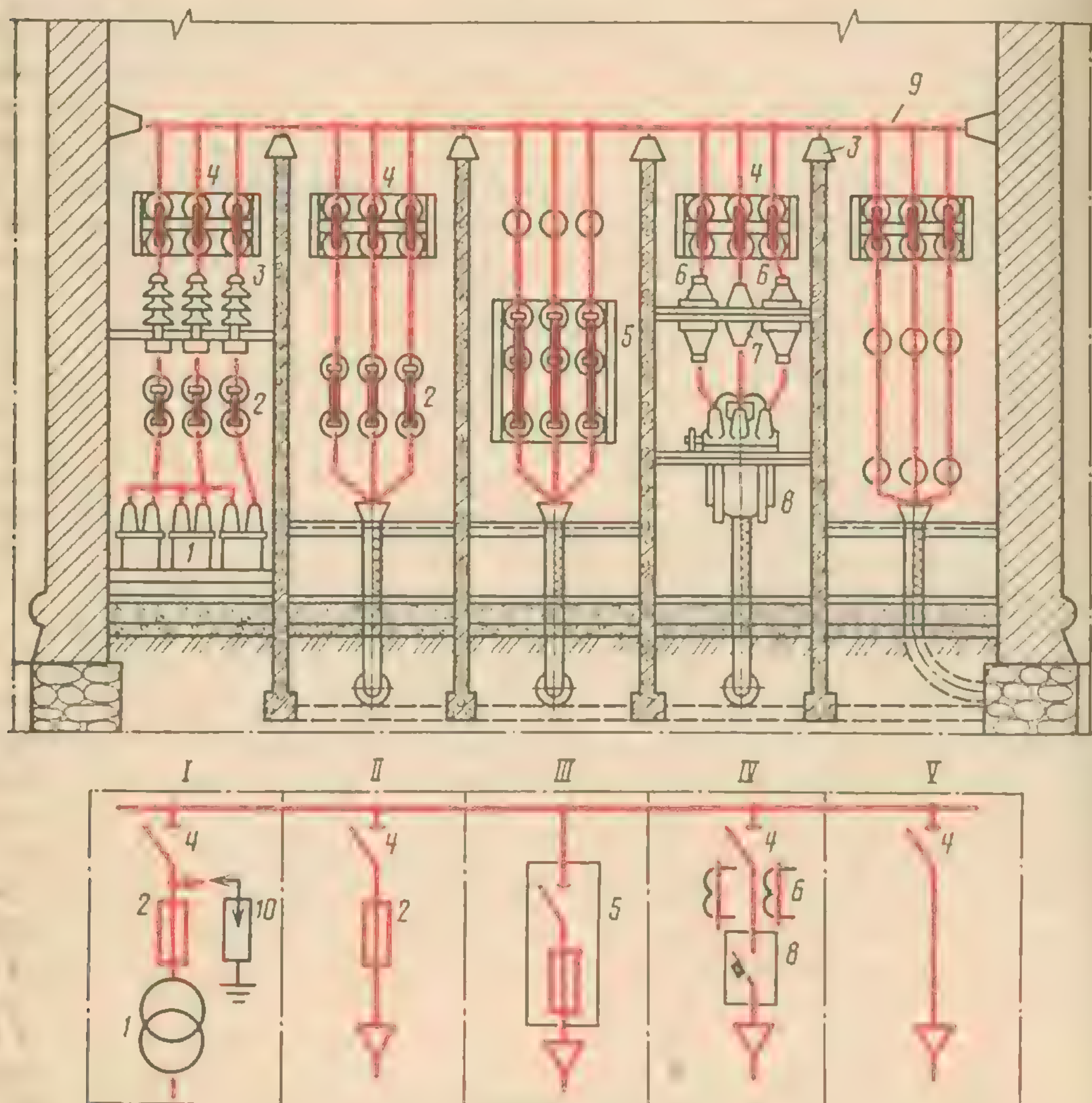


Рис. 14.11. Закрытое высоковольтное устройство на 6 и 10 кВ и его схема:

1 — трансформатор напряжения; 2 — предохранители; 3 — опорные изоляторы; 4 — разъединители; 5 — выключатель нагрузки; 6 — трансформаторы тока; 7 — проходной изолятор; 8 — механический выключатель; 9 — сборные шины; 10 — разрядники; I — ячейка трансформатора напряжения и разрядников; II, III, IV — ячейки отходящих линий; V — ячейка ввода силового трансформатора.

ках I, II, IV и V размещены разъединители 4. В ячейке I установлены разрядники 10, предохранители 2 и трансформаторы напряжения 1.

В ячейке II, кроме разъединителя, имеются предохранители 2 и кабельная муфта. Через кабель напряжение подается на отходящую линию. В ячейке III размещены выключатель нагрузки 5 и кабельная муфта вывода на воздушную линию. В ячейке IV установлены, кроме разъединителя, два трансформатора тока 6, проходной изолятор 7, масляный выключатель 8 и кабельный вывод на воздушную отходящую линию. В ячейке V расположен один разъединитель, через который к сборным шинам присоединен силовой трансформатор, установленный снаружи.

Разъединителями, выключателем нагрузки и масляным выключателем управляют при помощи рычажных приводов, не показанных на рисунке. Распределительное устройство такого типа характерно для сельской (резервной) электростанции мощностью до 600 кВ·А.

Для удобства монтажа и его удешевления промышленность выпускает комплектные распределительные устройства закрытого типа (КРУ). Ячейка комплектного распределительного устройства представляет собой стальной шкаф, в котором устанавливают необходимое оборудование. Все распределительное устройство собирают из отдельных шкафов и соединяют между собой шинопроводом.

14.5. ТРАНСФОРМАТОРНЫЕ ПОДСТАНЦИИ НАПЯЖЕНИЕМ 10/0,4; 35/10 и 35/6 кВ

Потребительские подстанции напряжением 10/0,4 кВ могут быть нескольких типов: закрытые, открытые (мачтовые) и комплектные.

Закрытые трансформаторные подстанции, или трансформаторные киоски, получили применение главным образом в городах и на крупных промышленных предприятиях.

Мачтовые трансформаторные подстанции получили наибольшее распространение в сельском хозяйстве. На них можно устанавливать силовые трансформаторы мощностью до 250 кВ·А. К высоковольтной линии трансформатор присоединяют при помощи разъединителей и высоковольтных предохранителей. В ряде типовых проектов открытых понижающих трансформаторных подстанций 10/0,4 кВ, а также в закрытых понижающих подстанциях со стороны низшего напряжения 0,4 кВ вместо рубильников и предохранителей на отходящих фидерах рекомендуется использовать автоматические воздушные выключатели серий АЗ100 и АЗ700.

В целях освещения установлены пакетные выключатели или магнитные пускатели. Для учета энергии применяют счетчики электрической энергии типа СО2 или СА4, включая их через трансформатор тока.

Вся низковольтная аппаратура размещена в металлическом шкафу заводского изготовления. Высоковольтным разъединителем управляют с земли при помощи съемного или запирающегося на замок

привода. Трансформатор устанавливают на площадке, на которую, для того чтобы сменить предохранители или сделать профилактический осмотр, нужно подняться по раздвижной лестнице, сблокированной с приводом разъединителя так, что разъединитель можно включить лишь после того, как лестница сложена и заперта.

Вокруг подстанции выполняют заземляющее устройство (контур) из уголковой стали или труб. Заземлители соединяют между собой шиной из полосовой или круглой стали, которую приваривают к каждому заземлителю. Провод от заземляющего устройства присоединяют к нейтрали трансформатора, а также к его кожуху, к металлической раме разъединителя, крюкам и штырям изоляторов. Таким образом заземляют все металлические части, нормально не находящиеся под напряжением, но могущие оказаться под ним вследствие повреждения изоляции. Вверху, на стороне высокого напряжения, устанавливают разрядники для защиты трансформатора от атмосферных перенапряжений. Подстанцию вместе с заземляющим устройством ограждают.

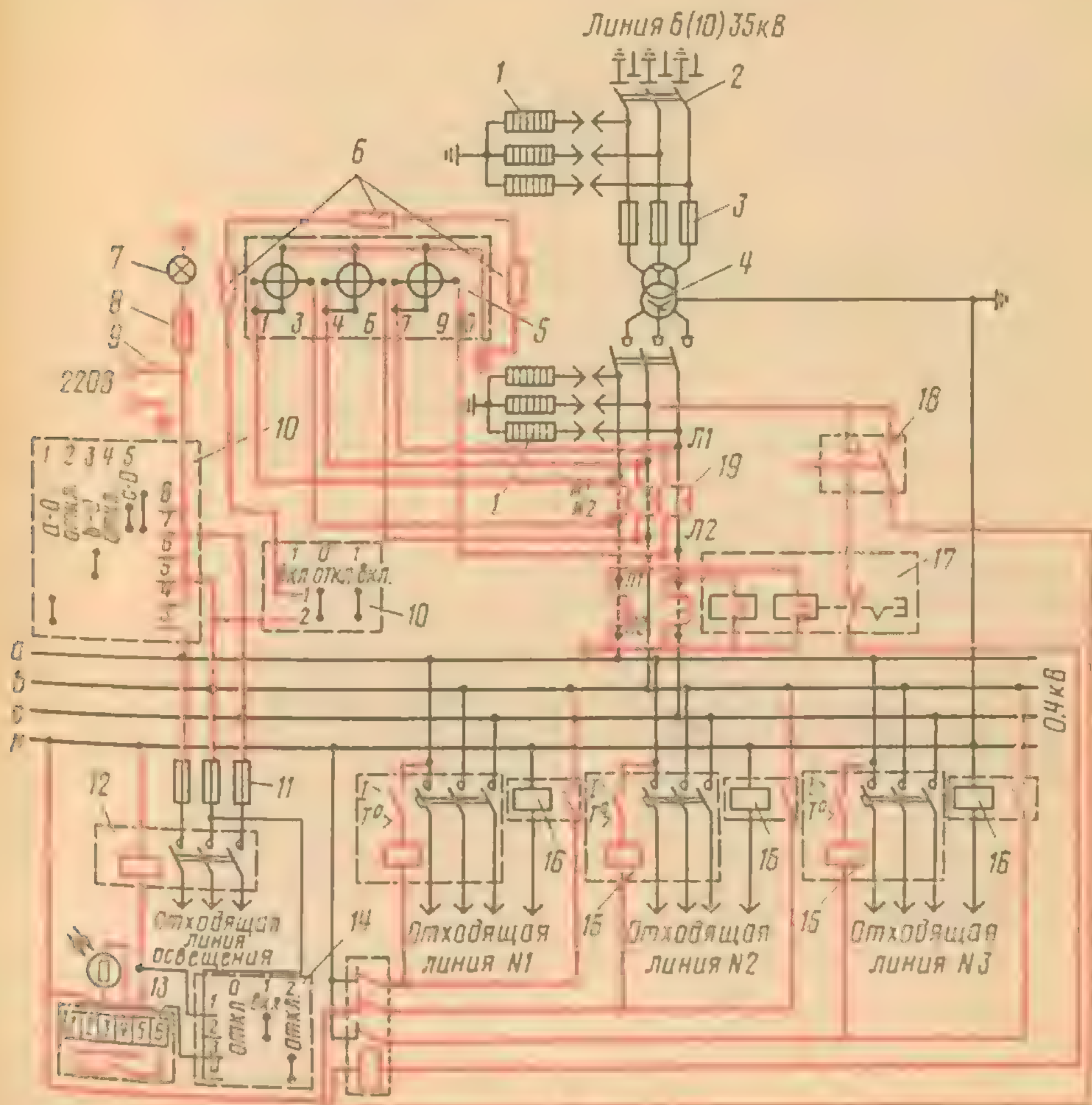
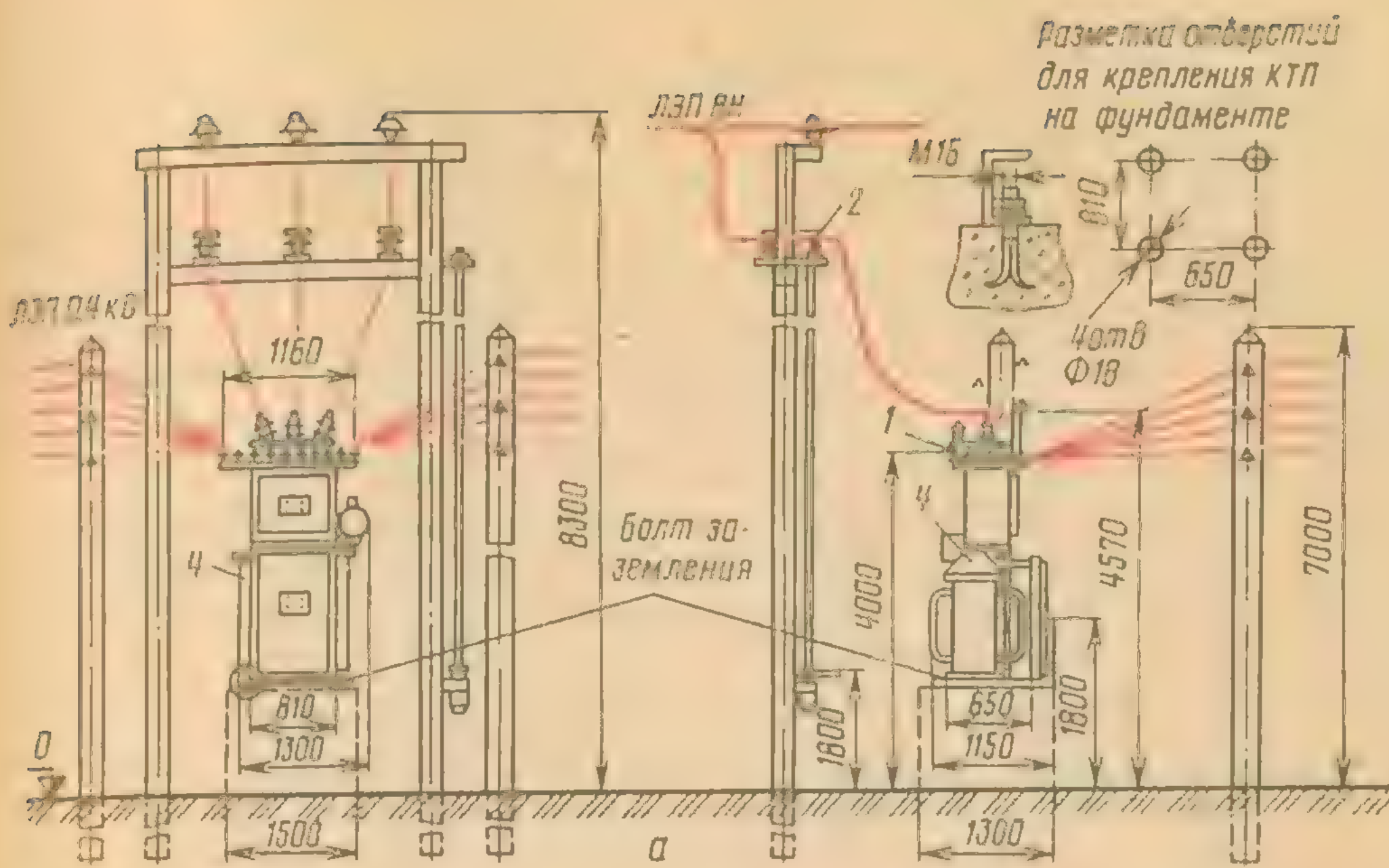
Мачтовым трансформаторным подстанциям мощностью до 250 кВ · А могут быть приданы различные конструктивные формы: П-образная, АП-образная, А-образная. Если на подстанции устанавливают трансформатор мощностью 250 кВ · А и более, то его обычно монтируют на фундаменте из дерева или камня, а все остальное оборудование монтируют на П- или АП-образных опорах. Территорию такой трансформаторной подстанции следует ограждать сплошным деревянным забором высотой не менее 2,5 м с воротами для автомобилей и калиткой для обслуживающего персонала. Провода от выводов низшего напряжения трансформатора до щита и от щита до изоляторов на отходящих линиях прокладывают обычно в металлических трубах.

Комплектные трансформаторные подстанции наружной установки типов КТП с трансформаторами типа ТМ напряжением 6...10/0,4 кВ и мощностью 25, 40, 63, 100, 160, 250 кВ · А (рис. 14.12) значительно дешевле и удобнее применять вместо мачтовых трансформаторных подстанций.

В цепи высшего напряжения установлен блок разъединитель — предохранитель (2—3). Разрядники 1 предназначены для защиты трансформатора 4 от атмосферных перенапряжений. На отходящих линиях № 1, 2 и 3 размещены автоматы 15, а на линии уличного освещения — магнитный пускатель 12. Управление освещением может быть осуществлено от фотореле 13, которым снабжается цепь управления магнитного пускателя 12. Со стороны низшего напряжения силовой

Рис. 14.12. Комплектная потребительская подстанция КТП (КТПА) с трансформатором до 250 кВ · А:

а — схема установки КТП; б — принципиальная схема соединений; 1 — разрядники; 2 — разъединитель; 3 — предохранитель; 4 — трансформатор; 5 — счетчик СА-4; 6 — нагреватель; 7 — лампа; 8 — предохранитель; 9 — розетка; 10 — переключатель; 11 — предохранители ПР-1; 12 — магнитный пускатель; 13 — фотореле (автоматическое включение уличного освещения); 14 — переключатель уличного освещения; 15 — автоматический выключатель; 16 — токовое реле; 17 — тепловое реле; 18 — конечный выключатель; 19 — трансформатор тока.



трансформатор защищен от коротких замыканий электромагнитным, а от перегрузок — тепловыми расцепителями установочных автоматов 15 и предохранителями 11 в линии уличного освещения. Расход электроэнергии учитывает трехфазный четырехпроводный счетчик 5, включенный через трансформаторы тока 19. Контрольная лампа 7 с переключателем 10 служит для проверки напряжения на стороне низшего напряжения и для освещения приборов распределительного шкафа низшего напряжения. Переключатель 10 подает на розетку 9 любое междупазное напряжение. Включая переносной вольтметр в розетку 9, можно измерить значения и проверить симметричность напряжений трансформатора. Нагреватель 6, включаемый пакетным выключателем, предназначен для подогрева воздуха внутри распределительного шкафа низшего напряжения в зимнее время. В цепи контрольной лампы установлены пробочные предохранители 8.

Комплектные трансформаторные подстанции типа КТПН-72 наружной установки рассчитаны на трансформаторы мощностью 160, 250, 400 и 630 кВ · А, напряжением 6 (10)/0,4 кВ.

В состав подстанции входят коммутационные аппараты на 6 и 10 кВ — разъединитель РВ-10 и предохранители ПК-6/10, силовые трансформаторы типа ТМ, коммутационные аппараты на 0,4 кВ — блоки БПВ-6 и БПВ-10 с предохранителями ПП-2. Число отходящих линий — до 9.

Ко всем подстанциям прилагают инструкцию по установке и вводу в эксплуатацию.

Трансформаторные подстанции напряжением 35/10 и 35/6 кВ являются, как правило, районными понизительными подстанциями. От них электрическая энергия передается на напряжении 10 или 6 кВ в радиусе до 25 и 15 км соответственно. Однако, например, если напряжение генераторов на электростанции 6 кВ, а значительную мощность требуется передать на расстояние нескольких десятков километров, то такая подстанция должна быть повысительной (с 6 на 35 кВ).

На данных трансформаторных подстанциях применяют комплектные распределительные устройства: на 35 кВ — открытого типа, а на 6 или 10 кВ — закрытого.

Отходящие от подстанции распределительные сети 380/220 В защищают, как правило, автоматическими выключателями.

Контрольные вопросы и задания к главе 14. 1. Для каких операций предназначены разъединители, выключатели нагрузки, автоматические выключатели? 2. Как устроены масляные баковые, маломасляные и горшковые выключатели? 3. Расскажите о принципе действия автоматического выключателя с воздушным дутьем. 4. Как приводятся в действие автоматические выключатели? 5. Как работают стреляющие высоковольтные предохранители? 6. Расскажите о схеме распределительного устройства дизельной электростанции до 150 кВт. 7. Как скомпоновано распределительное устройство на 6 и 10 кВ? 8. Объясните по схеме назначение отдельных элементов комплектных трансформаторных подстанций. 9. Как выполняется заземляющее устройство на подстанции?

15.1. СХЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ. ВЫБОР МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ

Основной особенностью сельских электрических сетей, отличающей их от сетей промышленных или коммунальных, является большая протяженность при сравнительно малой передаваемой мощности.

В сельскохозяйственных районах применяются следующие системы распределения электроэнергии.

1. Обычная трехфазная система (рис. 15.1, а). На напряжении 10 кВ по трехфазной линии электрическая энергия распределяется в пределах района в радиусе 15...20 км от районной понизительной подстанции напряжением 35/10 кВ или от электростанции. Распределительная сеть на напряжении 380/220 В передает электрическую энергию в пределах населенного пункта в радиусе до 1,5 км от потребительской трансформаторной подстанции 2.

2. Смешанная — трехфазно-однофазная система. Эта система распределения (рис. 15.1, б) предусматривает использование трехфазного напряжения 380/220 В для питания мощных трехфазных силовых потребителей и прилегающих к ним однофазных токоприемников. Здесь используются обычные трехфазные трансформаторы.

Многие сельские потребители представляют собой однофазные осветительные и бытовые электроприемники. Для их питания целесообразно применять однофазные трансформаторы 3. Высоковольтную сеть к ним выполняют однофазной двухпроводной. Низшее напряжение в данном случае 2×220 В с отводом от средней точки обмотки. Этот вывод заземляется. Напряжение 220 В используют для

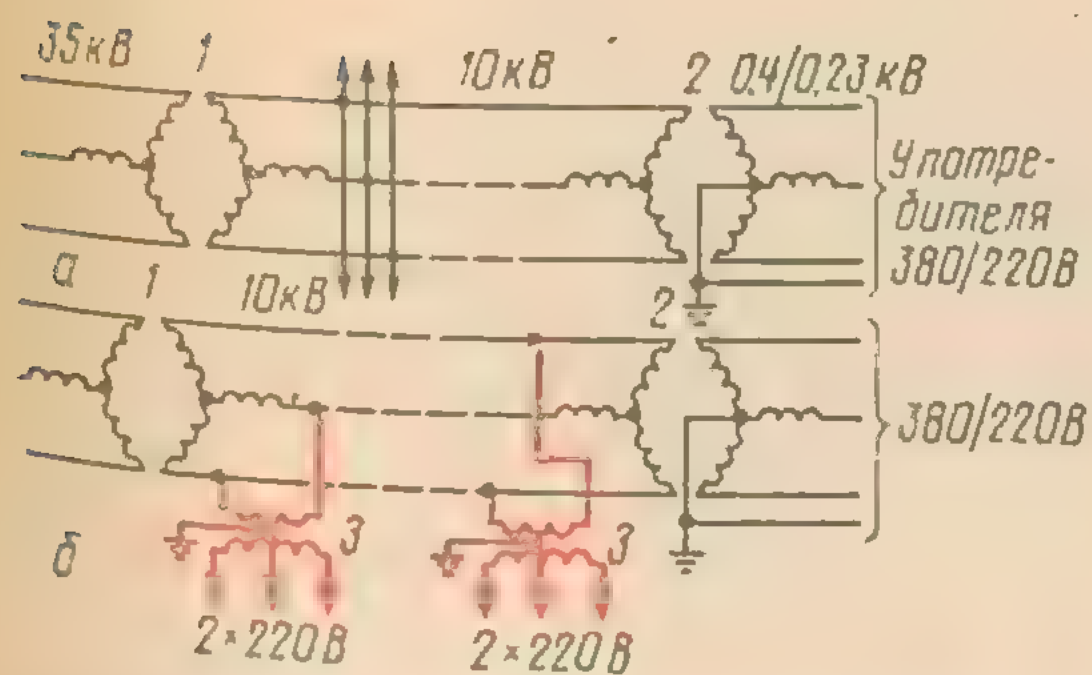


Рис. 15.1. Системы распределения электроэнергии:

а — трехфазная; б — смешанная; 1 — районная подстанция 35/10 кВ; 2 — потребительская подстанция 10/0,4 кВ; 3 — однофазный трансформатор.

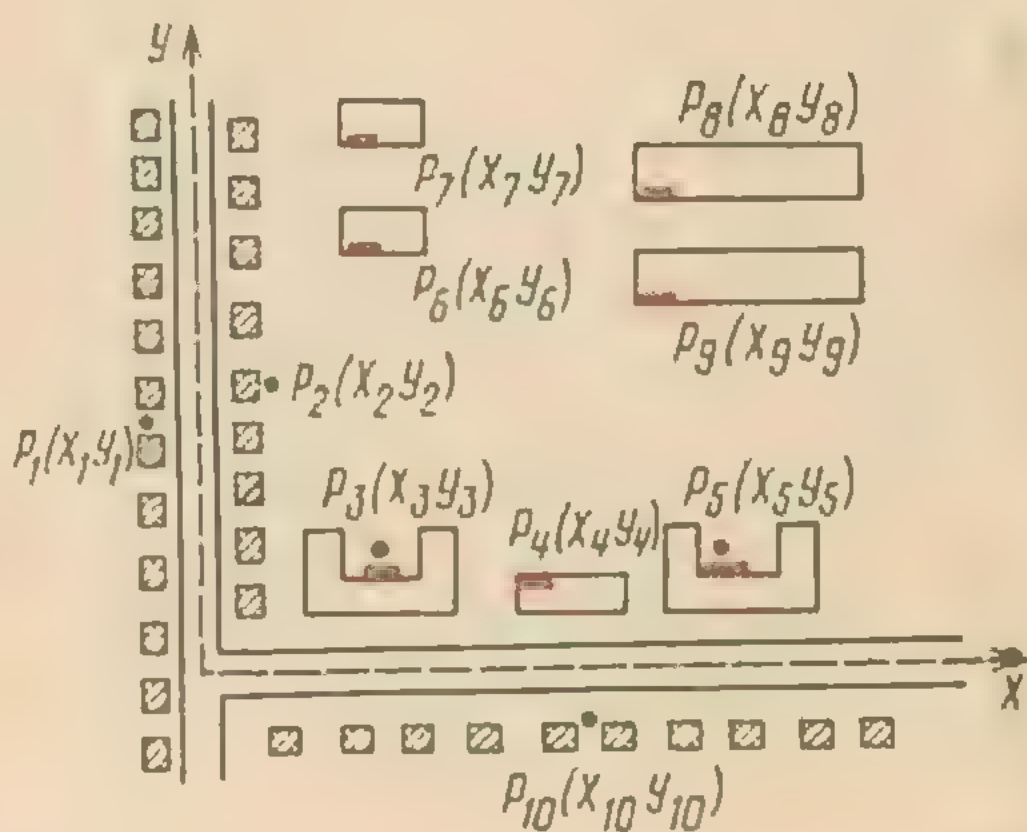


Рис. 15.2. Определение центра тяжести нагрузок.

осветительной и бытовой нагрузок, а напряжение 440 В — для включения однофазных двигателей.

Потери мощности (энергии) в низковольтных сетях окажутся наименьшими в том случае, если трансформаторная подстанция будет расположена в центре тяжести нагрузок. Центр тяжести нагрузок определяют следующим образом (рис. 15.2). На планкарте населенного пункта обозначены координаты x и y точек, в которых к низковольтной сети должны быть присоединены потребители, и указаны мощности P этих потребителей. Суммарные мощности жилых домов вдоль улиц P_1 , P_2 и P_{10} для упрощения сосредоточены в трех точках. В качестве осей координат можно выбрать, например, две улицы, расходящиеся под прямым углом. Координаты местоположения трансформаторной подстанции находят из равенств:

$$x_{п/ст} = \frac{P_1 x_1 + P_2 x_2 + P_3 x_3 + \dots}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots}, \quad (15.1)$$

$$y_{п/ст} = \frac{P_1 y_1 + P_2 y_2 + P_3 y_3 + \dots}{P_1 + P_2 + P_3 + \dots}. \quad (15.2)$$

После определения координат подстанции и нанесения их на планкарту намечают сети низшего напряжения.

В каждом отдельном случае для выбора экономически целесообразного местоположения подстанции следует проводить сравнительные расчеты ряда вариантов.

15.2. ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ СЕТЯМ

Электрические сети должны надежно подавать потребителю электроэнергию надлежащего качества (при стабильных напряжениях и частоте) и удовлетворять требованиям электрической и пожарной безопасности. Чтобы эти требования были выполнены, следует правильно выбирать материал, конструкцию и высоту опор, а также тип проводов и площадь их сечения.

Опоры могут быть деревянными (сосна, лиственница, ель, пихта), железобетонными и составными — с приставкой из железобетона и стойкой из дерева. Бревна, предназначенные для изготовления деревянных опор (стоек и пасынков) линии 35 кВ, должны иметь диаметр в верхнем отрубе не менее 18 см, а линий 6 и 10 кВ и низшего напряжения — 17 см. Высоту опор и расстояние между ними выбирают с таким расчетом, чтобы были соблюдены допустимые приближения проводов к земле и воде (табл. 15.1).

Если линии пересекаются между собой, то расстояния между проводами должны быть следующие: при напряжении каждой линии 6...10 кВ или менее — 2 м, между линией 35 кВ и линией меньшего напряжения — не менее 3 м, между линиями связи и линиями напряжением 380/220 В — не менее 1 м.

Расстояния между проводами линии напряжением 380/220 В при пролете до 30 м: вертикальное — не менее 40 см, горизонтальное — не менее 20 см; при пролетах, больших 30 м: вертикальное

15.1. Допустимые приближения проводов воздушных линий к поверхности земли

Характеристика района, в котором проходит линия	Допустимые значения приближения (м) к поверхности проводов линий номинальным напряжением, кВ		
	до 1	1...20	35
Ненаселенная местность	5	6	6
Населенная местность	6	7	7
Районы с очень малой плотностью населения, труднодоступные для транспорта (кочевья, крутые склоны гор и т. п.)	4	4,5	5
Несудоходные и несплавные реки, озера (до уровня высоких вод)	3	3	3
Пересечение железных дорог (до рельса)	7,5	7,5	7,5
Пересечение автогужевых дорог	7	7	7

не менее 40 см, а горизонтальное — не менее 30 см. Расстояния между проводами в линиях высокого напряжения зависят от величины пролета и от климатических условий (табл. 15.2).

Для алюминиевых проводов расстояния между проводами должны быть увеличены на 20 %.

По климатическим условиям наша страна разделена на четыре района: I, II, III и IV, в которых соответственно толщина стенки гололеда на проводах достигает 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 см, а расчетная скорость ветра — 10, 10, 15 и 15 м/с.

Вводы в помещения выполняют таким образом, чтобы высота проводов от земли у здания была не менее 2,75 м, но при условии, что они не пересекают проезжей территории, и длина ввода от столба до здания не более 10 м, а высота подвеса провода на

15.2. Наименьшие расстояния между проводами воздушных линий (ВЛ) напряжением 35 кВ и ниже по условиям сближения в пролете

Характеристика ВЛ	Толщина стенки гололеда, мм	Наименьшие расстояния между проводами (см) при пролетах между опорами, м								
		30	50	75	100	125	150	175	200	225

ВЛ со штыревыми изоляторами напряжением, кВ:	до 6	5...10	50	50	80	80	90	100	110	130	150
		15...20	80	80	100	125	150	175	—	—	—
10...20		5...10	80	80	80	80	100	110	130	150	175
		15...20	100	100	125	150	175	200	—	—	—
35		5...10	100	100	100	100	125	150	175	200	225
		15...20	150	150	175	200	225	250	—	—	—
ВЛ с подвесными изоляторами напряжением 20...35 кВ		5...10	—	100	125	150	175	200	225	250	250
		15...20	—	175	200	225	250	275	300	—	—

столбе не меньше 5,25 м. При других условиях ввод в здание должен выполняться так, чтобы низшая точка проводов находилась на высоте не менее 3,5 м.

В ряде случаев допускается совместная подвеска проводов линий высокого напряжения (до 10 кВ) и линий низшего напряжения. При этом расстояние между нижним проводом высокого напряжения и верхним проводом низшего напряжения должно быть не менее 1,5 м.

Для проводов высокого напряжения на участке совместной прокладки применяют усиленное крепление. Соединяют провода только на изоляторах, а не в пролете. Принимаются и другие меры, исключая замыкание линии высокого напряжения на линию низшего напряжения, которое может вызвать в первую очередь пробой изоляции токоприемников, а также создать опасность поражения электрическим током людей, занятых эксплуатацией электроустановок низшего напряжения.

Для усиления грозозащиты и предотвращения попаданий волн перенапряжения из линии высокого напряжения в линию низшего напряжения по концам участка совместной проводки устанавливают трубчатые разрядники. На крайних опорах совместной проводки выполняют повторные заземления нулевого провода. Их объединяют с заземлениями разрядников, причем сопротивление заземления не должно превышать 20 Ом.

На электростанции или подстанции, от которой отходят провода высокого напряжения, рекомендуется защита от замыкания на землю с отключением линии.

На опорах нулевой провод располагают ниже фазных проводов и проводов уличного освещения. Устанавливаемые на опорах плавкие предохранители и другие устройства размещают ниже проводов воздушной линии.

Соединять провода следует при помощи соединительных зажимов или сваркой (в том числе термитной). Однопроволочные провода соединяют скруткой с последующей пайкой. Провода из разных металлов или с разной площадью поперечного сечения нужно соединять на опорах при помощи переходных зажимов.

Расстояние по горизонтали от зданий (балконов, террас и окон) должно быть не менее 1,5 м, а от глухой стены — 1 м. Над зданиями (за исключением подходов к вводам) линии проводить нельзя.

Наименьшее расстояние от опор до водо-, газо- и паропроводов, а также от канализации — 1 м, от пожарных гидрантов, водоразборных колонок — 2 м, от бензиновых колонок — 10 м, от кабелей (кроме кабелей связи и радио) — 0,5 м. Расстояние линии от ветвей деревьев, в том числе при проходе через насаждения и лесные массивы, не менее 1 м.

К проводам линий предъявляются следующие основные требования: 1) не должны нагреваться проходящим по ним током до температуры, опасной в пожарном отношении; 2) должны быть механически прочными и выдерживать нагрузки от ветра и обледенения; 3) обеспечивать подачу энергии надлежащего качества.

По условиям механической прочности (требование 2) на воздуш-

ных линиях следует применять провода с площадью сечения не менее: алюминиевые — 16 мм^2 , сталеалюминиевые и биметаллические — 10 мм^2 , стальные многопроволочные — 25 мм^2 , стальные однопроволочные — 4 мм (диаметр). Однопроволочные стальные провода диаметром более 5 мм и однопроволочные биметаллические провода диаметром более $6,5 \text{ мм}$ применять нельзя.

15.3. КОНСТРУКЦИИ ОПОР. ИЗОЛЯТОРЫ СЕТЕЙ 380 / 220 В И ВЫСШЕГО НАПЯЖЕНИЯ

В зависимости от назначения различают пять основных типов опор: промежуточные, анкерные, угловые промежуточные, угловые анкерные, концевые.

Промежуточные опоры служат для поддержания проводов на прямых участках линии. Они не воспринимают усилий, направленных вдоль линии.

Анкерные опоры предназначены для восприятия усилий, направленных вдоль линии. Эти опоры устанавливают в тех точках линии, где по условиям местности пролеты по обе стороны от опоры неодинаковы. Тяжение проводов со стороны большего пролета будет превосходить тяжение проводов со стороны меньшего пролета. Поэтому анкерные опоры выполняют более прочными и жесткими, чем промежуточные.

Угловые промежуточные опоры устанавливают в местах поворота линии. Они воспринимают усилия, направленные по биссектрисе угла поворота линии, вызванные тяжением проводов. В качестве угловых в ряде случаев используются А-образные промежуточные опоры, устанавливаемые своей плоскостью в направлении действия суммарного усилия от тяжения проводов. При различной длине пролетов в обоих направлениях от точки поворота применяют угловую анкерную опору.

Концевые опоры устанавливают при выходе линии с электростанции или подстанции. В нормальных условиях эти опоры воспринимают одностороннее тяжение проводов.

На рисунке 15.3 приведены схемы деревянных опор из цельных стоек для сельскохозяйственных линий напряжением 0,4, 6 и 10 кВ, а на рисунке 15.4 — основные размеры промежуточной и угловой опор линии для совместной подвески проводов напряжением 0,4 и 10 кВ, выполненных на стойках СПВС-2,7.

Линейная изоляция. В нашей стране и за рубежом большое внимание уделяется созданию линейной изоляции из полимерных материалов в виде изоляторов и конструкций линий электропередач из стеклопластиков, способных одновременно выполнять функции механического крепления и электрической изоляции. Разработан ряд конструкций таких опор, две из которых показаны на рисунке 15.5, для линии напряжением 10 и 35 кВ.

Из стеклопластиков изготавливают и легкие распорки, устанавливаемые между проводами в пролетах. Распорки предупреждают

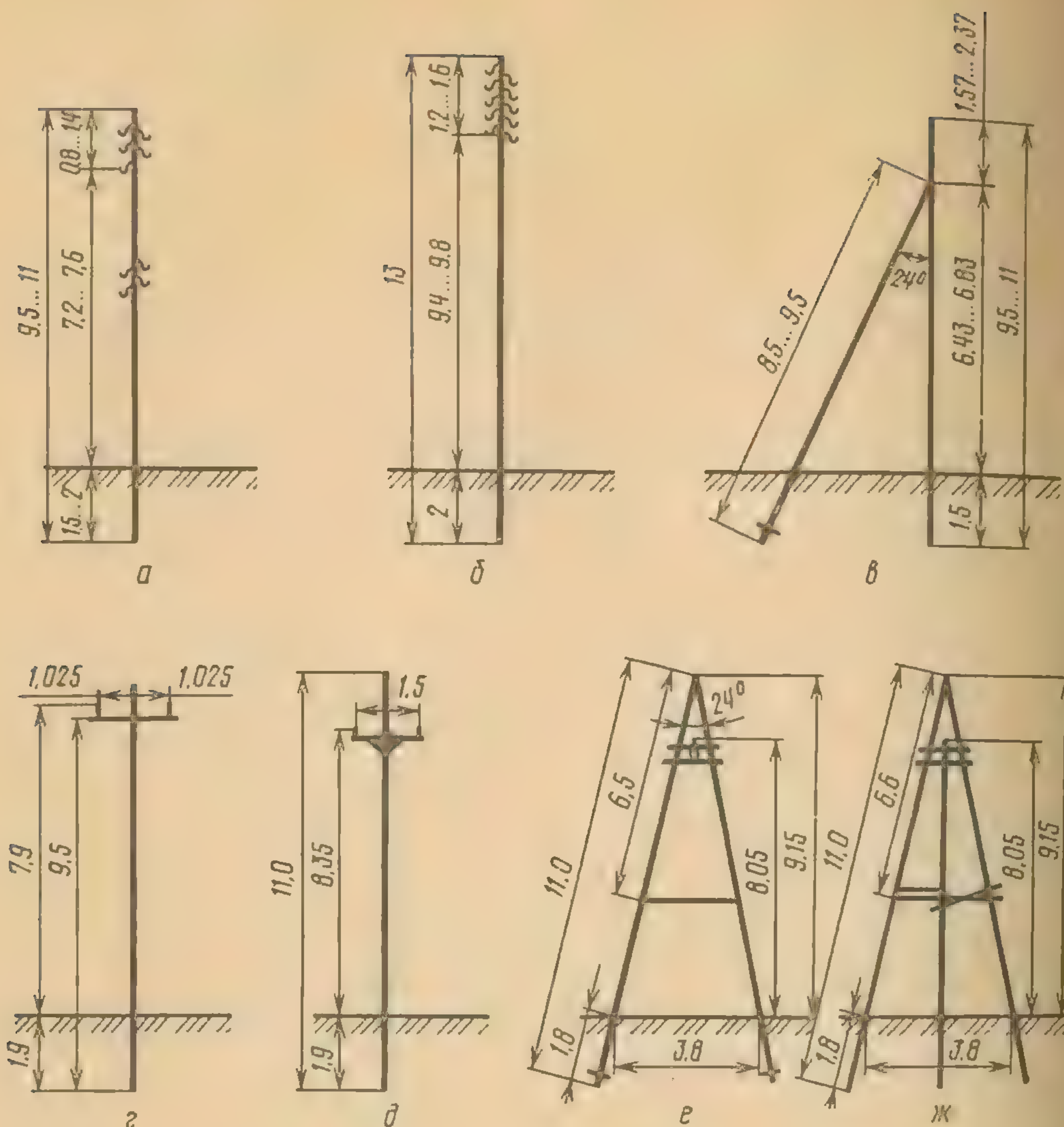


Рис. 15.3. Опоры воздушных линий из цельных стоек:

а, б, в — для линий напряжением 0,4 кВ, соответственно промежуточная, промежуточно-переходная и анкерно-угловая; г, д, е, ж — для линий напряжением 6 и 10 кВ, соответственно с горизонтальным расположением проводов, с треугольным расположением проводов, анкерная, анкерно-угловая.

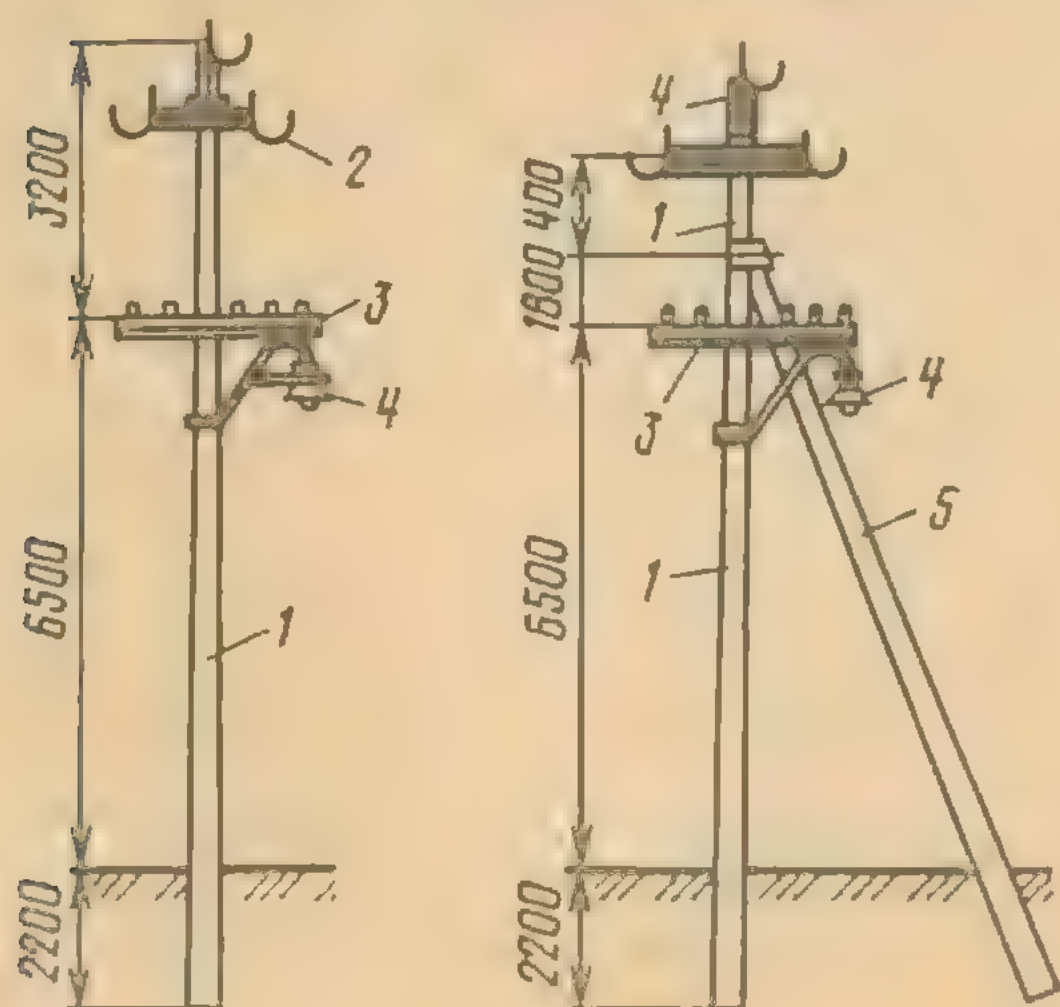
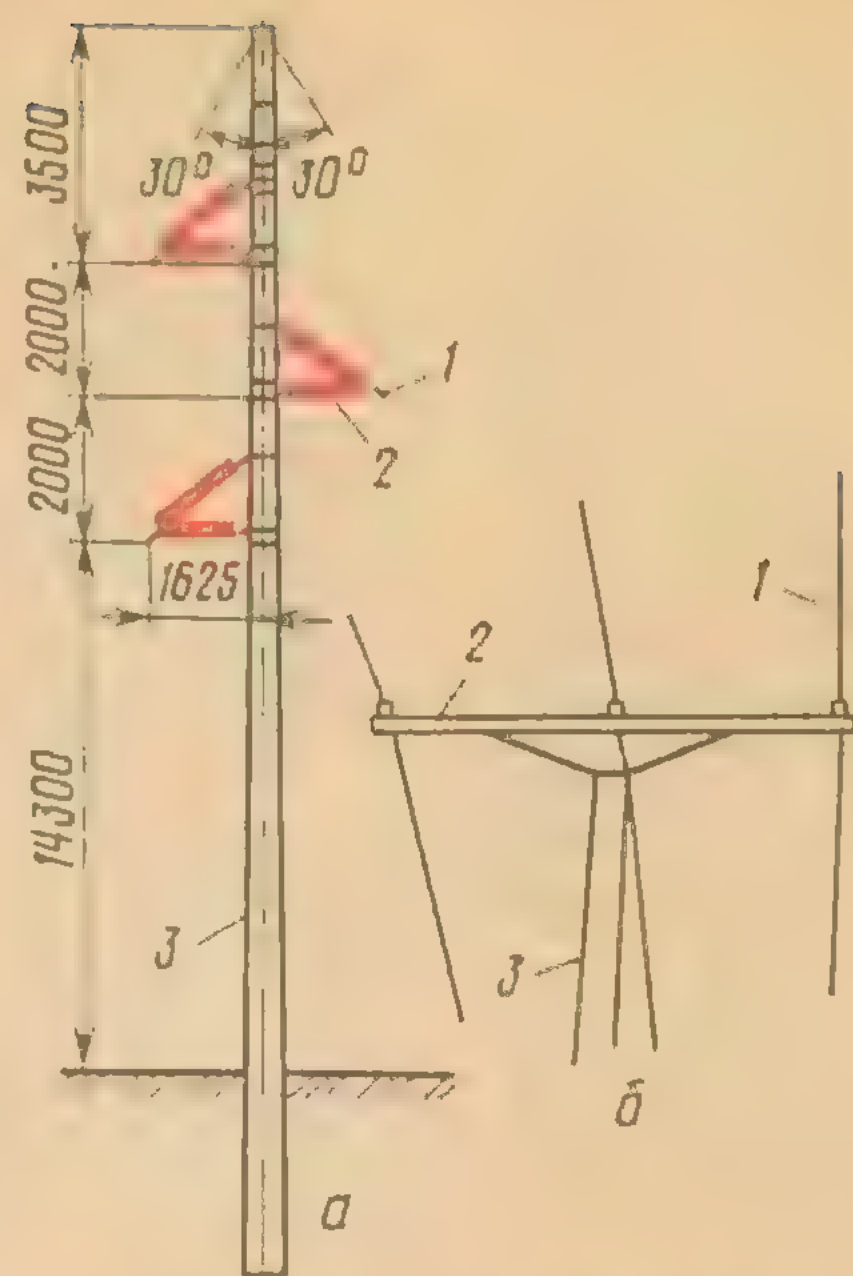


Рис. 15.4. Промежуточная (а) и угловая (б) опоры для совместной подвески проводов воздушной линии напряжением 10 и 0,4 кВ со светильником:

1 — железобетонная стойка; 2 — траверса 10 кВ; 3 — траверса 0,4 кВ; 4 — светильник; 5 — подкос.

15.5. Унифицированная железобетонная опора с стеклопластиковой изоляцией для линии напряжением 35 кВ (а) и опытная опора с траверсой из стеклопластиковой трубы (б):
1 — провод; 2 — стеклопластиковый изолирующий элемент; 3 — железобетонная стойка.



захлестывание проводов при ветрах и позволяют сократить число опор за счет удлинения пролетов.

Деревянные столбы, из которых изготавливают опоры, для защиты древесины от гниения пропитывают антисептиками в заводских условиях, а также на специальных базах по пропитке или на полигонах. Опоры пропитывают в специальных ваннах, заполненных антисептиком, или в автоклавах под давлением. Последний способ лучший, и ему рекомендуется отдавать предпочтение. К антисептикам относятся фтористый натрий, динитрофенол, триолит, уралит и др. В состав антисептических паст, которыми покрывают древесину столбов (вместо пропитки), входят битум, зеленое масло и другие продукты нефти.

При строительстве линий электропередачи на те части опор, которые наиболее подвержены загниванию (места заделки в землю, врубки), наносят слой антисептической пасты. После этого столб обертывают бандажом из толя, пергамента, рубероида и т. п. Бандаж покрывают гидроизоляцией — раствором битума и смол. Срок службы опор, пропитанных антисептиком, составляет более 20 лет.

На строительстве линий широкое применение находят приставки из железобетона (рис. 15.6), которые характеризуются высокой прочностью, долговечностью и сравнительно малой стоимостью. Их изготовление может быть организовано непосредственно на строительных площадках и на специальных полигонах. Выполняют приставки главным образом двутаврового, таврового (Т-образного) и прямоугольного сечений. Для металлического каркаса приставок используют арматурное железо диаметром 8 и 12 см.

Низковольтные железобетонные опоры длиной 9...9,5 м, рассчитанные на подвеску до пяти проводов линии электросети и до четырех проводов радиосети, изготавливают методами вибрации и центрифугирования, целиком или в виде блоков (с последующей сборкой на месте установки).

В линиях напряжением до 35 кВ применяются штыревые изоляторы типов ШЛ-6, ШС-6, ШС-10, ШД-20, ШД-35 и подвесные типов П, ПМ, ПФЕ, ЛС и др., а в районах с загрязненной атмосферой — типов ПР, НС, НЗ. Для внутренней установки предназначены фарфоровые опорные типа ОФ и фарфоровые проходные армированные (обозначение П) изоляторы. Кроме того, выпускает-



Рис. 15.6. Опоры высокого напряжения с железобетонными приставками:

а — промежуточные одностоечные с деревянной и железобетонной приставками и анкерная А-образная с железобетонными приставками для линий напряжением 10 кВ; б — промежуточные и анкерная опоры с железобетонными приставками для линий напряжением 35 кВ.

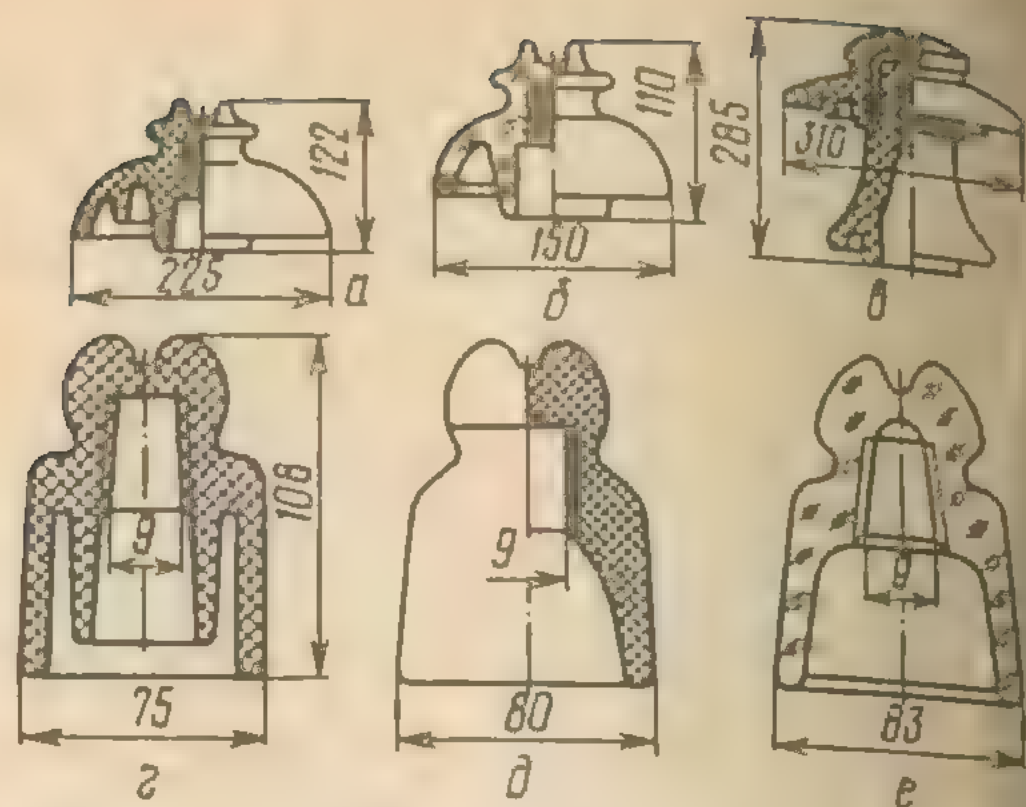


Рис. 15.7. Штыревые изоляторы для линий напряжением 6...35 кВ и линий низкого напряжения:

а — фарфоровый типа ШФ-10 (10 кВ); б — стеклянный сетевой типа ШСС-1 (10 кВ); в — фарфоровый типа ШФ (35 кВ); г, д, е — соответственно типов ШН-1, ШН-1м, ТСМ-2 (до 1000 В).

ся ряд опорно-стержневых (типов СО-35, СТ-35, КО-10) и опорно-штыревых (типов ШН-6, ШН-10, ИШД-10, ИШД-35, ШТ-35) изоляторов.

Для сетей напряжением 380/220 В предназначены фарфоровые изоляторы типов ШН-1 и ШН-1м и стеклянные типа ТСМ-2 (рис. 15.7).

15.4. ТИПЫ ПРОВОДОВ

Для электрических сетей применяют неизолированные алюминиевые, сталеалюминиевые, медные и стальные провода, а для внутренних проводок — изолированные алюминиевые и медные провода.

Медь — хороший проводниковый материал [удельная проводимость $\gamma = 53$ м/(Ом·мм²)], устойчивый против коррозии, но дорогой и дефицитный. Поэтому для линий неизолированные медные провода применяют весьма редко.

Алюминий как проводниковый материал хуже меди [$\gamma = 32...34$ м/(Ом·мм²)]. На открытом воздухе хорошо противостоит коррозии. Алюминиевые провода всегда выполняют многопроволочными, так как однопроволочные не обеспечивают достаточной механической прочности.

В настоящее время заводами кабельной промышленности освоены массовый выпуск неизолированного провода марки АН35, изготавливаемого из алюминиевого сплава АВ-Е. Он рекомендуется к применению вместо провода А35 при проектировании линий 6...10 кВ в I...IV районах по ветру и I и II районах по гололеду.

Сталь (железо) обладает удельной проводимостью, в 7,5 раза меньшей, чем медь, и в 4,5 раза меньшей, чем алюминий: $\gamma = 7$ м/(Ом·мм²). Сталь находит применение в сетях с малой

плотностью нагрузки. Для защиты от быстрого разрушения стальные провода изготавливают оцинкованными (гальваническое покрытие тонким слоем цинка).

В сталеалюминиевых проводах сердечник набран из оцинкованных стальных проволок, увеличивающих общую механическую прочность, вокруг которых навиты алюминиевые провода.

В биметаллических проводах стальная проволока покрыта слоем алюминия или меди (прокатыванием).

Обозначения проводов расшифровываются следующим образом: М — медные, А — алюминиевые, ПС — стальные многопроволочные, ПСО — стальные, однопроволочные, АС — сталеалюминиевые, АКП — провод марки А, в котором межпроволочное пространство, за исключением наружной поверхности, заполнено нейтральной смазкой повышенной термостойкости; АСКС — провод марки АС, в котором межпроволочное пространство стального сердечника заполнено термостойкой смазкой. Эти провода предназначены для установки в районах с агрессивной атмосферой (побережье морей и соленых озер, солончаковых песков и т. п.).

Цифры после букв М, А, ПС, АС — это площадь поперечного сечения провода (мм^2). В однопроволочных стальных проводах цифра указывает диаметр провода (мм).

Изолированные провода изготавливают из мягкой меди и алюминия. В качестве изоляции используют покрытие из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной вулканизированной резиной, поливинилхлоридного пластика и других пластических материалов.

Шнур представляет собой провод, состоящий из двух или более изолированных гибких жил, заключенных в общую оболочку (оплетку или шланг).

Кабель — это одна или несколько скрученных изолированных жил, заключенных в защитную герметическую металлическую (алюминиевую или свинцовую), резиновую или поливинилхлоридную оболочку.

Кабели подразделяют на силовые и контрольные. Силовые кабели, используемые в силовых установках различных напряжений, изготавливают с изоляцией из пропитанной бумаги (в обозначении марки кабеля не указывается) или с резиновой изоляцией (буква Р) с медными или алюминиевыми (А) жилами. Силовые кабели различают по числу и сечению жил, конструкции, типам защитных покровов и номинальному напряжению. Кабели в свинцовой оболочке в обозначении имеют букву С, в алюминиевой — А, в поливинилхлоридной — В, в негорючей маслостойкой найритовой — Н. Оболочка может быть голая (Г) или бронированная (Б) стальными лентами или проволоками.

Одножильные силовые кабели изготавливают с сечением жилы от 2,5 до 800, двухжильные — от 2,5 до 150, трехжильные — от 2,5 до 250, четырехжильные — от 4 до 185 мм^2 .

Контрольные кабели (в обозначении первая или вторая буква К) предназначены для работы в электрических сетях напряжением до 500 В переменного или 1000 В постоянного тока.

Их различают по числу (до нескольких десятков) и площади сечения (не более 10 мм²) токопроводящих жил, конструкции и типам защитных покровов (как и силовые кабели).

Кабель марки ВМВП многожильный с изоляцией и оболочкой из поливинилхлоридного пластика плоский предназначен для монтажа электрооборудования на подвижных механизмах и металло- и деревообрабатывающих станках.

В таблице 15.3 приведены общие технические данные проводов и некоторых кабелей и рекомендации по их применению.

15.3. Изолированные провода для внутренних проводов

Марка провода	Характеристика провода	Число жил	Площадь сечения провода, мм ²	Для сетей напряжением (В) до
<i>Провода с резиновой изоляцией</i>				
АПРТО+ (ПРТО)	Провод с алюминиевой (медной) жилой, с резиновой изоляцией в оплетке из хлопчатобумажной пряжи, пропитанной противогнилостным составом	1 2; 3 7 10; 14	2,5(0,75)...120 2,5(1,0)...120 2,5(1,5)...10 2,5(1,5...2,5)	660
АПРН (ПРН)	Провод с алюминиевой (медной) жилой, с резиновой изоляцией в негорючей резиновой оболочке	1	2,5(1,5)...120	660
ПРГН	То же, с медной гибкой жилой	1	1,5...120	660
АПРИ+ (ПРИ)+	Провод с алюминиевой (медной) жилой, с резиновой изоляцией, обладающей защитными свойствами	1	2,5(0,75)...120	660
ПРГИ+	То же, с медной гибкой жилой	1	0,75...120	660
АППР+	Провод с алюминиевой жилой, с резиновой изоляцией, не распространяющей горение, с разделительным основанием	2; 4	2,5...10,0	660
АПРФ (ПРФ)	Провод с алюминиевой (медной) жилой, с резиновой изоляцией, в фальцованной оболочке из сплава марки АМЦ	1; 2; 3	2,5(1,0...4)	660
ПРФл	Провод с медной жилой, с резиновой изоляцией, в фальцованной оболочке из латуни	1; 2; 3	1...4	660
ПВБЛ	Провод с медной жилой, выводной, с изоляцией из резины на основе бутилкаучука в оплетке из лавсановой нити	1	0,75...120	660
ПВКВ	Провод с медной жилой, выводной, с изоляцией и оболочкой из кремнийорганической резины	1	0,75...120	380; 660
РКГМ	Провод с медной жилой, выводной, с изоляцией из кремнийорганической резины в оплетке из стекловолокна, пропитанной эмалью или термостойким лаком	1	0,75...120	660

Марка провода	Характеристика провода	Число жил	Площадь сечения провода, мм ²	Для сетей напряжением (В) до
ПРД*	Провод с медной жилой, гибкий, с резиновой изоляцией в непропитанной оплетке	2	0,75...6	380
ПРВД	Провод с медной жилой, гибкий, с резиновой изоляцией в поливинилхлоридной оболочке	2	0,75...6	380
ПРКА	Провод с медной жилой, термостойкий, в изоляционно-защитной оболочке из кремнийорганической резины повышенной твердости	1	0,5...2,5	380; 660
<i>Провода с пластмассовой изоляцией</i>				
АПВ*	Провод с алюминиевой жилой, с поливинилхлоридной изоляцией	1	2,5...120	380; 660
ПВ1*	Провод с медной жилой, с поливинилхлоридной изоляцией	1	0,5...95	380; 660
ПВ2*	Провод с медной жилой, гибкий, с поливинилхлоридной изоляцией	1	2,5...95	380; 660
АПВБ (ПВБ)*	Провод с алюминиевой (медной) жилой, с поливинилхлоридной изоляцией, плоский, с разделительным основанием	2; 3	2,5...6 (0,75...4)	380
АПВБС (ПВБС)*	Провод с алюминиевой (медной) жилой, с поливинилхлоридной изоляцией, плоский, без разделительного основания		2,5...6 (0,75...4)	380
<i>Провода разные</i>				
АРТ	Провод с алюминиевой жилой, с резиновой изоляцией, с несущим тросом	2	2,5...4	660
АВТ	Провод с алюминиевой жилой, с изоляцией из поливинилхлоридного пластика, с несущим тросом	2 3 4	2,5...4 2,5...4 2,5...16	380
АВТУ	Провод с алюминиевой жилой, с изоляцией из поливинилхлоридного пластика, с усиленным несущим тросом	2 3 4	2,5...4 2,5...4 2,5...16	380
АВТВ	Провод с алюминиевой жилой, с изоляцией из поливинилхлоридного пластика, с несущим тросом для внутренней прокладки	2 3 4	2,5...4 2,5...4 2,5...16	380
АВТВУ	То же, с усиленным тросом	2 3 4	2,5...4 2,5...4 2,5...16	

Марка провода	Характеристика провода	Число жил	Площадь сечения провода, мм ²	Для сетей напряжением (В) до
ПСУ155	Провод с медной жилой, с изоляцией из эскапоновой стеклолакоткани и дельта-асбеста на основе кремнийорганического лака или оплетки из стеклянных нитей, покрытых лаком с рабочей температурой до 155°С	1	1...95	380
ПСУ180	Провод с медной жилой, с изоляцией из стеклолакоткани на основе кремнийорганических лаков и дельта-асбеста с рабочей температурой до 180°С	1	1...95	380

* Незащищенные провода, имеющие только одну электрическую изоляцию.

15.5. ВЫБОР ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ ПО УСЛОВИЯМ НАГРЕВА

Предельно допустимые температуры нагрева для некоторых типов проводов и кабелей следующие: неизолированные провода — 70° С; изолированные провода в резиновой или поливинилхлоридной изоляции — 55° С; провода в теплостойкой резиновой изоляции — 65° С; кабели с бумажной изоляцией на напряжение до 3 кВ — 80° С; кабели с бумажной изоляцией на напряжение до 6 кВ — 65°С; кабели с бумажной изоляцией на напряжение до 10 кВ — 60° С.

Исходя из этих значений, определяют длительно допустимые токовые нагрузки на провода и кабели. Значения этих нагрузок приведены в таблице 15.4.

15.4. Длительно допустимые токовые нагрузки (токи) на провода и шнуры с резиновой и поливинилхлоридной изоляцией, а также на неизолированные провода воздушных линий

Стандартная площадь сечения провода, мм ²	Длительно допустимые токовые нагрузки (А) на провода						
	медные изолированные		алюминиевые изолированные		неизолированные, проложенные вне помещений		
	открытая проводка	три провода в трубе	открытая проводка	три провода в трубе	медные марки М	алюминиевые марки А	стальные марки ПС
0,5	11	—	—	—	—	—	—
0,75	15	—	—	—	—	—	—
1,0	17	15	—	—	—	—	—

Стандартная площадь сечения провода, мм ²	Длительно допустимые токовые нагрузки (А) на провода						
	медные изолированные		алюминиевые изолированные		неизолированные, проложенные вне помещений		
	открытая проводка	три провода в трубе	открытая проводка	три провода в трубе	медные марки М	алюминиевые марки А	стальные марки ПС
1,5	23	17	—	—	—	—	—
2,5	30	24	24	19	—	—	—
4,0	41	35	32	28	50	—	—
6,0	50	42	39	32	70	—	—
10,0	80	60	55	47	95	—	—
16,0	100	80	80	60	130	105	—
25,0	140	100	105	80	180	135	60
35,0	170	125	130	95	220	170	75
50,0	215	170	165	130	270	215	90
70,0	270	210	210	165	340	265	125
95,0	330	225	225	200	415	320	135
120,0	385	290	295	220	485	375	—

15.6. РАСЧЕТ ПРОВОДОВ НА ПОТЕРЮ НАПРЯЖЕНИЯ

Показателями качества электроэнергии у потребителя являются отклонения напряжения и частоты от их номинальных значений, колебания напряжения и частоты, несинусоидальность формы кривой напряжения. Для трехфазных сетей к показателям качества относятся также смещение нейтрали и несимметрия напряжения основной частоты (п.п. 7.7, 7.8).

Колебания напряжения — это быстро протекающие кратковременные изменения напряжения в тех случаях, когда скорость его изменения не менее 1% в секунду. Они возникают при работе приемников электроэнергии с резкопеременной ударной нагрузкой, а также при пуске электродвигателей.

Отклонения напряжения — это медленно протекающие изменения напряжения со скоростью меньше 1% в секунду.

ГОСТ 13109—67 устанавливает следующие допустимые отклонения напряжения. На зажимах приборов рабочего освещения, установленных в производственных помещениях и общественных зданиях, где требуется значительное зрительное напряжение, а также в прожекторных установках наружного освещения допускаются отклонения напряжения в пределах от -2,5 до +5% номинального.

На зажимах электродвигателей и аппаратов для их пуска и управления допускаются отклонения напряжения в пределах от -5 до +10% номинального. На зажимах остальных приемников электрической энергии, в том числе на животноводческих комплексах и птицефабриках, допускаются отклонения напряжения $\pm 5\%$ номи-

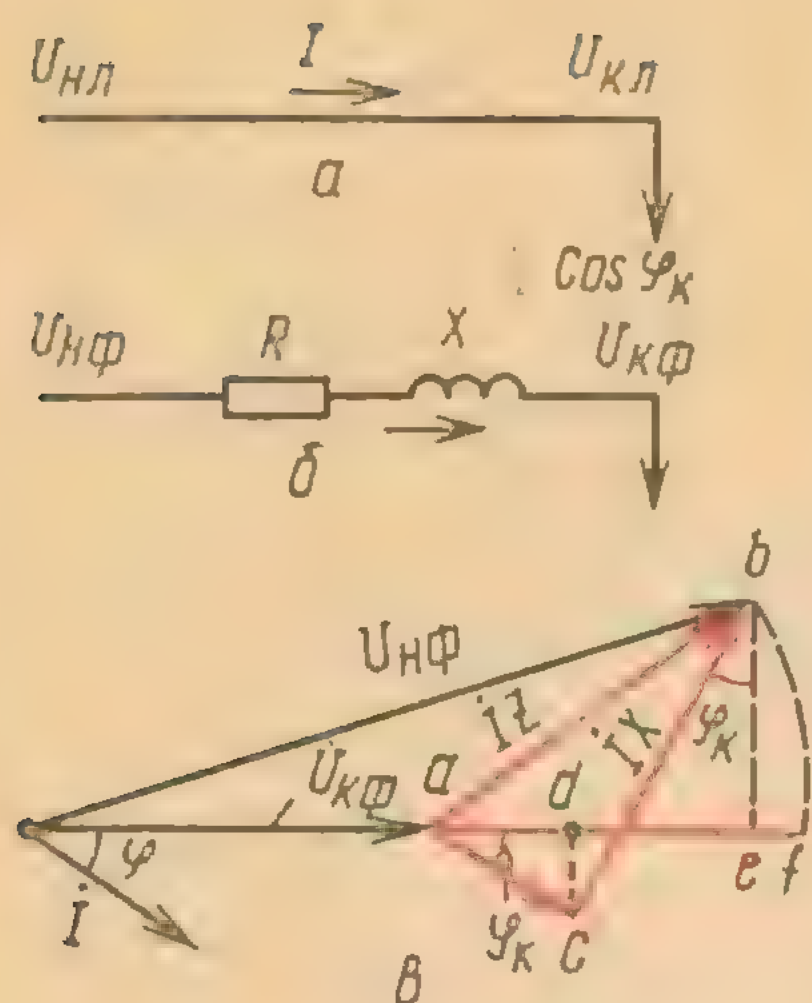


Рис. 15.8. К расчету проводов на потерю напряжения: а — расчетная схема линии с нагрузкой на конце; б — схема замещения одной из фаз; в — векторная диаграмма напряжений.

нального. В послеаварийных режимах допускается дополнительное понижение напряжения на 5 %.

В электрических сетях сельскохозяйственных районов, кроме животноводческих комплексов и птицефабрик, при наличии специальных технико-экономических обоснований, с разрешения Минэнерго СССР допускаются другие значения отклонений напряжения (см. стр. 219 и 226).

Отклонение напряжения как в сторону понижения, так и в сторону повышения приводит к ухудшению работы электрооборудования, преждевременному его износу и выходу из строя.

Для иллюстрации отклонения напряжения и аналитического его выражения рассмотрим нагрузку трехфазной сети (рис. 15.8, а). Для схемы замещения одной из фаз (рис. 15.8, б) построим векторную диаграмму (рис. 15.8, в), по которой найдем разницу между фазным напряжением в конце линии $U_{кф}$ и в начале $U_{нф}$. Из векторной диаграммы можно определить геометрическую разность векторов напряжений:

$$ab = IZ,$$

где I — ток нагрузки в фазе, А; $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ — полное сопротивление линии, Ом; $R = r_0 l$ — активное сопротивление линии, Ом; r_0 — удельное активное сопротивление провода линии, Ом/км; l — длина линии, км; $X = x_0 l$ — индуктивное сопротивление линии, Ом; x_0 — удельное индуктивное сопротивление провода линии, Ом/км.

Отрезок ab , представляющий собой геометрическую разность векторов напряжений в начале и в конце линии, выражает *падение напряжения*. Алгебраическая разность векторов напряжений, соответствующая отрезку $af = U_{нф} - U_{кф}$, называется *потерей напряжения*. При расчете проводов учитывают не падение напряжения, а потерю напряжения, поскольку работа токоприемников зависит от абсолютного значения подводимого к ним напряжения.

Для облегчения теоретических расчетов пренебрегают значением потери напряжения, приходящимся на отрезок ef , и принимают его равным отрезку ae :

$$ae = ad + de = ac \cos \varphi_k + cb \sin \varphi_k, \text{ но } ac = IR, \text{ а } cb = IX,$$

тогда потери напряжения ΔU_ϕ в фазе (отрезок ae) в окончательном виде

$$\Delta U_\phi = I (R \cos \varphi_k + X \sin \varphi_k). \quad (15.1)$$

Потеря напряжения между двумя фазами (линейная)

$$\Delta U_{\text{л}} = \sqrt{3} \Delta U_{\phi} = \sqrt{3} (IR \cos \varphi_k + IX \sin \varphi_k). \quad (15.4)$$

умножив и поделив правую часть полученной формулы на $U_{\text{к.л.}}$ (конечное линейное), получим:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} IU_{\text{к.л.}} \cos \varphi_k R + \sqrt{3} IU_{\text{к.л.}} \sin \varphi_k X}{U_{\text{к.л.}}} = \frac{PR + QX}{U_{\text{к.л.}}}, \quad (15.5)$$

где P — активная мощность нагрузки, Вт; Q — реактивная мощность, вар; $U_{\text{к.л.}}$ — линейное напряжение в конце линии, В.

С достаточной точностью вместо неизвестного $U_{\text{к.л.}}$ допустимо брать номинальное линейное напряжение. В практических расчетах индуктивное сопротивление кабельных линий можно принимать равным 0,07...0,08 Ом/км, воздушных при напряжении выше 1000 В — 0,4 Ом/км, а при напряжении до 1000 В — 0,3 Ом/км.

Действующими нормами установлено, что в сельских электрических сетях напряжение на зажимах токоприемников не должно повышаться больше чем на +7,5% и снижаться больше чем на -7,5% номинального напряжения сети. Электрическую сеть проектируют таким образом, чтобы отклонения напряжения при максимальной нагрузке не превосходили -7,5%, а при минимальной нагрузке, которую считают равной 0,25 максимальной, не превосходили +7,5%. Если известна действительная минимальная нагрузка, то принимают ее значение.

Источником питания, задающим исходное значение напряжения, является генератор на электростанции или мощная подстанция с регулированием напряжения. Между источником питания и токоприемником расположен ряд элементов сети, на которых теряется напряжение. Поэтому перед расчетом воздушных линий составляют приближенные таблицы отклонения напряжений для всех элементов сети, начиная от источника электроснабжения и кончая потребителем.

Ниже приведены два примера составления расчетных таблиц отклонения напряжения.

Пример 15.1. Электрическая станция работает на сеть напряжением 380/220 В (рис. 15.9). Генератор станции может действовать в режиме стабильного напряжения, когда независимо от нагрузки напряжение на его зажимах поддерживается на +5% выше номинального. На маломощных станциях, работающих изолированно, широко применяется также встречное регулирование напряжения, когда с увеличением нагрузки напряжение на зажимах генератора повышают до +10% сверх номинального при максимальной нагрузке и снижают до номинального значения (отклонение напряжения равно 0%) при минимальной нагрузке.

Составим таблицы для двух случаев: напряжение генератора $U_{\text{н}} + 5\% U_{\text{н}}$ постоянное, а для встречного регулирования принимаем при полной нагрузке $U_{\text{н}} + 7,5\% U_{\text{н}}$ и при минимальной $U_{\text{н}} + 0\%$. Отклонение напряжения у потребителя (табл. 15.5) не должно выходить за рамки -7,5% и +7,5%. Тогда расчетные потери напряжения в сети 380 В могут быть приняты как разность между допустимым отклонением напряжения у потребителя и отклонением напряжения генератора: -7,5% - (+5%) = -12,5% в первом случае и -7,5% - (+7,5%) = -15% во втором.

Таким образом, при расчете низковольтной сети для распределения энергии от

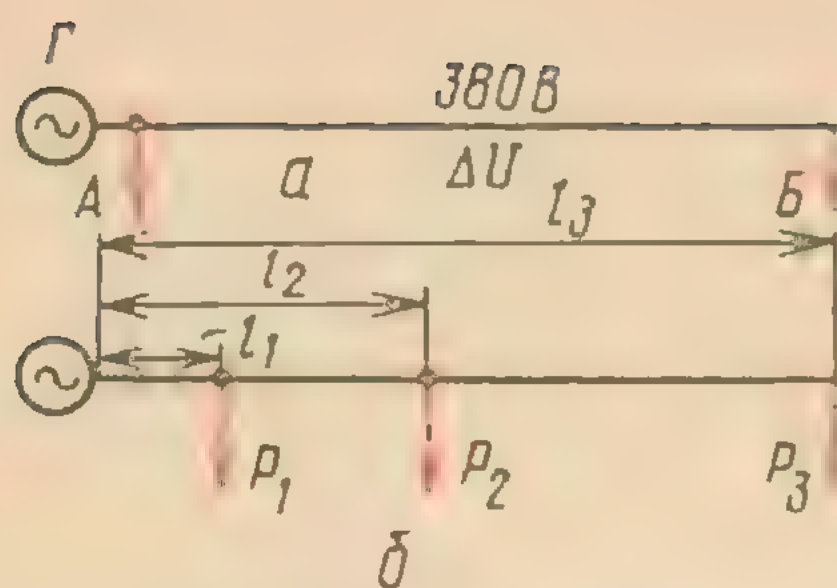


Рис. 15.9. К расчету сети напряжением 380/220 В небольшой электростанции:
а — сосредоточенная нагрузка; б — неравномерно распределенная нагрузка.

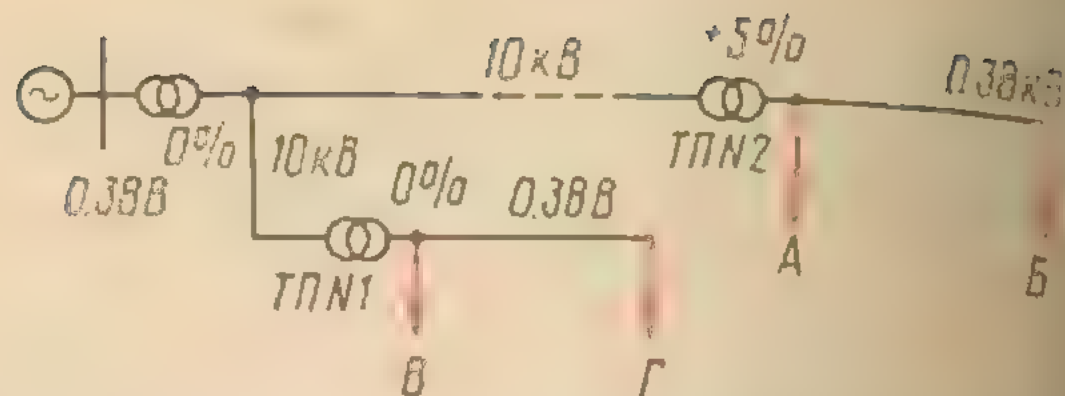


Рис. 15.10. К таблице отклонений напряжения при нескольких ступенях напряжения.

электростанции до самого дальнего потребителя (в точке В) принимаем потерю напряжения в линии в первом случае — 12,5%, а во втором (встречное регулирование) — 15%, то есть сеть во втором случае обойдется дешевле (потребуется провод меньшего сечения).

Из таблицы отклонений напряжения видно, что наиболее тяжелые условия у самого дальнего потребителя при максимальной нагрузке в сети: вместо 380 В стандартных он получит $380 - 7,5\% U_H \approx 352$ В. В то же время близко расположенные потребители будут страдать от избытка напряжения в $220 + 7,5\% U_H \approx 237$ В.

Пример 15.2. Между генератором электрической станции (рис. 15.10) и потребителем расположены два трансформатора и сеть высокого напряжения. Прежде чем составить таблицу отклонения напряжений, рассмотрим, как влияет трансформатор на отклонение напряжения в схеме.

15.5. Таблица отклонений напряжения

Элементы сети	Отклонение напряжения сети (%), если напряжение на генераторе							
	стабильное: $U_H + 5\%U_H$				при встречном регулировании:			
	потребитель в точке А		потребитель в точке В		потребитель в точке А		потребитель в точке В	
	при нагрузке, %							
	100	25	100	25	100	25	100	25
Генератор	+5	+5	+5	+5	+7,5	+0	+7,5	+0
Сеть 380 В	0	0	-12,5	-3,1	0	0	-15	-3,25
Потребитель	+5	+5	$(+5-12,5) = -7,5$	$(+5-3,1) = -+1,9$	+7,5	0	-7,5	0

Как было сказано выше (гл. 11), трансформаторы понижительных потребительских подстанций со стороны высокого напряжения имеют отпайки, позволяющие менять число витков первичной обмотки, а следовательно, и коэффициент трансформации в пределах $\pm 5\%$. Со стороны низшего напряжения получают 400 В, то есть $380 + 5\%U_H$. У трансформатора 6/0,4 кВ следующие отпайки с высокой стороны: 5700 В (надбавка напряжения $+5\%$), 6000 В ($\pm 0\%$), 6300 В (-5%), а у трансформатора 10/0,4 кВ соответственно 9500 В, 10 000 В, 10 500 В. Таким образом, суммарную надбавку напряжения, учитывая высшее и низшее напряжения обмотки, можно получить в пределах, указанных в таблице 15.6.

15.6. Надбавки напряжения в трансформаторах

Трансформатор на 10 кВ				Трансформатор на 6 кВ			
напряжение на первичной обмотке, В	надбавка высшего напряжения, %	надбавка низшего напряжения, %	итого, %	напряжение на первичной обмотке, В	надбавка высшего напряжения, %	надбавка низшего напряжения, %	итого, %
9 500	-5	+5	0	5700	-5	+5	0
10 000	0	+5	+5	6000	0	+5	+5
10 500	+5	+5	+10	6300	+5	+5	+10

Представим теперь, что понижающий трансформатор используется в качестве повышающего и со стороны низшего напряжения к обмотке подведено напряжение 380 В ($400 - 5\% U_n$). Чтобы получить со стороны высокого напряжения стандартные 10 000 и 6000 В, необходимо использовать надбавки +5%.

При составлении таблиц отклонения напряжения потери напряжения в трансформаторах принимают равными 4...5%, при нагрузке 100% и 1...1,25% при нагрузке 25%.

Если высоковольтная линия уже имеется, то потери напряжения в ней могут быть определены по формулам для трехфазной сети, которые приведены ниже.

Составляем таблицы отклонений напряжения в элементах сети (табл. 15.7 и 15.8). Методом подбора отпаяк у трансформаторов выбираем наиболее целесообразный режим работы. Затем из таблицы находим потери напряжения, на которые следует рассчитывать сеть 380/220 В.

15.7. Таблица отклонений напряжения для сети 380 / 220 В понижительной подстанции ТП № 1

Элементы линии электропередачи от электростанции до потребителя	Отклонения напряжения (%) при нагрузке	
	для дальнего потребителя (в точке I) 100%	для ближнего потребителя (в точке B) 25%
Генератор (принимаем, как установлено на электростанции)	+5%	+5%
Трансформатор повысительной подстанции 0,38 / 10 кВ (как установлено на подстанции)	0	0
Потери напряжения в повышающем трансформаторе (принимаем в соответствии с вышеизложенным)	-5%	-1,25%
Потери напряжения в высоковольтной сети подсчитываем. Предположим, они равны	-2%	-0,5%
Надбавки в понижающем трансформаторе выбираем таким образом, чтобы напряжение у потребителя не выходило за пределы -7,5...+7,5%	+5%	+5%
Потери напряжения в трансформаторе 10/0,4 кВ	-5%	-1,25%
Потери в сети 380/220 В выбираем такими, чтобы суммарное напряжение у потребителя было $U_n \pm 7,5\%$	-5,5%	0
Отклонения напряжения у потребителя	-7,5%	+7,0%

Примечание. Если взять надбавки напряжения +10%, то у ближайшего потребителя при нагрузке 25% напряжение будет равно +112% — это недопустимо.

15.8. Таблица отклонений напряжения для сети 380 / 220 В от понижительной подстанции ТП № 2

Элементы линии электропередачи от электростанции до потребителя	Отклонения напряжения (%) при нагрузке	
	100% в точке А	25% в точке Б
Генератор	+5%	+5%
Повысительный трансформатор:		
надбавки	0	0
потери	-5%	-1,25%
Сеть 10 кВ (рассчитываем так: предположим, что она длиннее, чем до подстанции № 1 в 2 раза и выполнена проводом с той же площадью сечения)	-4%	-1%
Понижительный трансформатор:		
надбавки	+5%	+5%
потери	-5%	-1,25%
Сеть 380/220 В	-3,5%	0
Отклонения напряжения у потребителя	-7,5%	+6,5%

Таким образом, расчет сети 380/220 В ведем на потерю напряжения (до самого дальнего потребителя) — 5,5%. При этом для внутренних проводок рекомендуется всегда иметь запас 0,3...0,5%. Тогда наружные воздушные сети 380/220 В следует рассчитывать исходя из потерь в них, равных 5,0...5,2%.

Для ТП № 2 сеть 380/220 В необходимо рассчитывать всего на 3% потери напряжения от подстанции до дальнего потребителя. Сеть может получиться очень тяжелой. Выход здесь — в выборе для линии высокого напряжения провода с большей площадью сечения или использовании трансформаторов с регулированием напряжения под нагрузкой.

15.7. ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ВЫБОРА ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ПРОВОДОВ

Выбор площади сечения проводов по потере напряжения. В общем виде уравнение для определения потери напряжения в проводах линии было приведено выше (15.3):

$$\Delta U = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + X \sin \varphi).$$

В сети напряжением 380/220 В индуктивное сопротивление весьма мало, и значением произведения $X \sin \varphi$ можно пренебречь.

Тогда равенство (15.3) с учетом, что $R = \frac{l}{\gamma S}$, будет выглядеть так:

$$\Delta U = \sqrt{3} I \frac{l}{\gamma S} \cos \varphi. \tag{15.4}$$

Умножив и поделив на U числитель и знаменатель, получим:

$$\Delta U = \frac{\sqrt{3} U I \cos \varphi l}{\gamma U S} = \frac{P l}{\gamma U S}. \tag{15.5}$$

формулу (15.7) можно переписать относительно площади поперечного сечения провода S так:

$$S = \frac{Pl}{\gamma U \Delta U}, \quad (15.8)$$

где P — мощность нагрузки, Вт; l — длина линии, м; γ — проводимость материала проводника; U — номинальное линейное напряжение сети, В; ΔU — потеря напряжения в сети [из формулы (15.7) получается расчетная, а в формулу (15.8) подставляется допустимая].

Формулы (15.7) и (15.8) справедливы для трехфазной нагрузки, приложенной на конце линии. Нулевой провод выбирают меньшим на одно стандартное сечение, чем сечение фазных проводов. Ниже приводятся формулы для других схем сетей до 1000 В.

Площадь сечения двухфазного трехпроводного ответвления от трехфазной сети (2 фазы + 0)

$$S = \frac{2,25Pl}{\gamma \Delta U U}. \quad (15.9)$$

Площадь сечения однофазного ответвления от трехфазной линии (1 фаза + 0)

$$S = \frac{2Pl}{\gamma \Delta U U}. \quad (15.10)$$

Приведенные формулы справедливы для проводов из меди и алюминия, индуктивным сопротивлением которых в линиях напряжением до 1000 В можно пренебречь.

Пример 15.3. Выбрать площадь сечения алюминиевых проводов для трехфазной линии напряжением 380/220 В, если длина линии $l = 500$ м, а нагрузка $P = 10$ кВт.

Решение. Из таблицы допустимых отклонений напряжения находим $\Delta U = -5\%$ (то есть 20 В).

Из формулы (15.8)

$$S = \frac{10\,000 \cdot 500}{32 \cdot 380 \cdot 20} = 20,5 \text{ мм}^2.$$

Принимаем провод марки А25. Тогда истинная потеря напряжения

$$\Delta U = \frac{10\,000 \cdot 500}{380 \cdot 32 \cdot 25} = 16 \text{ В}.$$

В качестве нулевого провода выбираем А16.

Пример 15.4. Выбрать алюминиевый провод для трехфазной линии напряжением 380/220 В с рассредоточенной нагрузкой (рис. 15.9, б), если известно, что допустимая потеря напряжения — 7% (из таблицы отклонений напряжения) и что $l_1 = 100$ м, $P_1 = 20$ кВт, $l_2 = 250$ м, $P_2 = 10$ кВт, $l_3 = 400$ м, $P_3 = 10$ кВт.

Решение. В нашем случае равенство (15.10) примет вид:

$$S = \frac{\sum P_i l_i}{\gamma \Delta U U}. \quad (15.11)$$

Отсюда

$$S = \frac{20\,000 \cdot 100 + 10\,000 \cdot 250 + 10\,000 \cdot 400}{32 \cdot 0,07 \cdot 380^2} = \frac{(200 + 250 + 400) \cdot 10^4}{32 \cdot 0,07 \cdot 380^2} = 26,3 \text{ мм}^2.$$

Выбираем провод марки А35.

Выбор площади сечения проводов и кабелей по экономической плотности тока. Экономическая плотность тока для разных проводов и кабелей, с учетом их конструкции, материала, числа часов использования максимальной нагрузки приводится в «Правилах устройства электроустановок».

Экономическая плотность тока для данной площади сечения проводника — это такая плотность, при которой расходы на провода и на потери энергии в них минимальны. Для алюминиевых проводов экономическая плотность тока лежит в пределах от 0,8 до 1,2 А/мм².

Площадь сечения провода на участке определяют по формуле

$$S_{\text{эк}} = I / j_{\text{эк}},$$

где I — наибольший ток на участке линии А; $j_{\text{эк}}$ — экономическая плотность тока, А/мм².

Выбирают провод ближайшей большей стандартной площади сечения. Если максимальная нагрузка приходится на ночное время, то экономическую плотность тока рекомендуется увеличить на 40%. Для проводов с площадью сечения 16 мм² и менее также следует увеличить экономическую плотность на 40%.

Выбор площади сечения жил кабелей по стойкости к токам короткого замыкания. Для этого необходимо знать установившийся ток короткого замыкания, а также расчетное время его действия $t_{\text{п}}$ (с учетом времени срабатывания защиты). Это время определяют по справочникам. Площадь сечения кабеля определяют по формуле

$$S_{\text{расч}} = \alpha I_{\infty} \sqrt{t_{\text{п}}},$$

где α — расчетный коэффициент, зависящий от допустимой температуры t жил кабелей: для медных жил при напряжении до 10 кВ $\alpha = 7$ при $t = 250^{\circ}\text{C}$, для алюминиевых $\alpha = 12$ при $t = 250^{\circ}\text{C}$.

При выборе площади сечения жил кабеля по стойкости к токам короткого замыкания следует брать ближайшую меньшую площадь, а не большую. Если кабели защищены предохранителями с плавкими вставками, то на стойкость токам короткого замыкания их не проверяют, так как время срабатывания предохранителя мало (около 0,008 с) и кабель не успевает нагреться до опасной температуры.

Выбор площади сечения проводников по условию соответствия току установки защитного аппарата. Допустимый ток проводника с резиновой изоляцией ($t_{\text{доп}} = 65^{\circ}\text{C}$) в пожароопасных и взрывоопасных помещениях, а также для осветительных сетей жилых и общественных зданий, торговых помещений, служебно-бытовых помещений промышленных предприятий и сетей, защищаемых плавкими вставками предохранителей или мгновенно действующими электромагнитными расцепителями автоматов.

$$I_{\text{доп}} \geq 1,25 I_{\text{в}} \text{ или } I_{\text{доп}} \geq 1,25 I_{\text{ср.в.}}$$

Для всех других помещений, а также для жил кабелей с бумажной изоляцией, независимо от типа помещения

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{в}} \text{ или } I_{\text{доп}} \geq I_{\text{ср.э}},$$

где $I_{\text{в}}$ — номинальный ток плавкой вставки; $I_{\text{ср.э}}$ — ток срабатывания электромагнитного расцепителя.

Для ответвлений к электродвигателям в невзрывоопасных помещениях

$$I_{\text{доп}} \geq I_{\text{н.дэ}}.$$

Площадь сечения проводника принимают по таблицам: ближайшую большую площадь или ближайшую меньшую, если окружающие условия более благоприятные, нежели расчетные, которые были приняты при составлении таблиц.

Особенности расчета стальных проводов. Сталь — магнитный материал, и поэтому стальные провода обладают большой внутренней индуктивностью. Активное сопротивление стальных проводов меняется в зависимости от силы протекающего в них тока. С увеличением тока оно значительно возрастает, так как повышаются потери на гистерезис, а также за счет поверхностного эффекта.

Значение сопротивления стального провода в зависимости от силы протекающего в проводе тока дается в справочниках. Методы расчета стальных проводов сложны, поэтому такие провода следует выбирать по таблицам или специальным номограммам.

На рисунке 15.11 приведена номограмма для определения потерь напряжения в трехфазных воздушных линиях переменного тока напряжением 10 кВ. Пользуются номограммой следующим образом. Допустим, необходимо определить потери напряжения в линии длиной 8 км, выполненной проводом ПСО4, если мощность P , которую следует передать, составляет 30 кВт, а $\cos \varphi$ потребителя равен 0,8. В данном случае полная мощность $S = P / \cos \varphi = 30 / 0,8 = 37,5$ кВт·А. На шкале P находим точку, соответствующую мощности 30 кВт. Проводим по вертикали линию до пересечения с линией заданного $\cos \varphi$. От точки пересечения проводим горизонтальную линию до пересечения с кривой в правом верхнем углу, соответствующей проводу ПСО4. Из точки пересечения с этой кривой опускаем вертикальную линию до пересечения с прямой, соответствующей заданной длине высоковольтной линии — 8 км, и из точки пересечения с ней проводим горизонталь влево, до шкалы $\Delta U\%$, по которой и записываем ответ: около 4%. Ход действий показан на номограмме пунктирной линией со стрелками.

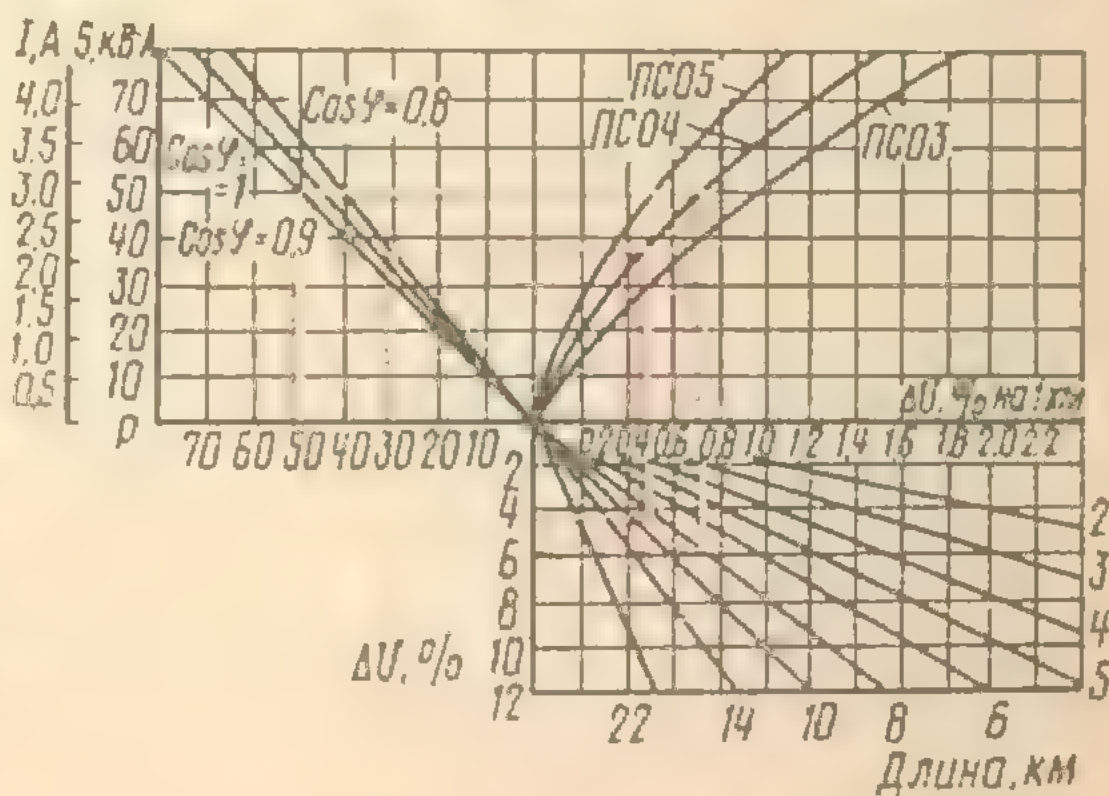


Рис. 15.11. Номограмма для определения потерь напряжения в трехфазной линии напряжением 10 кВ.

Можно решать задачу по номограмме в обратном порядке. Предположим, допустимые потери напряжений равны 6%, расстояние — 8 км, линия выполнена проводом ПСО4. Требуется определить, какую мощность можно передать на данное расстояние по линии, не превышая принятые потери напряжения 6%.

Последовательность решения показана пунктирной линией, которая начинается со шкалы $\Delta U\%$ и заканчивается на шкале S на значении 50 кВ·А, то есть при заданных условиях передаваемая мощность не должна превышать 50 кВ·А.

В справочниках приводятся номограммы и для других мощностей, проводов и расстояний.

15.8. ПРОВЕРКА СЕТИ НА КОЛЕБАНИЯ НАПЯЖЕНИЯ ПРИ ПУСКЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Нормами (СН 357—77) определены следующие допускаемые отклонения напряжения (в % от U_n) на зажимах электродвигателей:

- а) при длительной работе в установившемся режиме $\pm 5\%$;
- б) у электродвигателей, присоединенных к электрическим сетям общего назначения $-5\% +10\%$;
- в) при длительной работе в установившемся режиме для отдельных особо удаленных электродвигателей в номинальных условиях допускается снижение напряжения на 8...10%, в аварийных — 10...12%;
- г) при кратковременной работе в установившемся режиме (например, во время пуска соседнего большего электродвигателя) — 20..30%;
- д) на зажимах пускаемого электродвигателя при частых пусках — 10%, при редких — 15%.

В тех случаях, когда начальный момент рабочей машины не превышает $1/3$ номинального момента электродвигателя, допускается отклонение напряжения от номинального на 40%. Это, как правило, приводы с ременной передачей, приводы насосов и вентиляторов.

Потеря напряжения в сети при пуске электродвигателя от трансформатора или генератора приближенно* составляет

$$\Delta U\% \approx \frac{Z_c}{Z_c + Z_{\Sigma}} 100, \quad (15.12)$$

где Z_c — полное сопротивление сети, Ом; $Z_{\Sigma} = \frac{U_n}{\sqrt{3} k I_n}$ — полное сопротивление короткого замыкания асинхронного электродвигателя, Ом; U_n — номинальное напряжение электродвигателя, В; k — кратность пускового тока электродвигателя; I_n — номинальный ток электродвигателя, А.

При пуске электродвигателя от сети с трансформатором

$$Z_c \approx Z_{\Sigma} + Z_{\text{тр}}, \quad (15.13)$$

где Z_{Σ} — полное сопротивление линии, Ом; $Z_{\text{тр}} = \frac{e_n\% U_n}{100 \sqrt{3} I}$ — полное сопротивление короткого замыкания трансформатора, Ом; e_n — напряжение короткого замыкания трансформатора, %.

* Точное значение потери напряжения эта формула даст в случае, если $R_c \ll X_c$ и $R_{\Sigma} \ll X_{\Sigma}$, где R_c и R_{Σ} — активное сопротивление соответственно сети и двигателя.

где U_n и I_n — соответственно номинальные значения напряжения (В) и тока (А) трансформатора.

Полное сопротивление линии может быть рассчитано по значениям удельных сопротивлений проводов, которые приведены ниже.

Марка провода	M10	M16	M25	A16	A25	A35
Удельное сопротивление провода, Ом/км	1,88	1,27	0,84	1,8	1,14	0,83
Марка провода	A50	A70	ПСО5	ПСО25	ПСО35	ПСО50
Удельное сопротивление провода, Ом/км	0,64	0,46	12	6,7	5,4	3,9

Значения полных сопротивлений короткого замыкания некоторых трансформаторов, приведенные к напряжению 380 В, даны ниже.

Мощность трансформатора, кВ·А	10	25	40	63	100
Полное сопротивление короткого замыкания трансформатора, Ом	0,8	0,2	0,2	0,1	0,07

При пуске электродвигателя от сети с синхронным генератором полное сопротивление сети

$$Z_c \approx Z_g + Z_r, \quad (15.14)$$

где $Z_g = \frac{U_n}{\sqrt{3} I_n O.K.З.}$ — полное сопротивление генератора, Ом; U_n — номинальное напряжение генератора, В; I_n — номинальный ток генератора, А; О.К.З. — отношение короткого замыкания генератора (указано в паспорте к генератору).

Для генераторов серии СГ напряжением 400 В значения полных сопротивлений приведены ниже.

Мощность генератора, кВ·А . . .	15	25	35	45	60
Полное сопротивление генератора, Ом	9,4	5,75	5,15	4,0	3,15

Пример 15.5. Определить колебание напряжения при пуске электрического двигателя мощностью 10 кВт и напряжением 380 В, присоединенного к трансформатору мощностью 25 кВ·А линией длиной 1 км, которая выполнена проводом А25.

Решение. Полное сопротивление короткого замыкания электродвигателя и ток составляют

$$Z_{\Sigma} = \frac{U_n}{\sqrt{3} k I_n} = \frac{380}{\sqrt{3} \cdot 5 \cdot 19,9} = 2,2 \text{ Ом.}$$

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi \eta} = \frac{10}{\sqrt{3} \cdot 0,38 \cdot 0,88 \cdot 0,87} = 19,9 \text{ А,}$$

где значения k , KIC , $\cos \varphi$ взяты из каталожных данных на электродвигатели.

Сопротивление трансформатора и сопротивление линии для провода А25 принимаем по справочным таблицам: $Z_{tr} = 0,3 \text{ Ом}$; $Z_l = 1,14 \text{ Ом/км}$.

Потеря напряжения

$$\Delta U \% = \frac{Z_c}{Z + Z_n} 100 = \frac{1,14 + 0,3}{1,14 + 0,3 + 2,2} 100 = 39,5 \% ,$$

что находится в допустимых пределах.

Если принять провод А35, удельное сопротивление которого 0,83 Ом/км, то отклонение напряжения на зажимах электродвигателя

$$\Delta U \% = \frac{0,83 + 0,3}{0,83 + 0,3 + 2,2} 100 = 34 \% ,$$

что лучше, так как имеется запас по сечению.

Нормы (СН 357—77) допускают снижение напряжения для работающих двигателей во время пуска соседнего большого двигателя на 20...30%. Исключение составляют лишь те относительно редкие случаи привода механизмов с ударной нагрузкой, для которых двигатели выбраны по значению необходимого максимального момента, а не по условиям нагрева. Тогда допустимое снижение напряжения определяется расчетом с учетом изменения моментов на валу двигателей.

Контрольные вопросы и задания к главе 15. 1. Какие основные разновидности схем распределения электроэнергии применяются в сельских сетях? 2. Как и для чего определяют центр тяжести электрической нагрузки? 3. Перечислите основные требования к электрическим сетям. 4. Какие конструкции опор используются в воздушных сетях? 5. Какие основные типы голых проводов применяются в воздушных сетях? 6. Каким трем основным требованиям должны удовлетворять провода в электрических сетях? 7. Найти сечение алюминиевого провода на вводе в помещение, если ток нагрузки равен 120 А, а потерей напряжения из-за малой протяженности ввода можно пренебречь. 8. Найти сечение провода марки А для передачи нагрузки в 100 кВт на расстоянии 250 м (система трехфазная). 9. Для чего необходимо проверять сеть на колебание напряжения при пуске мощного электродвигателя?

Глава 16. ВНУТРЕННИЕ ПРОВОДКИ

16.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВНУТРЕННИХ ПРОВОДКАХ. РАЗМЕТКА ПРОВОДОВ

Монтаж проводок делают по проекту, который представляет собой совокупность схем, нанесенных на план здания с указанием расположения ввода, магистральных линий, групповых щитков, типов проводов и способов прокладок, типов выключателей, арматуры и т. д. Схемы проводок выполняют обычно однолинейными с использованием стандартных условных обозначений.

Магистральные вводы в помещение подключают к групповым щиткам. Все потребители (светильники, бытовые приборы и др.) разбивают на группы таким образом, чтобы общий ток всех токоприемников в группе составлял 6...15 А. На групповых щитках устанавливают предохранители каждой из групп. На них также размещают выключатели, рубильники и измерительные приборы. В каждой группе должно быть не более 20 светильников, в том числе и штепсельных розеток.

Внутренние проводки выполняют открытыми и скрытыми.

Открытую электропроводку прокладывают по поверхности стен, потолков, по фермам и другим строительным элементам зданий и сооружений, по опорам и т. д. Провода и кабели прокладывают при этом непосредственно по поверхности стен, потолков, на струнах, полосах, тросах, роликах, изоляторах, в трубах, коробах, гибких металлических рукавах, на лотках, в электротехнических плинтусах и наличниках, свободной подвеской и т. п. Открытая электропроводка может быть стационарной, передвижной и переносной.

Скрытую проводку прокладывают внутри конструктивных элементов зданий и сооружений (в стенах, полах, фундаментах, перекрытиях), а также по перекрытиям этажей в подготовке пола, непосредственно под полом и т. п. Провода и кабели прокладывают при этом в трубах, гибких металлических рукавах, коробах, замкнутых каналах и пустотах строительных конструкций, в заштукатуриваемых бороздах.

Наружной называется проводка, проложенная по наружным стенам зданий и сооружений, под навесами и т. п., а также между зданиями на опорах (не более четырех пролетов длиной по 25 м) вне улиц, дорог и т. п. Наружная электропроводка может быть открытой и скрытой.

Вводом от воздушной линии называется часть электропроводки, соединяющая ответвление от линии, считая от изоляторов на стене или крыше здания до внутренней проводки.

Тросом называется стальная проволока или стальной канат, натянутые в воздухе и предназначенные для подвески к ним проводов, кабелей или их пучков.

Струна — стальная проволока, натянутая вдоль стены вплотную к ней или вдоль потолка, бруса, фермы и предназначенная для крепления к ней проводов, кабелей или их пучков.

Короб выполняют из сплошных или перфорированных стенок, он служит для защиты проводов от механических повреждений.

Лоток, в который укладываются провода и кабели, открыт сверху и не защищает проводки от механических повреждений. Его изготавливают из негорючих материалов.

Выполнение проводки включает в себя следующие основные операции: разметку мест установки токоприемников, штепсельных розеток и выключателей, мест прокладки проводов по стенам и потолку, мест проходов проводов через стены и междуэтажные перекрытия, мест ответвлений проводов и установки осветительных коробок; установку роликов или изоляторов; прокладку проводов со всеми соединениями; крепление проводов к изолирующим опорам или закрепление их скобами; оконцевание проводов и присоединение их к токоприемникам.

Места прокладки проводов обычно начинают размечать от группового щитка или от отдельных помещений с выводами в коридор. При этом пользуются простейшими приспособлениями: уровнем, отвесом, измерительной рулеткой, специальной рулеткой, выполненной из 2...3-миллиметрового капронового шнура, который покрывают красителем (синькой, охрой, мелом), а также разметочным шестом, циркулем с деревянными ножками длиной 1,5...2 м и др.

16.2. ВЫБОР МАРКИ ПРОВОДОВ И СПОСОБА ПРОКЛАДКИ ВНУТРЕННИХ ПРОВОДОВ

Электрические проводки нужно выполнять в соответствии с проектом установки. Если же по каким-либо причинам проекта нет или в нем не указаны марки проводов, то провода и спо-

собы их прокладки выбирают в зависимости от характера помещений и условий окружающей среды в них. Минимально допустимые площади сечения проводов для внутренних проводов приведены в таблице 16.1.

16.1. Наименьшие площади сечения токопроводящих жил проводов и кабелей в электропроводках

Проводники	Площадь сечения жил, мм²	
	медных	алюминиевых
Шнуры для присоединения бытовых электроприемников	0,35	—
Кабели для присоединения переносных и передвижных электроприемников в промышленных установках	0,75	—
Скрученные двухжильные провода с многопроволочными жилами для стационарной прокладки на роликах	1,0	—
Незащищенные изолированные провода для стационарной прокладки внутри помещений:		
а) непосредственно по основаниям, на роликах, клинах и тросах	1,0	2,5
б) в лотках, в коробах (кроме глухих); для жил, присоединяемых к винтовым зажимам	1,0	2,5
для жил, присоединяемых пайкой:		
однопроволочных	0,5	—
многопроволочных (гибких)	0,35	—
в) на изоляторах	1,5	4,0
Незащищенные изолированные провода в наружных электропроводках:		
а) по стенам, конструкциям или опорам на изоляторах; вводы от воздушной линии	2,5	4,0
б) под навесами на роликах	1,5	2,5
Незащищенные и защищенные изолированные провода и кабели в трубах, металлических рукавах и глухих коробах	1,0	2,5
Кабели и защищенные изолированные провода для стационарной прокладки (без труб, рукавов и глухих коробов):		
для жил, присоединяемых к винтовым зажимам	1,0	2,5
для жил, присоединяемых пайкой:		
однопроволочных	0,5	—
многопроволочных (гибких)	0,35	—
Защищенные и незащищенные провода и кабели в замкнутых каналах или заделанные в строительные конструкции, а также под штукатуркой	1,0	2,5

В таблице 16.2. даны рекомендации по выбору типа проводов и способа прокладки в зависимости от характера окружающей среды.

Для защиты от воздействия окружающей среды и механических повреждений кабели и провода прокладывают в стальных или пластмассовых трубах. Стальные трубы тонкостенные или специальные электротехнические, имеющие антикоррозийное покрытие и очищенные от грата — излишков металла на кромках. Пластмассовые трубы — винипластовые, полиэтиленовые или полипропиленовые.

Способ прокладки	Характеристики проводов и кабелей	Условия окружающей среды
------------------	-----------------------------------	--------------------------

Открытые электропроводки

На изолирующих опорах: на роликах и клицах	Провода незащищенные од-ножильные	В сухих и влажных помеще-ниях
то же	Провода скрученные двух-жильные	В сухих помещениях
на изоляторах, а также на роликах, предназна-ченных для применения в сырых местах	Провода незащищенные од-ножильные	В помещениях всех видов и наружных установках. В на-ружных установках ролики для сырых мест (больших размеров) допускается при-менять только в местах, где исключена возможность непосредственного попада-ния на электропроводку дож-дя или снега (под навесами)
Непосредственно по поверх-ности стен, потолков и на струнах, полосах и других несущих конструкциях	Кабели в неметаллической и металлической оболоч-ках	В наружных установках
То же	Провода незащищенные и защищенные одножиль-ные и многожильные, ка-бели в неметаллической и металлической оболоч-ках	В помещениях всех видов
На лотках и в коробах с от-крываемыми крышками	То же	В помещениях всех видов и наружных установках
На тросах	Специальные провода с не-сушим тросом. Провода незащищенные и защи-щенные одножильные и многожильные. Кабели в неметаллической и метал-лической оболочках	В помещениях всех видов. В наружных установках — только специальные про-вода с несущим тросом для наружных установок или кабели

Открытые и скрытые электропроводки

В металлических гибких ру-кавах. В стальных трубах (обыкновенных и тонко-стенных) и глухих сталь-ных коробах. В неметал-лических трубах и неметал-лических глухих коробах из трудногоряемых мате-риалов. В трубах изоляци-онных с металлической оболочкой	Провода незащищенные и защищенные, одножиль-ные и многожильные. Ка-бели в неметаллической оболочке	В помещениях всех видов и наружных установках. Ис-ключения: 1) запрещается приме-нять изоляционные тру-бы с металлической обо-лочкой в сырых, особо сырых помещениях и на-ружных установках; 2) запрещается приме-нять стальные трубы и стальные глухие короба с толщиной стенок 2 мм и менее в сырых, особо сы-рых помещениях и в на-ружных установках
---	--	---

Способ прокладки	Характеристики проводов и кабелей	Условия окружающей среды
<i>Скрытые электропроводки</i>		
В неметаллических трубах из негорючих материалов. В замкнутых каналах строительных конструкций, под штукатуркой	Провода незащищенные и защищенные, одножильные и многожильные. Кабели в неметаллической оболочке	В помещениях всех видов, наружных установках. Включения: 1) запрещается применять изоляционные трубы с металлической оболочкой в сырых, особо сырых помещениях и наружных установках; 2) запрещается применять стальные трубы, стальные глухие коробки толщиной стенок 2 мм и менее в сырых, особо сырых помещениях и наружных установках
Заделанная в строительные конструкции при их изготовлении	Провода незащищенные	В сухих, влажных и сырых помещениях

В сухих и влажных помещениях трубопроводы могут быть выполнены из труб, проложенных открыто и без уплотнения мест соединения труб и вводов в кожухи аппаратов, ящики и коробки.

В сырых, особо сырых, жарких и пыльных помещениях, а также в помещениях с химически активной средой трубы могут быть проложены скрыто или открыто, с уплотнением мест их соединений и вводов в кожухи, ящики и коробки. Стальные трубы покрывают антикоррозийной краской (составом). Основания, на которых крепят полипропиленовые и полиэтиленовые трубы, должны быть негорючими. Стальные трубы в местах соединения уплотняют при помощи резьбового соединения, а пластмассовые — проклейкой.

Радиус закругления труб, прокладываемых в бетонных стенах и полах, должен быть не менее десяти наружных диаметров труб. Если прокладка скрытая, но трубы могут быть извлечены, радиус закругления должен составлять не менее шести диаметров труб. При открытой прокладке при диаметре труб до 75 мм закругление на повороте должно иметь радиус не менее четырех диаметров труб, а при трубах диаметром более 75 мм — не менее шести диаметров.

Для соединения жил и проводов, а также для их протягивания применяют ящики и коробки. Их устанавливают на прямых участках трубопроводов. При открытой прокладке стальных труб расстояние между местами их крепления при помощи различных скоб, хомутов, крепов и зажимов при диаметре труб до 25 мм

составляет 2,5 м, до 35 мм—3 м, до 45 мм—3,5 м, более 50 мм—4 м. У пластмассовых труб с условным проходом 15 мм расстояние между креплениями равно 1 м, при проходе 20 мм—1,4 м, 25 мм—1,8 м, 32 мм—2,2 м, 40 мм—2,6 м, 50 мм—3 м. Для затягивания в трубы применяют провода типа ПРТО, АПРТО, ПРВ и АПРВ, а на коротких прямых участках трасс—ПВ и АПВ.

16.3. СОЕДИНЕНИЕ И ОКОНЦЕВАНИЕ ПРОВОДОВ

Соединение проводов. Медные жилы проводов соединяют скруткой с последующей сваркой или пайкой, а также при помощи механических зажимов, или опрессованием.

На рисунке 16.1 показана схема паяльно-сварочного трансформатора типа ТПС-2000, предназначенного для контактного электро-разогрева металлов при сварке и пайке соединений установочных проводов, кабелей, обмоток электрических машин, трансформаторов и др. Первичная обмотка трансформатора может быть включена в сеть 380 или 220 В, вторичное напряжение определяется числом рабочих витков сварочных клещей (от 1 до 8 витков). Это напряжение зависит от площади поперечного сечения свариваемых проводов: чем она больше, тем меньше напряжение и больше ток сварки. Мощность трансформатора 2 кВ·А при максимальном вторичном токе 250 А, длительность рабочего периода около 0,5 мин.

Медные однопроволочные провода с площадью сечения до 6 мм², а также многопроволочные с небольшими площадями сечений паяют по скрутке (рис. 16.2). Жилы с площадью сечения 6...10 мм² соединяют бандажной пайкой (рис. 16.2, а), а многопроволочные провода—скруткой с предварительной расплеткой проволок (рис. 16.2, б). Длина мест соединений скруткой или бандажной пайкой должна составлять не менее 10...15 наружных диаметров соединяемых жил.

Паяют свинцово-оловянистым припоем с использованием канифоли в качестве флюса. Применять при пайке медных проводов кислоту и нашатырь не разрешается, так как эти вещества постепенно разрушают место спайки.

Сейчас широко пользуются методом соединения медных проводов опрессованием (рис. 16.2, г). Концы проводов зачищают

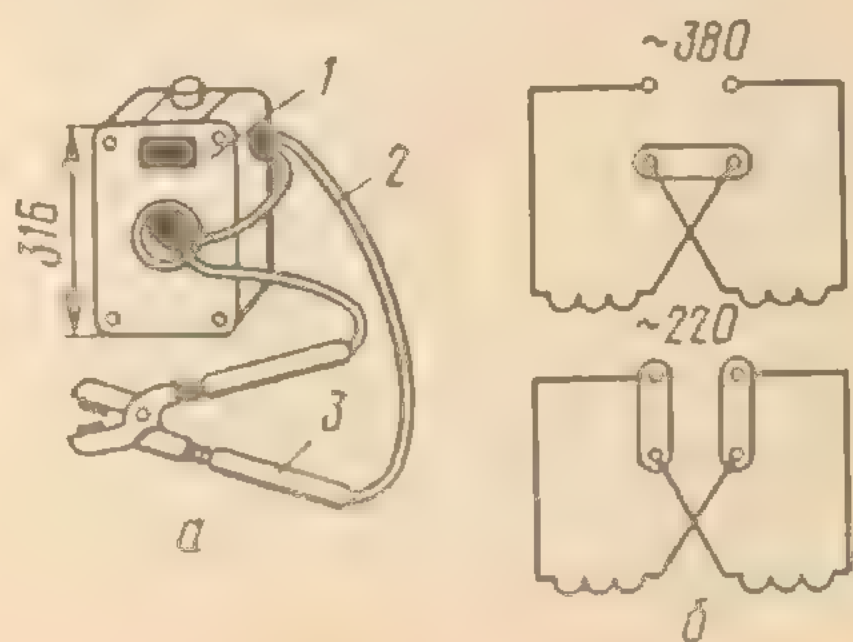


Рис. 16.1. Паяльно-сварочный трансформатор типа ТПС-2000: а — общий вид; б — схема; 1 — трансформатор; 2 — гибкий кабель для исполнения вторичной обмотки; 3 — паяльно-сварочные клещи для сварки и пайки проводов с площадью сечения от 2,5 до 200 мм².

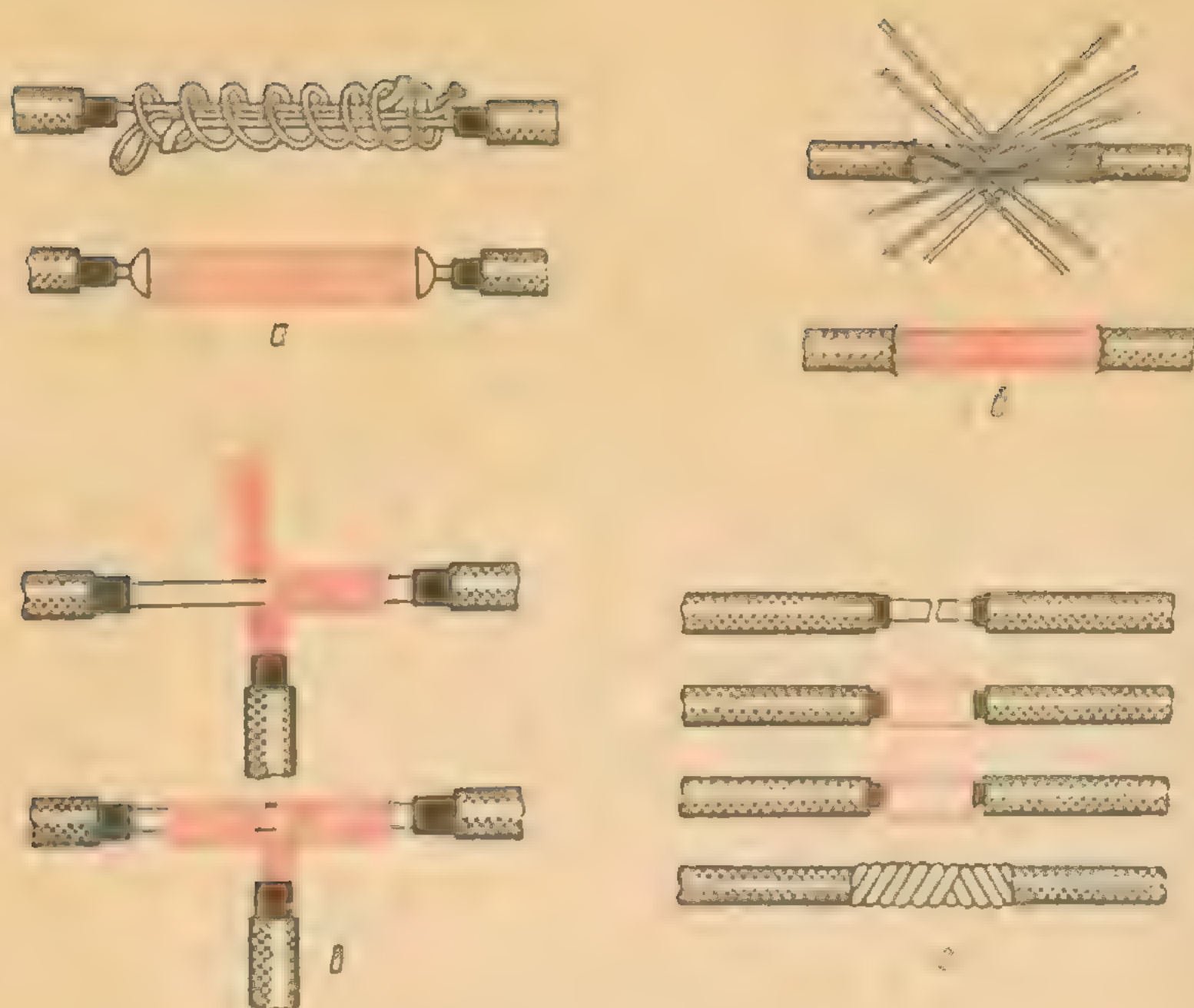


Рис. 16.2. Соединение и ответвление проводов:

а — однопроволочных бандажной пайкой; б — многопроволочных скруткой; в — ответвление многопроволочных проводов; г — соединение многопроволочных проводов опрессованием.

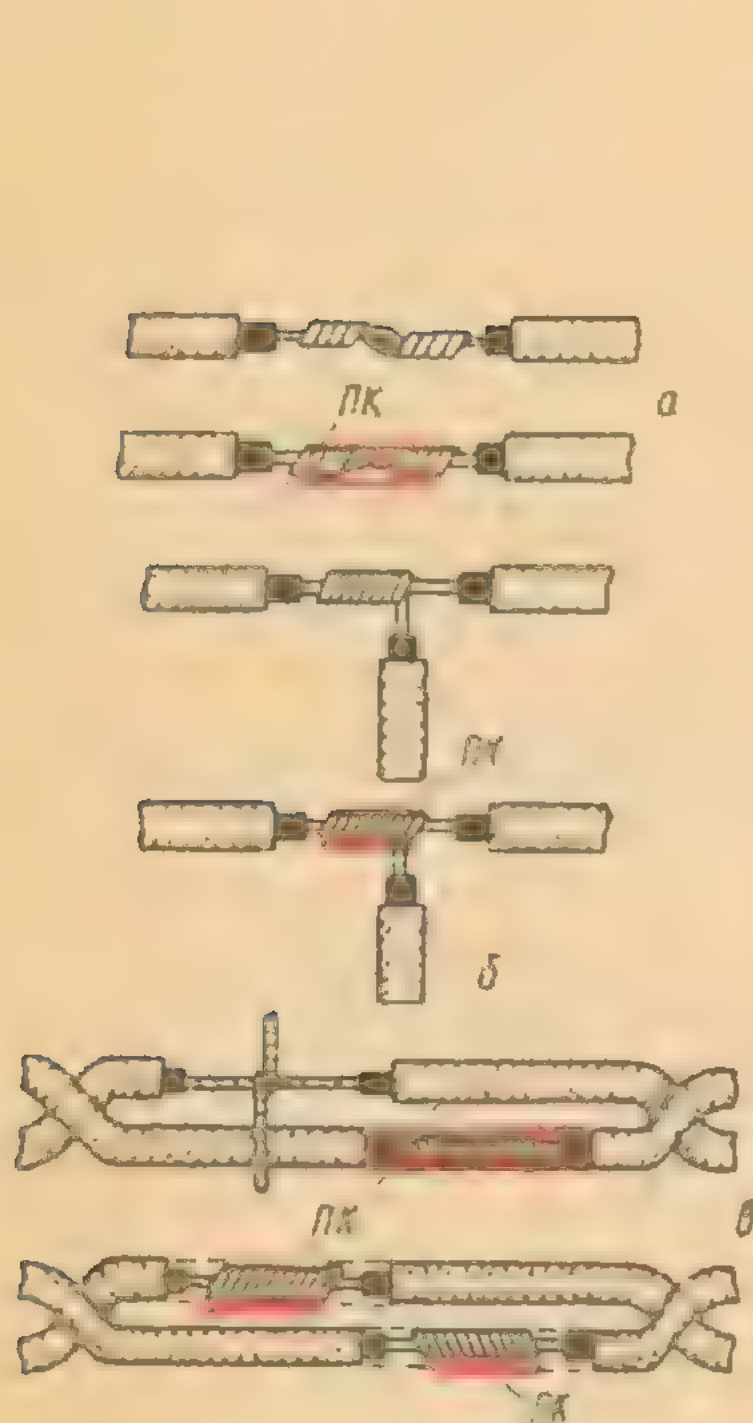


Рис. 16.3. Соединение скруткой с последующей пайкой:

а — проводов ПР и АПР; б — ответвление проводов ПР и АПР; в — проводов ПРВД; ПК — место пайки.

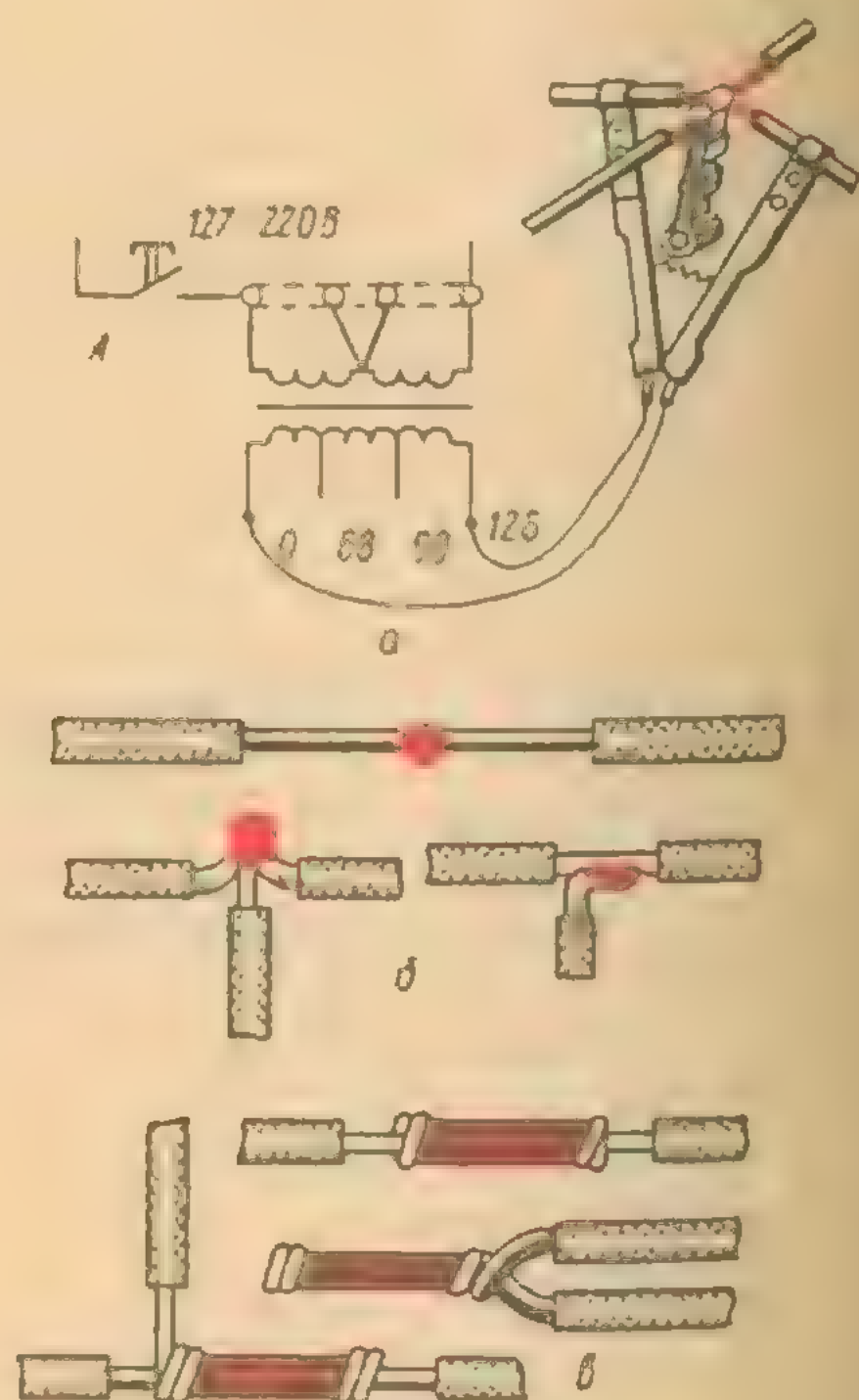


Рис. 16.4. Соединение проводов сваркой и пайкой:

а — соединение однопроволочных алюминиевых проводов сваркой в 100°C; б — образцы сварок; в — соединение пайкой.

на 25...30 мм, затем обертывают медной фольгой и опрессовывают специальными клещами типа ПК.

Алюминиевые жилы проводов соединяют сваркой, пайкой и механическим путем (рис. 16.3 и 16.4). Сваривают провода в специальной формочке при помощи угольных электродов, получающих питание от сварочного трансформатора.

Для пайки алюминиевые провода скручивают (рис. 16.4, в), а затем место скрутки нагревают в пламени паяльной лампы и пропаивают припоем, состоящим из олова, цинка и меди.

Оконцевание проводов выполняют после их прокладки. Однопроволочные провода с площадью сечения до 10 мм² и многопроволочные с площадью сечения до 2,5 мм² присоединяют к токоприемникам непосредственно. Оголенную жилу при этом вводят под зажимной контактный винт. Концы многопроволочных проводов скручивают и пропаивают. В зависимости от типа контакта концу провода может быть придан вид пестика (рис. 16.5, а) или колечка (рис. 16.5, б).

Концы однопроволочных проводов с площадью сечения более 10 мм² или многопроволочных с площадью сечения более 2,5 мм² снабжают наконечниками (рис. 16.5, в), которые припаивают или приваривают к жиле, а в некоторых случаях опрессовывают.

Во всех случаях соединения, ответвления и оконцевания проводов, места соединения их между собой и наконечником обматывают изоляционной лентой в несколько слоев. В соответствии с правилами электрическая прочность изоляции в месте соединения или ответвления должна быть не ниже, чем прочность изоляции в целом.

16.4. ЭЛЕМЕНТЫ МОНТАЖА ОТКРЫТЫХ ПРОВОДОВ

Проводка на роликах применяется в основном для существующих зданий, а также для сооружаемых вновь небольших жилых и им подобных построек. В новых крупных культурно-бытовых, административных и многих других зданиях проводку делают скрытой, используя плоские провода марок АППВ, АППВС, АПН. В производственных корпусах, ремонтных мастерских применяют провода марок АПР и АПВ, располагаемые на конструкциях с изоляторами.

Расстояние между роликами в ряду должно быть не более 80 см, а между соседними проводами — не менее 35 мм. Высота прокладки над полом не менее 2,5 м. От потолка и от смежной

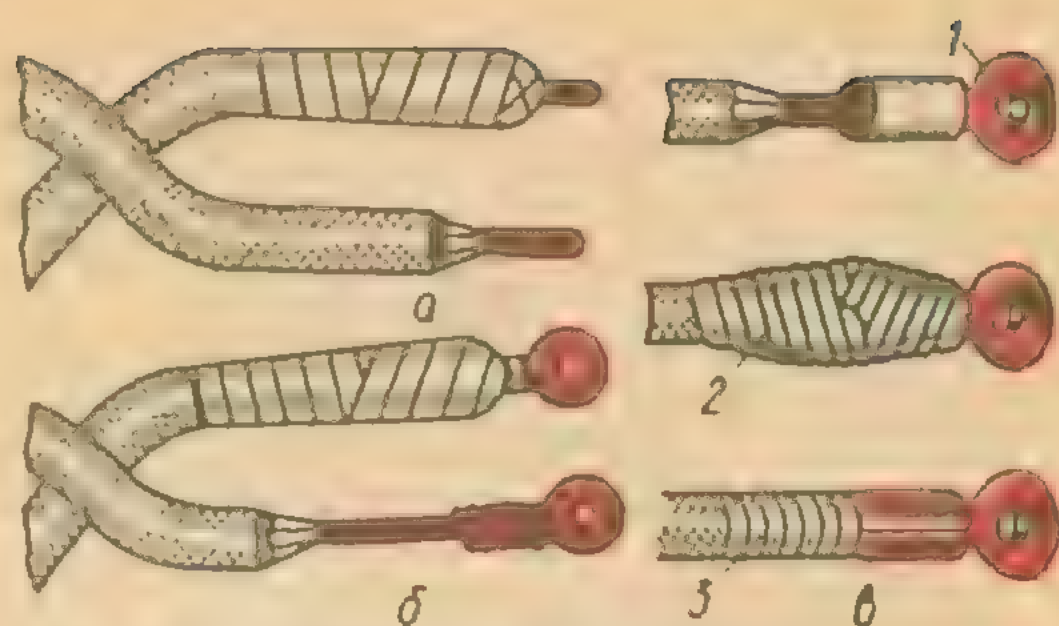


Рис. 16.5. Оконцевание проводов:

а — пестиком; б — колечком; в — припайкой наконечника; 1 — наконечник; 2 и 3 — изоляционная лента или бандажная нить.

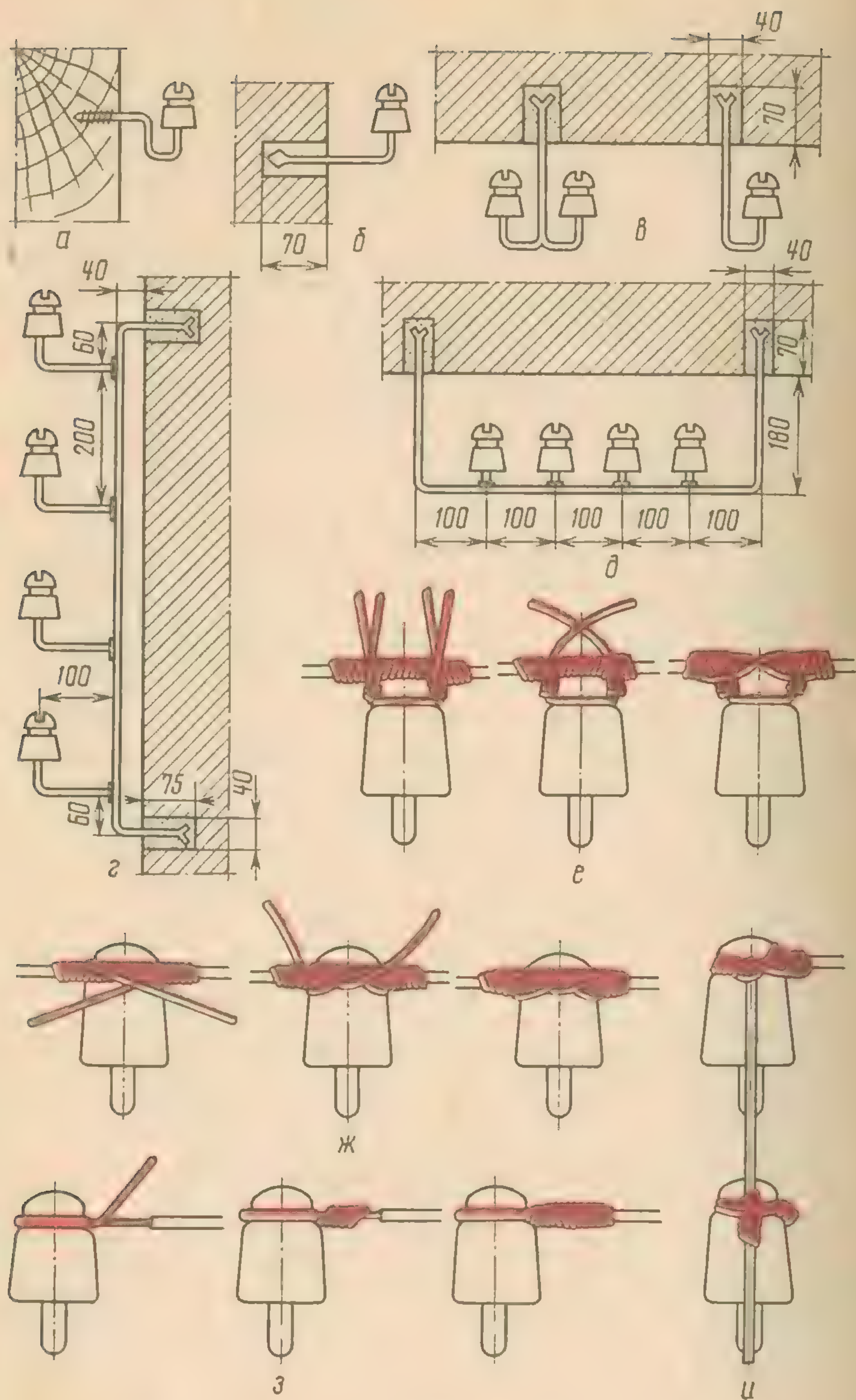


Рис. 16.6. Крепление изоляторов и привязка проводов:
 а — по деревянным основаниям; б — по бетонным и кирпичным основаниям;
 в — на якорях и полужакорах по бетонным и кирпичным основаниям; г — на вертикальной скобе; д — на горизонтальной скобе; е, ж, з, и — привязка проводов к изоляторам, соответственно на головке, на шейке, при заглушке провода, на вертикальном участке.

стены ролики крепят на расстоянии, равном 1,5...2-кратной высоте ролика.

Наименьшее расстояние между проводами на изоляторах при площади сечения до 25 мм^2 — 70 мм, при площади сечения от 35 мм^2 и более — 100 мм. Расстояние от стены и потолка берут в 1,5...2 раза большим, чем высота изолятора.

Способы крепления изоляторов и привязки проводов к изоляторам показаны на рисунке 16.6.

Рекомендации по выбору проводов и способа прокладки даны в таблицах 16.1 и 16.2.

Во всех случаях плоские провода (АПНР, АПВ, АППВ, АПН, АПРВ) крепят гвоздями длиной 25...32 мм, диаметром цилиндрической части 1,4...1,6 мм и шляпки до 3 мм. Во влажных неотапливаемых помещениях рекомендуется под шляпки гвоздей подкладывать пластмассовые или резиновые шайбочки.

Четырехжильные провода прикрепляют полосками из белой или оцинкованной жести толщиной 0,3...1 мм, шириной до 10 мм и длиной до 80 мм, под которые подкладывают полоску электрокартона, выступающую на 1,5...2 мм с обеих сторон.

По деревянным основаниям провод марки АППВ можно прокладывать на роликах и на клицах, а провода марок АПН, АПР, АПВ, АПРВ — только на клицах. Расстояние между клицами, как и между роликами, 80 см.

Провода марки АППВ крепят следующим образом: под шляпку шурупа, которым привинчивается ролик, кладут полоску листового металла шириной 10 мм, на нее — полоску электрокартона шириной 14 мм, а затем провод (плашмя). Концы металлической полоски вместе с прокладкой загибают и крепят пряжкой или проволоочной петлей, как показано на рисунке 16.7, а.

При изгибах плоских трехжильных проводов марок АППВ, АППР на 90° (на ребро) разделительную пленку между жилами в месте изгиба вырезают, одну или две жилы отводят внутрь угла в виде полупетли (рис. 16.7, в). Двухжильный и трехжильный провод типа АПН при повороте трассы на 90° изгибают на ребро, предварительно разрезав разделительную пленку, при этом внутренняя жила в месте поворота частично накладывается на внешнюю (рис. 16.7, г). Одножильные провода АПН, АПВ и АПРВ изгибают радиусом 20 мм, когда площадь сечения до 10 мм^2 , и радиусом 35 мм, если площадь сечения от 16 до 35 мм^2 .

Провода марок АПВ, АППВ, АПН и АПРВ можно прикреплять к бетонным и кирпичным основаниям при помощи стальной полоски (ленты) шириной 20...40 мм и толщиной 3...4 мм, которую прибивают к стене дюбель-гвоздями вдоль всей трассы проводки (рис. 16.8), а к металлическим основаниям и закладным деталям приваривают. Расстояние между соседними дюбель-гвоздями не более 1 м. Провода к ленте крепят через каждые 300...400 мм полосками шириной 10 мм из белой жести, оцинкованного или окрашенного стального листа или при помощи нормализованных монтажных перфорированных полос и пряжек. Провода под

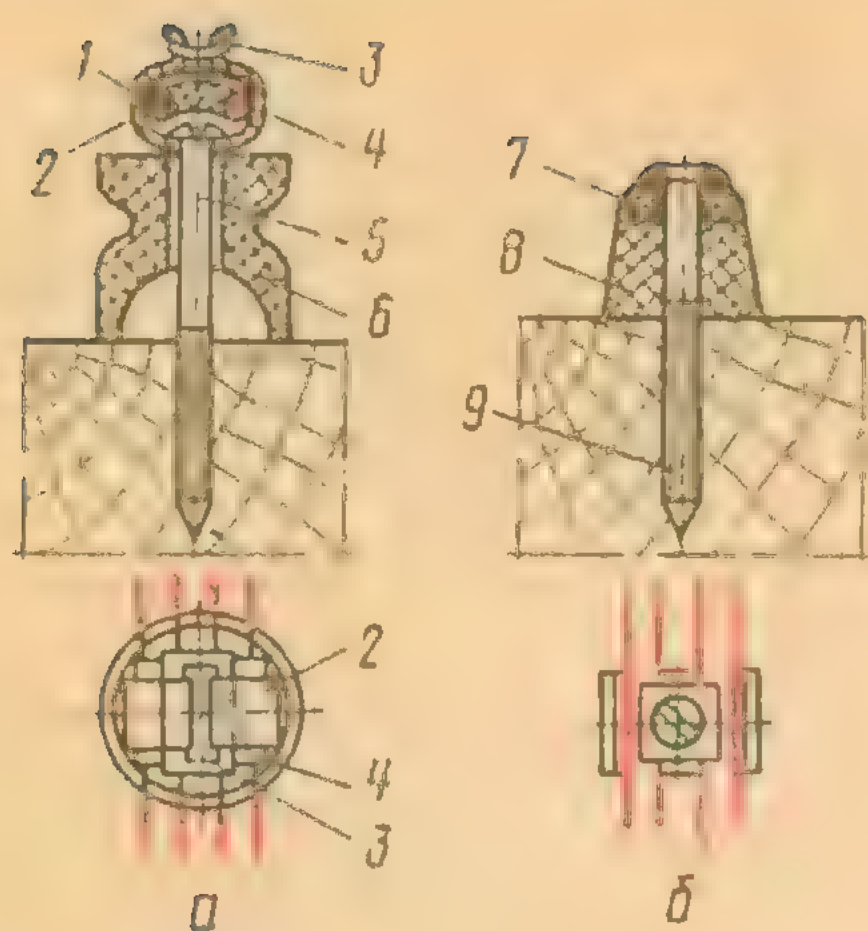
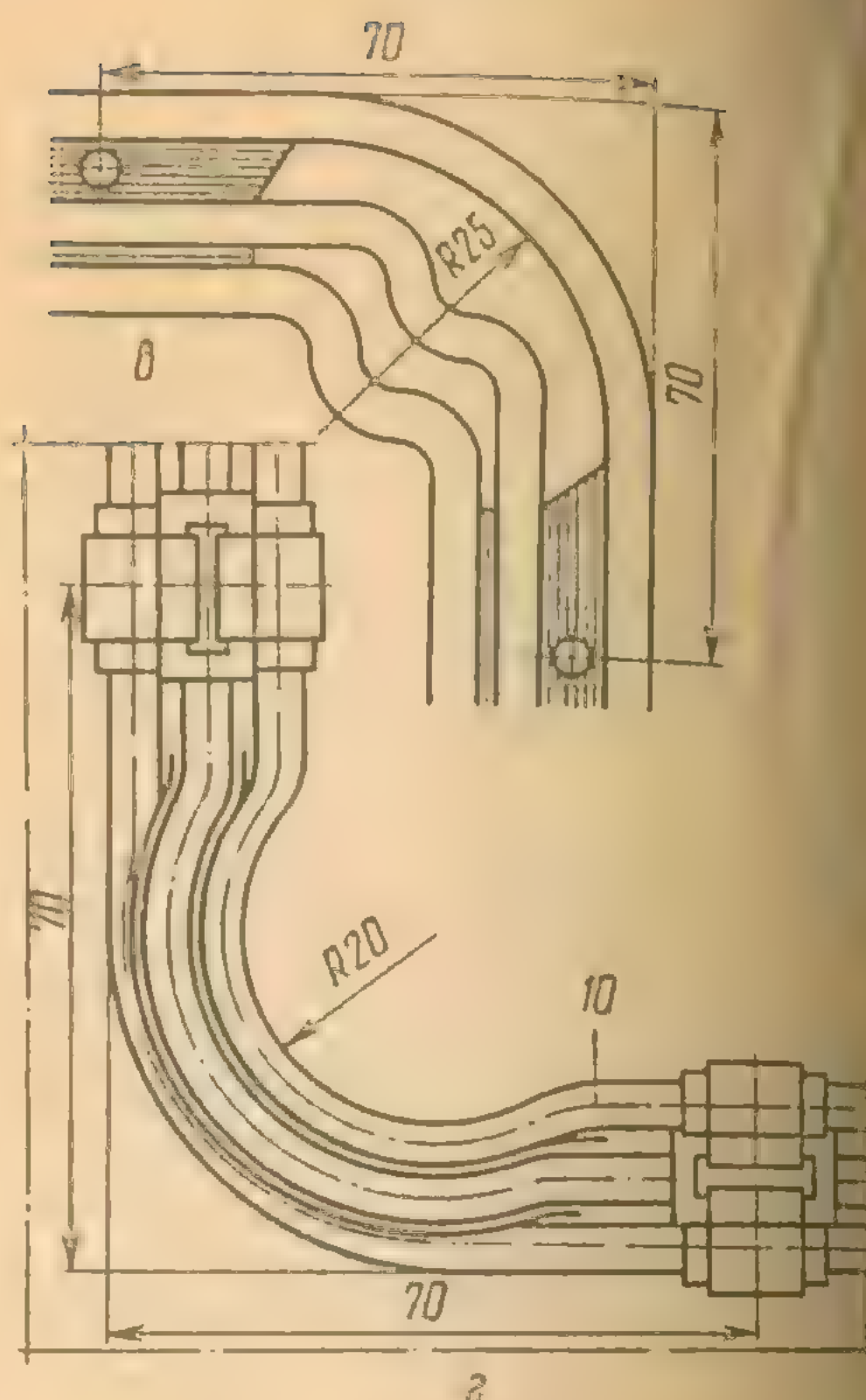


Рис. 16.7. Прокладки провода АППВ на роликах (а), проводов марок АППВ, АПН, АПР, АПВ, АПРВ по деревянным основаниям на клицах (б) и примеры изгиба проводов марок АППВ и АПН (в) и АПВ, АПН и АПРВ на ребро (г):

1 — провод АППВ 2X6; 2 — полоска; 3 — пряжка; 4 — прокладка из электрокартона; 5 — шуруп; 6 — ролик РИ-2,5; 7 — провод АПР; 8 — клица; 9 — шуруп; 10 — провод АПН 3X4.



полосками должны быть защищены прокладками из электроизоляционного картона, выступающего на 1,5...2 мм с обеих сторон полоски.

На рисунке 16.9, а показано крепление проводов марок АПВ, АППВ, АПН, АПРВ к бетонным и кирпичным основаниям по пристреливаемой проволоке, а на рисунке 16.9, б — при помощи пристреливаемых крепок с полосками. Монтажные полоски перед этой операцией должны быть очищены от ржавчины и покрыты антикоррозийным лаком или масляной краской.

Пластмассовые или стальные детали крепления проводов марок АПВ, АППВ, АПН, АПРВ и кабелей АВРГ и АНРГ можно приклеивать к бетонным, железобетонным, керамзитобетонным, асбоцементным, кирпичным и керамическим основаниям, поверхность которых сухая, прочная, очищенная от пыли, грязи и копоти, при помощи специальных клеев (например, клей БМК-5).

При этом заранее размеченные места крепления зачищают металлической или волосяной щеткой, обезжиривают ацетоном, поверхность изделия, на строительное основание и приклеиваемое изделие наносят слой клея толщиной 0,5...1 мм, прижимают изделие к основанию и удерживают в таком положении 3...5 с. Пользоваться приклеенными деталями можно не ранее чем через сутки. Расстояние между приклеиваемыми деталями крепления проводов должно быть 300...400 мм, а кабелей — 500 мм.

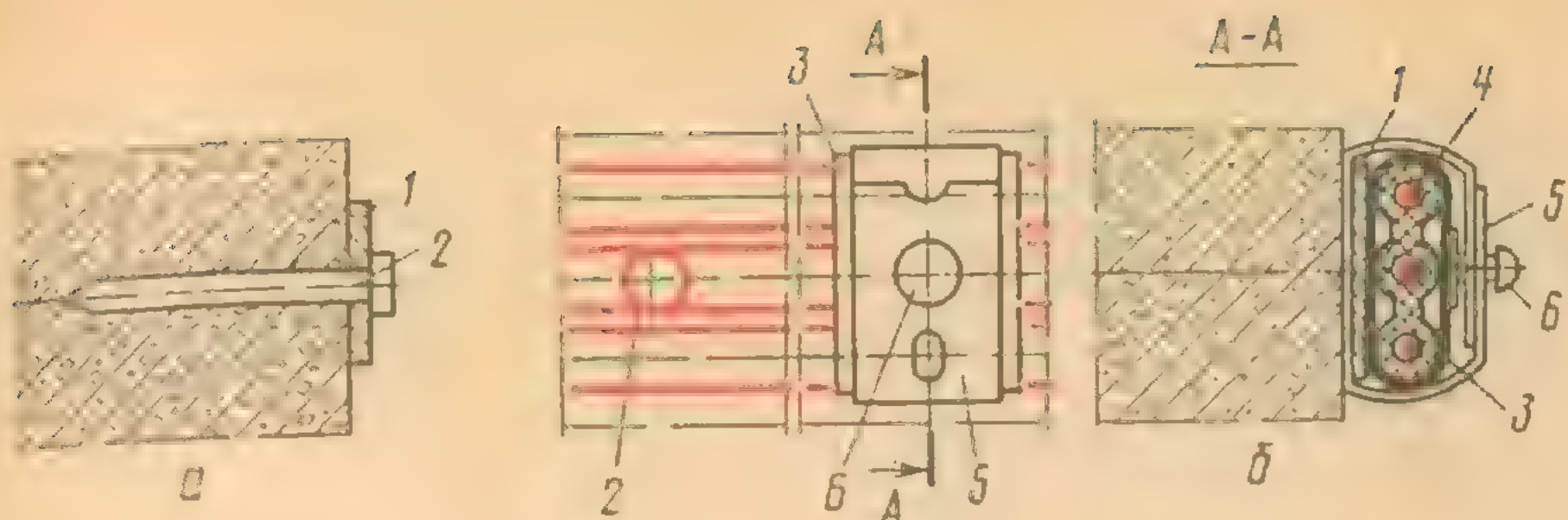


Рис. 16.8. Крепление проводов марок АПВ, АППВ, АПН, АПРВ к бетонным и кирпичным основаниям по пристреливаемой стальной полосе: а — крепление полосы дюбель-гвоздем; б — крепление провода; 1 — полоса; 2 — дюбель-гвоздь; 3 — прокладка из электрокартона; 4 — провод АПН 3X4; 5 — лента монтажная; 6 — монтажная кнопка.

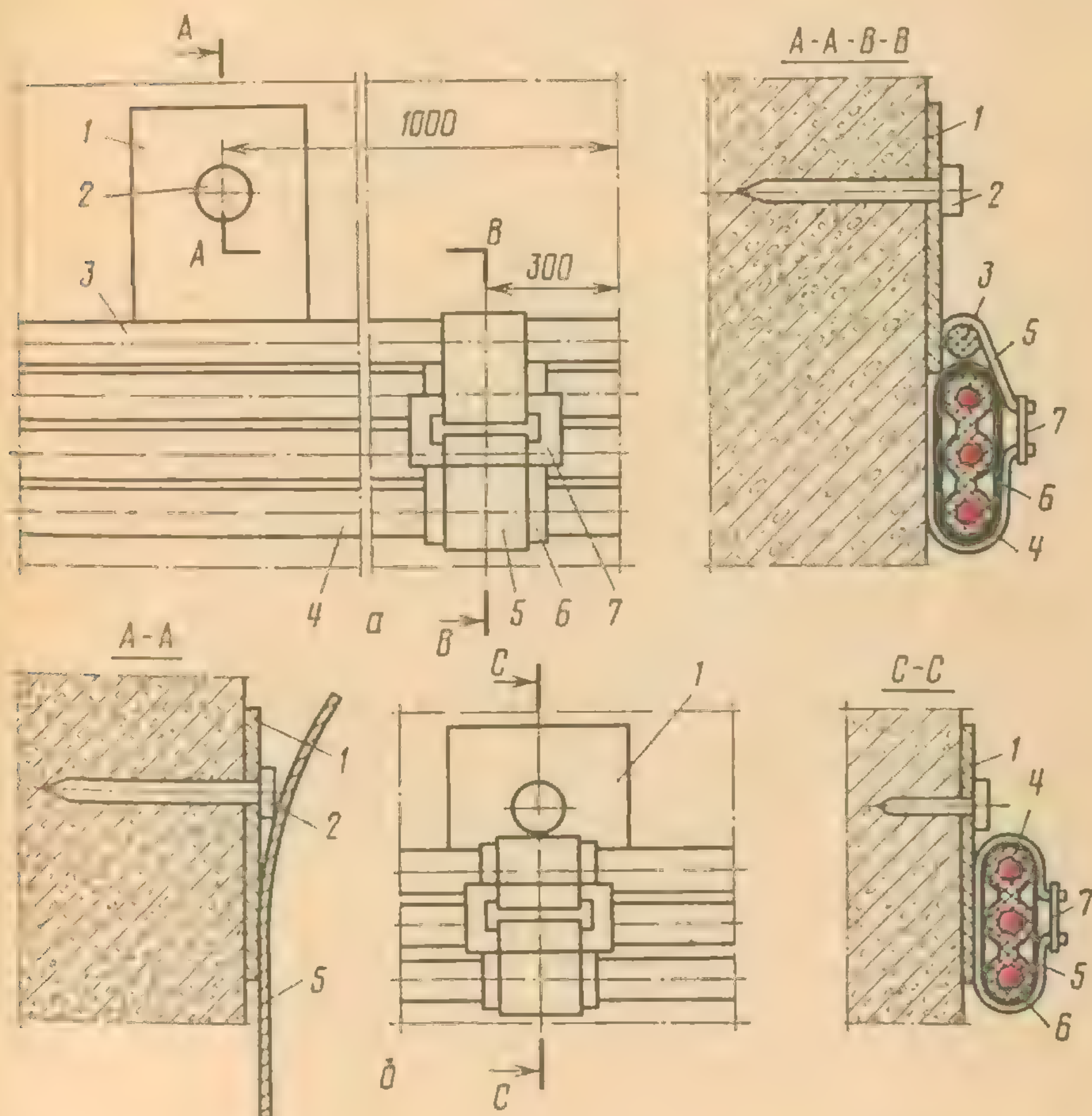


Рис. 16.9. Крепление проводов марок АПВ, АППВ, АПН, АПРВ к бетонным и кирпичным основаниям по пристреливаемой проволоке (а) и по пристреливаемым закрепам с полосками (б): 1 — пластина; 2 — дюбель-гвоздь; 3 — проволока; 4 — провод АПН 3X4; 5 — стальная полоска; 6 — прокладка из электрокартона; 7 — пряжка.

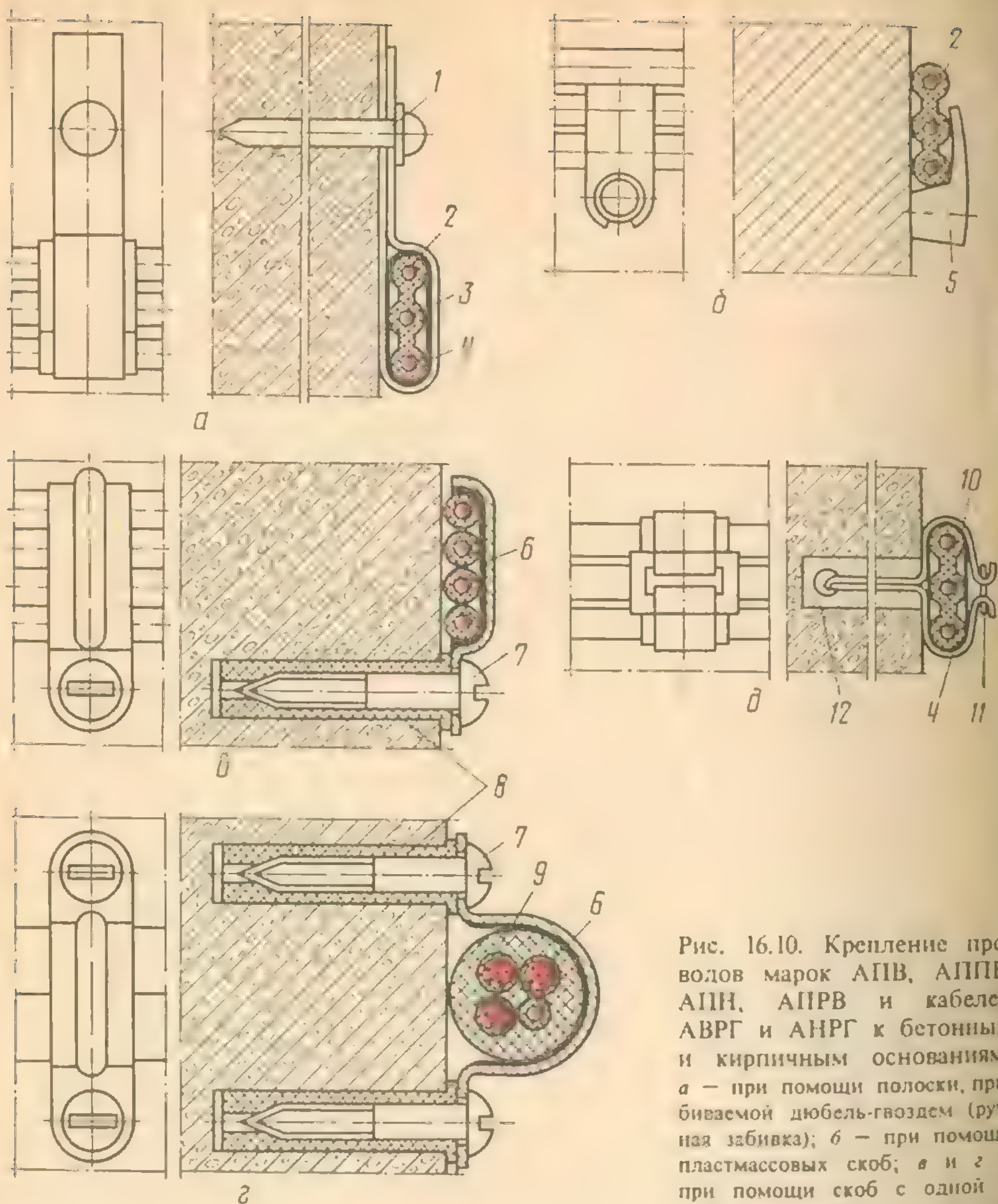


Рис. 16.10. Крепление проводов марок АПВ, АППВ, АПН, АПРВ и кабелей АВРГ и АНРГ к бетонным и кирпичным основаниям: а — при помощи полоски, прибиваемой дюбель-гвоздем (ручная забивка); б — при помощи пластмассовых скоб; в и г — при помощи скоб с одной и двумя лапками; д — при помощи

полоски, вмазанной в основание; 1 — дюбель-гвоздь; 2 — провод АПН 3Х4; 3 — полоска; 4 — прокладка из электрокартона; 5 — пластмассовая скоба; 6 — скоба; 7 — шуруп; 8 — дюбель; 9 — кабель АВРГ (АНРГ) 3 × 10 + 1 × 6; 10 — полоска; 11 — пряжка; 12 — алебастр.

На рисунке 16.10 показаны некоторые другие способы крепления проводов к бетонным, кирпичным и им подобным основаниям.

В производственных помещениях широкое применение могут находить тросовые проводки (рис. 16.11). Их можно приспособить к любым условиям среды путем выбора необходимой марки провода или кабеля, а также использования специальных тросовых проводов АРТ, АВТ, АВТС, которые имеют свой несущий оцинкованный трос. Преимущества этих проводок заключаются в простоте монтажа и демонтажа, невысокой стоимости, ограниченном числе закладных частей и простоте крепления их к железо-

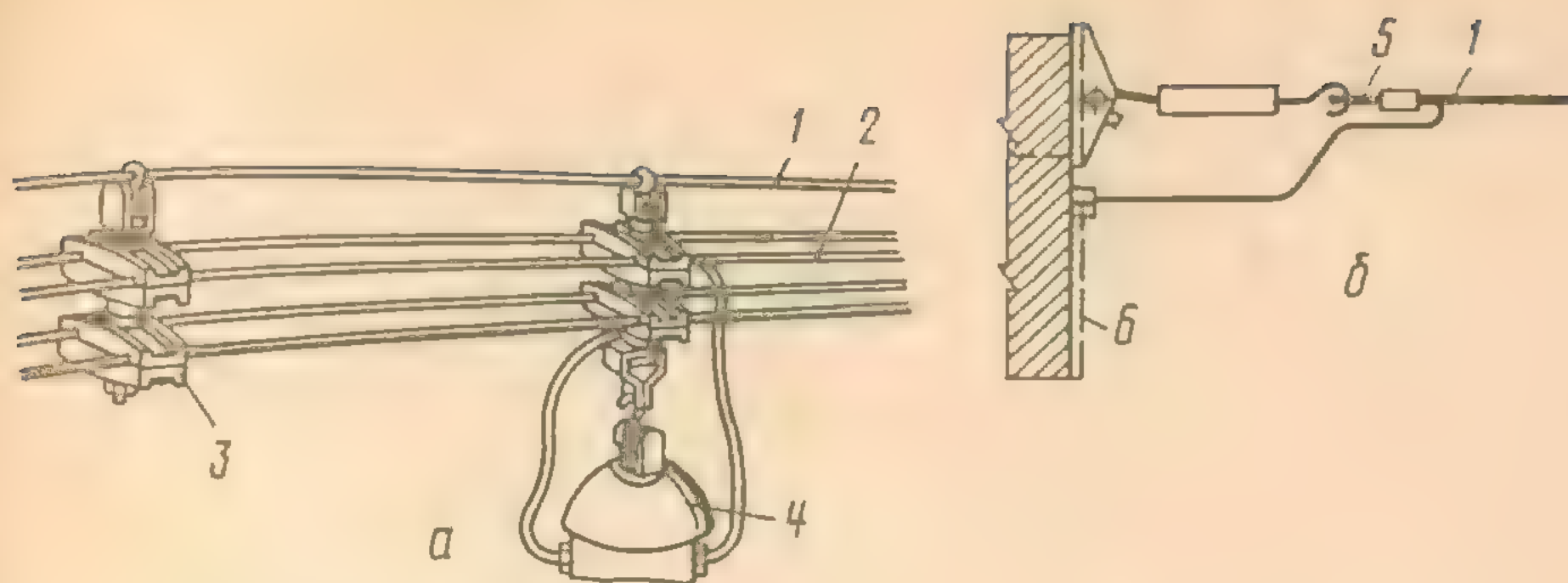


рис. 16.11. Элементы тросовой проводки:

а — подвеска проводов и светильника; *б* — заземление троса; 1 — трос; 2 — провода; 3 — клипсы; 4 — светильник; 5 — концевая петля; б — шина заземления.

бетонным основаниям. Недостаток этих проводок — меньшая механическая прочность и сложность устройства при наличии крановых пролетов и ограниченности пространства.

16.5. ЭЛЕМЕНТЫ МОНТАЖА СКРЫТЫХ ПРОВОДОВ

Провода скрытых проводок (марок АППВС, АПВ, АПН) укладывают непосредственно или в пластмассовых и стальных трубах в бороздки штукатурки, в пустоты и каналы плит перекрытий и стен. Обычно провода закрепляют алебастровым раствором, а наружу выводят в полутвердых резиновых трубках.

По несгораемым стенам и перегородкам провода марок АППВС, АПН и АПВ прокладывают как в бороздках, так и непосредственно под слоем мокрой штукатурки, в толще основания или в сплошном слое алебастрового намета, как показано на рисунке 16.12, *а*.

По деревянным основаниям, покрываемым сухой штукатуркой, провода заделывают сплошным слоем алебастрового намета или между двумя слоями листового алебаstra (рис. 16.12, *б*).

Провода в полиэтиленовых или винипластовых трубах по несгораемым основаниям прокладывают в зазорах или бороздках и заделывают их цементным раствором или мокрой штукатуркой толщиной не менее 10 мм. Трубы можно временно закреплять алебастровым раствором (рис. 16.12, *в*).

Ответвления и соединения скрытых проводок выполняют в специальных коробках из изолирующего материала, которые устанавливают таким образом, чтобы их крышки находились в одной плоскости с поверхностью стены.

Трубы соединяют отрезками трубы большего диаметра (длиной 100...150 мм), а поверх наносят слой горячей заливочной массы и обматывают прорезиненной лентой. Трубы укладывают в каналы и борозды, выбитые в стене, затем помещение штукатурят. После того как штукатурка высохнет и из труб испарится влага (7...10 дней), в них вдувают тальк и затем при помощи сталь-

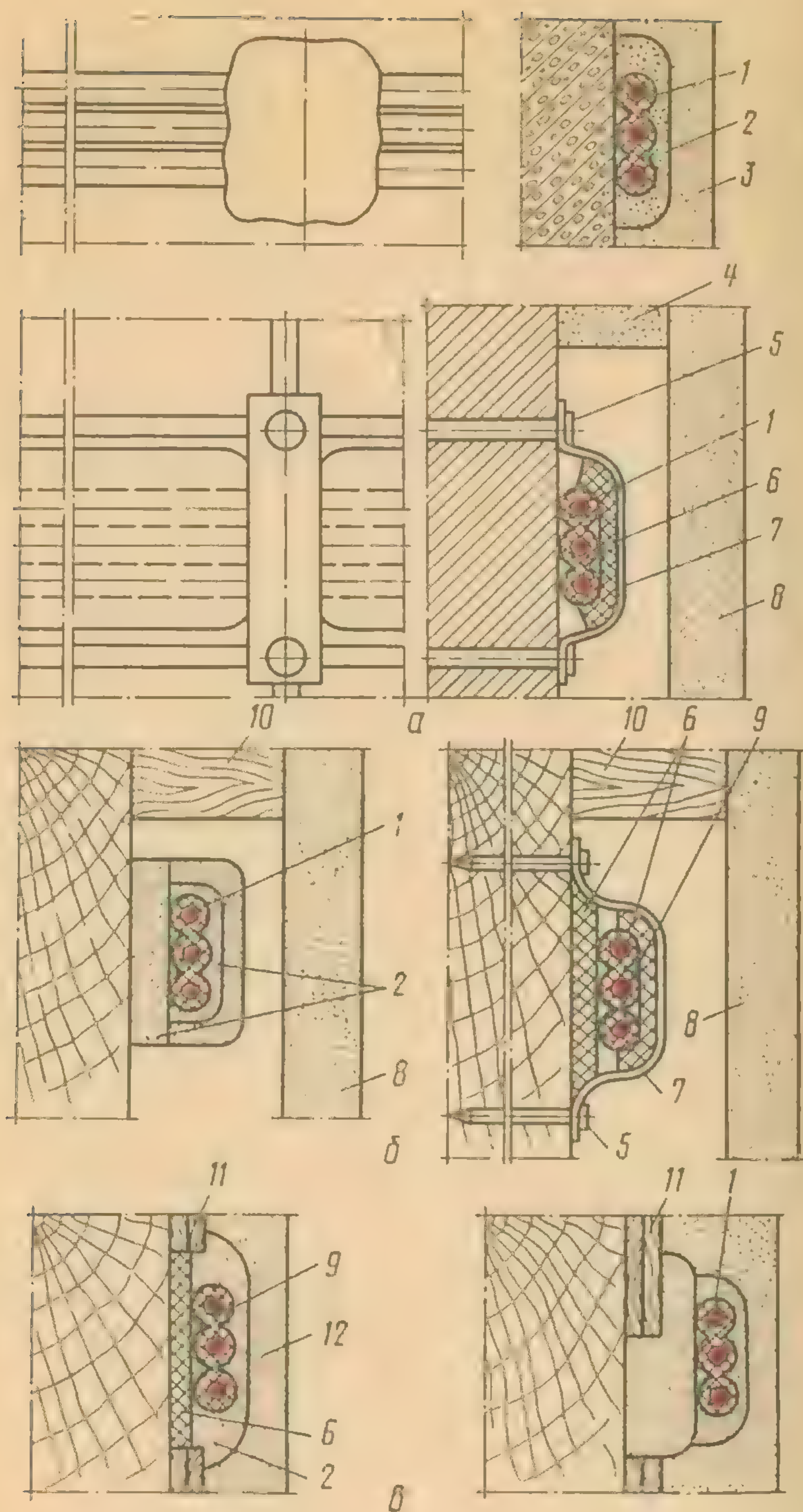


Рис. 16.12. Скрытая прокладка проводов:

а — марок АППВС, АПН, АПВ по негорючим основаниям под мокрой и сухой штукатуркой; б — тех же проводов по деревянным основаниям под сухой штукатуркой; в — по деревянным основаниям под мокрой штукатуркой; 1 — провод АППВС; 2 — алебастр; 3 — мокрая штукатурка; 4 — гипсовый намет; 5 — гвоздь; 6 — асбестовая прокладка; 7 — полоска; 8 — сухая штукатурка; 9 — провод АПН или АПВ; 10 — рейка; 11 — дрань штукатурная; 12 — мокрая штукатурка.

ной оцинкованной проволоки протягивают провода. Диаметр труб выбирают в зависимости от площади сечения проводов и их числа.

Следует помнить, что полиэтиленовые и винипластовые трубы нельзя прокладывать во взрывоопасных и пожароопасных помещениях.

Для прокладки трех проводов марок АПВ, АПР, АПРТО, АПРВ с площадью сечения до 6,10 и 16 мм² необходимы трубы с условным проходом 15, 20 и 25 мм соответственно.

Для питания электроприемников мощностью до 5 кВт применяются так называемые модульные линии, выполняемые в коробах и трубах, укладываемых в полу. Модульными они называются потому, что на них имеются подготовленные места для выполнения ответвлений к электроприемникам через каждые 2...3 м. Это расстояние (модуль) может быть и другим. В местах соединения модулей устанавливают коробки, на которые затем ставят колонки из труб для ответвления к электроприемникам. Коробки — стальные штампованные или литые алюминиевые или чугунные — устанавливают так, чтобы их крышки не выступали над полом. Ответвительные провода присоединяют к проводам линии без разрыва последних: зачищают изоляцию и накладывают ответвительный зажим. На одной модульной линии может быть 4...8 коробок.

При совместном заземлении трубы и коробки на конце трубы делают нарезку и снаружи и изнутри коробки навинчивают заземляющие гайки. Если коробка имеет патрубок с резьбой, то трубу ввинчивают в этот патрубок и заземляющие гайки не применяют.

Подпольные проводки в трубах — модульные сети — следует предусматривать только для общественных зданий и цехов промышленных предприятий, в которых требуются стерильные условия производства.

16.6. УСТАНОВКА ОСВЕТИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ, ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ И ГРУППОВЫХ ЩИТКОВ

Светильники выбирают в соответствии с характером помещения и видом выполняемых работ. На рисунке 16.13 показана установка светильников, когда проводки выполнены на изоляторах (а) и на роликах (б).

При установке влагозащищенных и пыленепроницаемых светильников провода вводят в них при помощи бюгелей с сальниками. В выключатели (рис. 16.13, в), штепсельные розетки и другие аппараты провода вводят снизу через патрубки с сальниками и устанавливают их на выносных скобках.

В сухих помещениях выключатели и штепсельные розетки, а также настенные патроны устанавливают на деревянных розетках диаметром 60...70 мм и крепят к ним шурупами. Деревянную розетку к стене привинчивают одним центральным шурупом. В сырых помещениях, а также при наружной установке полу-

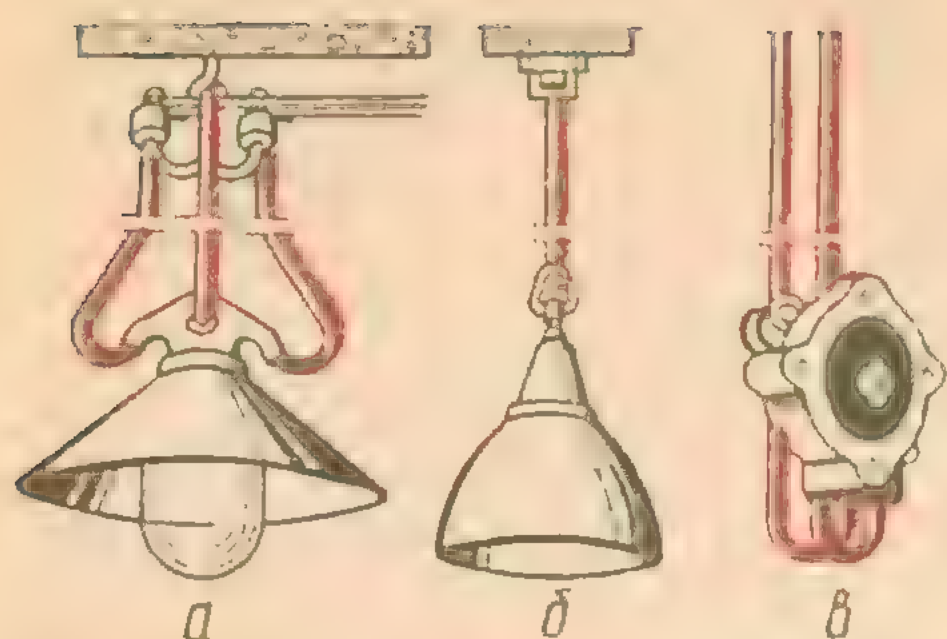


Рис. 16.13. Установка осветительной арматуры (а и б) и выключателя (в).

герметические выключатели укрепляют на роликах или непосредственно на стене. Выключатели устанавливают на высоте 1,5...1,7 м, а штепсельные розетки — на высоте 0,8...1,2 м.

Осветительную арматуру массой более 1 кг подвешивают к потолку на стальной проволоке диаметром 1...1,5 мм.

Щитки с предохранителями закрепляют на высоте 2,5...3 м от пола, а если на щитке расположены выключатели и рубильники, то на высоте 1,5...1,7 м.

Установочные плиты щитков изготовляют на мраморных, асбоцементных, деревянных панелях, укрепляемых на стене при помощи металлических каркасов.

На групповых щитках освещения вместо предохранителей размещают автоматы, рассчитанные на токи от 6 А и выше. Широко применяются и комплектные осветительные щитки (см. гл. 13).

Групповые осветительные щитки типа СУ-9400, предназначенные для защиты осветительных установок от перегрузок и коротких замыканий, а также для нечастых оперативных включений и отключений, выполняют со встроенными в них установочными автоматическими выключателями типов АЗ100 и АЕ1000. Число встроенных в щиток выключателей от 2 до 30. Расцепители выбирают на токи 15, 20, 30, 40, 50 А. Максимальная нагрузка на главные шины — до 150 А.

В квартирах или домах в сельской местности устанавливают щитки, на которых размещают: счетчик, предохранители, автоматы типа АЕ1000 или пробки-автоматы.

16.7. ПРОВОДКИ ВНЕ ПОМЕЩЕНИЙ И ВВОДЫ. ЗАЗЕМЛЕНИЯ В ПРОВОДКАХ

Проводки вне помещений могут быть проложены вдоль наружных стен зданий. Изоляторы укрепляют на крюках, заделываемых в гнезда цементным раствором. Обходы водосточных труб выполняют в полутвердых трубках с воронками по концам, в бороздах, пробитых в стенах.

Для ответвлений к вводам допускается применять неизолированные и изолированные провода в пролете до 10 м: медные с площадью сечения 4 мм², стальные и биметаллические диаметром 3 мм, алюминиевые и из его сплавов с площадью сечения 16 мм², самонесущие провода АВТ-1, АВТ-2 и другие с площадью сечения 4 мм². В пролете от 10 до 25 м наименьшие площади сечения и диаметры соответственно следующие: 6 мм², 4 мм, 16 мм² и 6 мм².

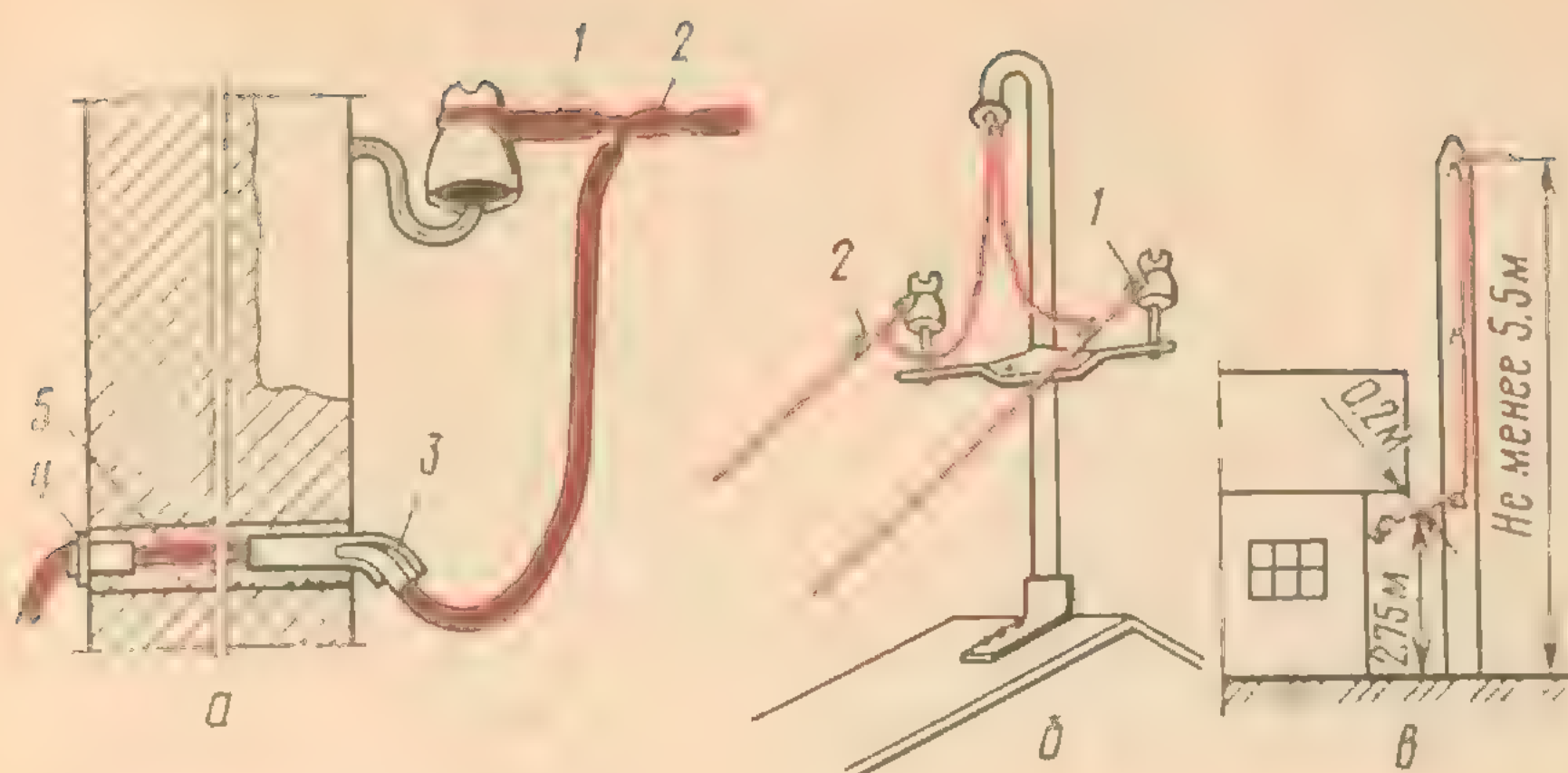


Рис. 16.14. Выполнение вводов в помещение:

а — через стену; б — через крышу; в — через стену в низкое помещение;
1 — заглушка; 2 — скрутка; 3 — воронка; 4 — втулка; 5 — резиновая трубка.

Вводы в здания выполняют изолированным проводом, который прокладывают в полутвердой трубке, и оконцовывают воронкой снаружи и втулкой (сухое помещение) или воронкой (сырое помещение) внутри помещения (рис. 16.14, а). Вблизи от ввода устанавливают изолятор, на котором провод со столба укрепляют заглушкой. Изолированный провод ввода соединяют с линейным проводом скруткой. Отверстие для проводов ввода может быть общим, но прокладывают их в отдельных трубах. Высота низшей точки подвеса линейных проводов над землей должна быть не меньше 2,75 м. Изолированные провода разрешается прокладывать на высоте 2,5 м от земли. Расстояние между проводами и выступающими частями зданий должно быть не менее 20 см.

Вводы в низкие дома выполняют в стальных трубах и прокладывают через крышу (рис. 16.14, б). Расстояние от проводов до крыши не должно быть менее 2 м. Стальную трубу соединяют с заземленным нулевым проводом.

В ряде случаев вводы в низкие помещения целесообразно делать с подставного столба, как показано на рисунке 16.14, в. Спуск по столбу в этом случае можно выполнить изолированным проводом на изоляторах или, что лучше, в стальной трубе. Во многих случаях на столбе в фазный провод ввода устанавливают грибообразные предохранители, плавкую вставку которых можно менять под напряжением.

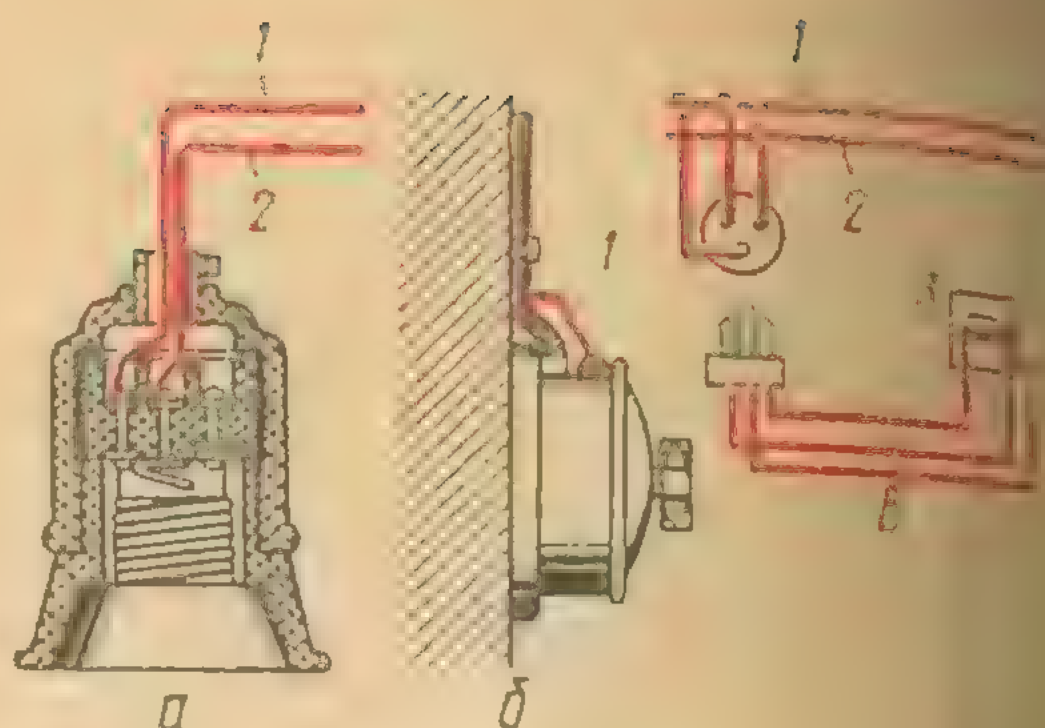
Для заземления (зануления) станин станков, корпусов электродвигателей, металлических частей арматуры, металлических корпусов выключателей и т.д. используют нулевой провод. На рисунке 16.15 показано, как следует присоединять металлический патрон (а) и корпус выключателя (б) к нулевому проводу. С нулевым проводом соединяют также трубы, свинцовые оболочки кабелей, металлические крышки групповых щитков и другие металлические части проводок.

Если корпус токоприемника металлический и соединяется с сетью

Рис. 16.15. Присоединение к нулевому проводу:

а — металлического патрона; *б* — корпуса выключателя; *в* — корпуса прибора; *1* — нулевой провод; *2* — фазный провод; *3* — прибор.

при помощи штепсельной розетки, то штепсель должен иметь третий стержень, который несколько длиннее двух остальных (рис. 16.15, *в*) и первым входит в соединение с заземленным проводом. С этим стержнем соединяют корпус энергоприемника.



16.8. СХЕМЫ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ЦЕПЕЙ

На рисунке 16.16, *а* приведена схема электрической проводки в трехкомнатном помещении. В комнате *I* установлены две электрические лампочки, которые одновременно включаются и выключаются общим выключателем. Принципиальная схема проводки в комнате *I* показана на рисунке 16.16, *б*.

В комнате *II* установлен переключатель на четыре переключения (рис. 16.16, *в*). В положении переключателя, указанном на схеме *в*, обе лампы включены. При первом повороте вправо обе лампы будут выключены, при втором — включена лампа *Л1*, а при третьем — лампа *Л2*. В комнате установлена штепсельная розетка.

В комнате *III*, имеющей два входа, установлено четыре лампы, которые зажигаются одновременно (рис. 16.16, *г*), и два выключателя. Любым из выключателей все лампы могут быть включены или выключены.

На рисунке 16.16, *д* приведена схема освещения, в которой лампы могут быть включены более чем из двух мест.

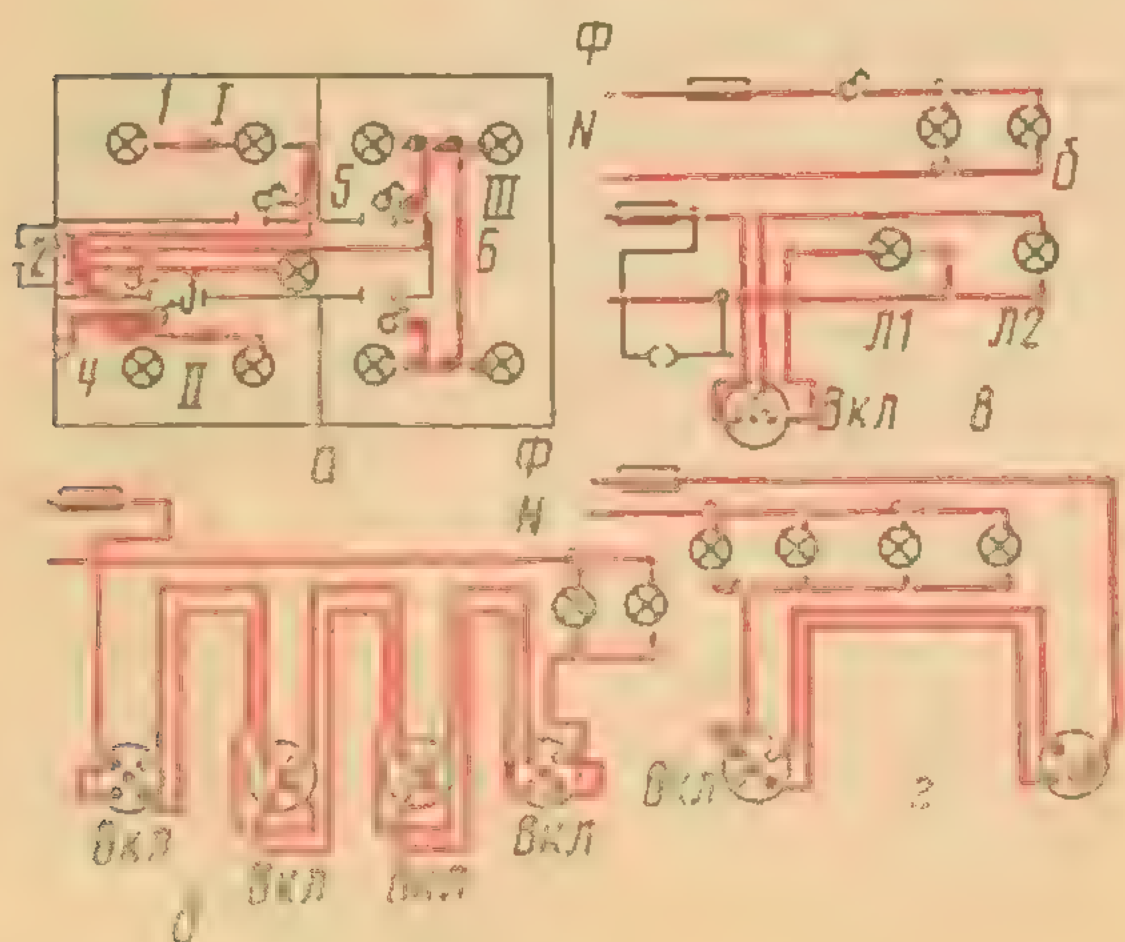


Рис. 16.16. Схемы осветительных проводок: *а* — план трехкомнатного помещения с осветительными проводками; *б* — схема одновременного включения и выключения ламп; *в* — схема с выключателем на 4 положения; *г* — схема с включением и выключением ламп из двух мест; *д* — схема включения и выключения более чем из двух мест; *1* — два провода в линии; *2* — квартирный осветительный прибор; *3* — выключатель однополюсный; *4* — штепсельная розетка; *5* — выключатель двухполюсный; *6* — три провода в линии; *Вкл* — выключатель.

При устройстве схем включения источников света следует не только стремиться к высокому качеству освещения, созданию комфортных условий для производительного труда, занятий, отдыха, но и предусматривать возможности максимальной экономии электрической энергии.

Искусственное освещение должно не заменять, а правильно дополнять освещение естественное, солнечное. В схемах должны использоваться также приборы для регулирования светового потока, в зависимости от характера деятельности в данный момент присутствующих световой поток может быть увеличен или уменьшен. Это позволяет экономить энергию так же, как и правильный выбор марок светильников, поддержание высокого уровня отражательной способности стен и потолков и т. д. Эти вопросы изложены в главах 23, 26 и 28.

~~Контрольные~~ вопросы и задания к главе 16. 1. Как выполняют открытую и скрытую прокладки внутри помещений? 2. Для чего предназначаются трос, струна, короб, лоток? 3. Расскажите о способах установки роликов и изоляторов. 4. Что вы знаете о прокладках, используемых в открытых и скрытых электропроводах? 5. Как выполняются ответвления и пересечения в открытых электропроводах? 6. Какие способы соединения и оконцевания проводов вы знаете? 7. Как прокладывают проводки по кирпичным и бетонным стенам? 8. Как устроить ввод в жилой дом? 9. Нарисуйте схему включения освещения из двух мест.

РАЗДЕЛ ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ТРЕТИЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Глава 17. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

17.1. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ И ОСНОВНЫЕ ТИПЫ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Устройство и принцип действия. Асинхронные электродвигатели — самые распространенные, надежные и простые в эксплуатации. Поэтому во всех случаях, когда это допустимо по условиям электропривода и нет необходимости в компенсации реактивной мощности, следует применять асинхронные электродвигатели переменного тока.

Электродвигатели постоянного тока рекомендуется применять лишь в тех случаях, когда требуется плавная регулировка скорости и асинхронный электродвигатель не обеспечивает требования технологического режима.

Когда необходима компенсация реактивной мощности, а мощность установки составляет 100 кВт и более (насосы, вентиляторы, компрессоры и т. д.), рекомендуется применять синхронные электродвигатели. Отказ от их применения должен быть обоснован технико-экономическим расчетом.

Трехфазный асинхронный электродвигатель, изобретенный в конце прошлого века русским ученым-электротехником М. О. Доливо-Добровольским, получил в настоящее время преимущественное распространение и в промышленности, и в сельском хозяйстве (около 95% всех двигателей — асинхронные).

Различают два основных вида асинхронных двигателей: с короткозамкнутым ротором и с фазным ротором.

Асинхронный короткозамкнутый электродвигатель (рис. 17.1, а) состоит из неподвижной части — статора 1 и подвижной части — ротора 2, вращающегося в подшипниках, укрепленных в двух щитах двигателя. Сердечники статора и ротора набраны из отдельных изолированных один от другого листов электротехнической стали. В пазы сердечника статора уложена обмотка, выполненная из изолированного провода. В пазы сердечника ротора (рис. 17.1, б) укладывают стержневую обмотку 9 или заливают расплавленный алюминий. Кольца-перемычки 10 накоротко замыкают обмотку ротора по концам. В пазах фазного ротора размещают обмотку, выполненную по типу обмотки статора. Концы обмотки подводят к контактным кольцам, укрепленным на валу. По кольцам скользят щетки, соединяющие обмотку с пусковым или регулировочным реостатом. По обмотке

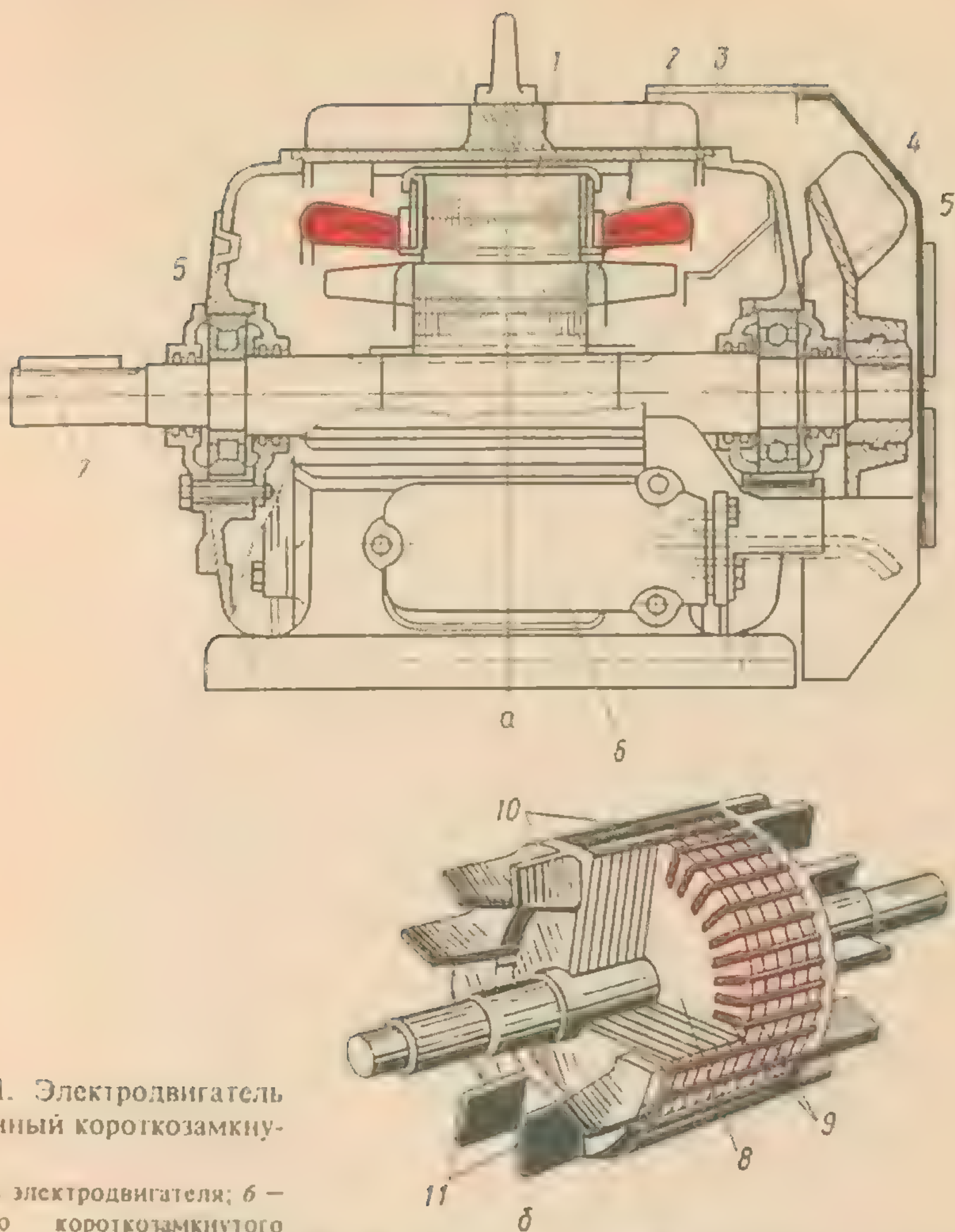


Рис. 17.1. Электродвигатель асинхронный короткозамкнутый:

а — разрез электродвигателя; б — устройство короткозамкнутого ротора; 1 — статор; 2 — короткозамкнутый ротор; 3 — обмотка статора; 4 — крыльчатка охлаждения; 5 — подшипниковый щит; 6 — место выводов от статорной обмотки; 7 — место посадки шкива на вал двигателя; 8 — сердечник ротора; 9 — стержни обмотки ротора; 10 — кольца, замыкающие стержни; 11 — лопасти охлаждения.

статора, включенной в трехфазную сеть, протекает ток, создающий вращающееся магнитное поле.

Магнитные силовые линии вращающегося поля статора пересекают стержни обмотки ротора и индуцируют в них электродвижущую силу. Под действием этой наведенной ЭДС в замкнутых накоротко стержнях ротора протекает ток. Вокруг стержней возникают магнитные потоки, создающие общее магнитное поле ротора, которое, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем статора, создает усилие, заставляющее ротор вращаться в направлении вращения магнитного поля статора.

Число пар полюсов и частота вращения. Чем быстрее вращается ротор, тем меньше индуцируемые в его обмотке токи и слабее сила взаимодействия между магнитными полями ротора и статора. С увеличением нагрузки частота вращения ротора снижается,

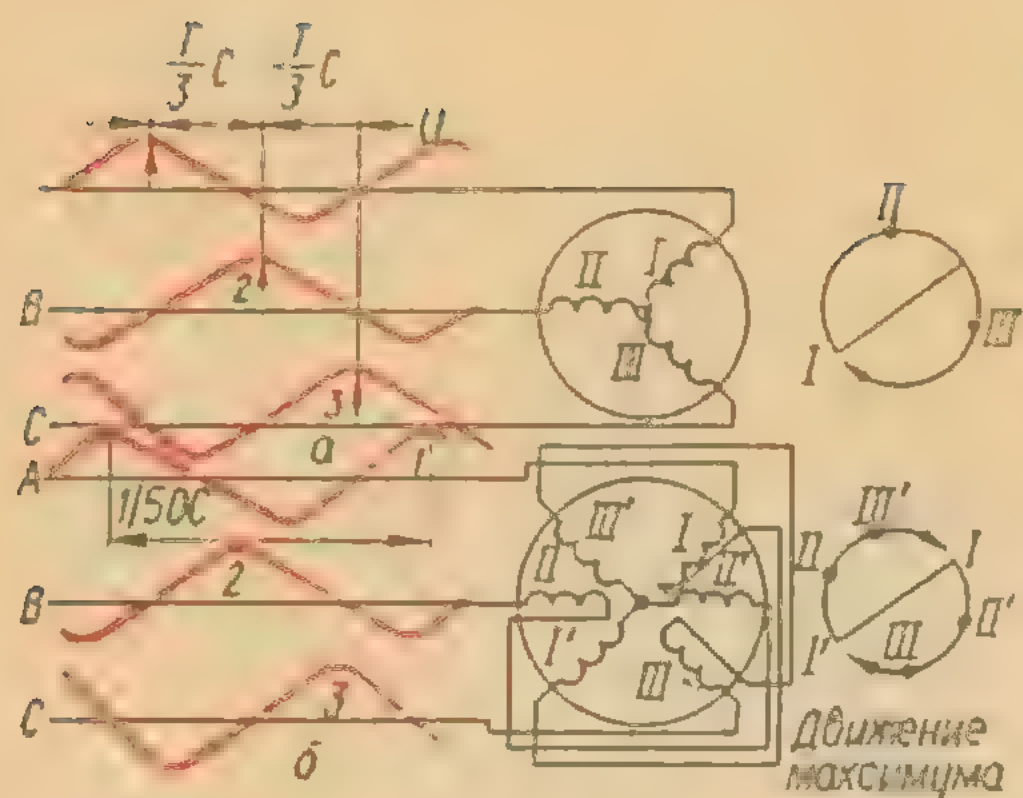


Рис. 17.2. Зависимость частоты вращения магнитного поля от числа пар полюсов на фазу: а — обмотка каждой фазы имеет одну пару полюсов; б — обмотка каждой фазы имеет две пары полюсов; I, II, III — фазные обмотки электродвигателя; A, B, C — фазы сети; T — период колебаний напряжения, равный 1/50 с.

индуктируемые в его обмотке токи; увеличиваются, возрастает вращающий момент.

Обмотка каждой из фаз может быть выполнена в виде одной

двух, трех или четырех катушек, каждая из которых представляет собой отдельный электромагнит или пару полюсов.

От числа пар полюсов зависит частота вращения магнитного поля. Предположим, каждая фаза имеет два полюса (то есть одну пару полюсов). В упрощенном представлении это означает, что обмотка каждой фазы выполнена в виде одной катушки. В этом случае (рис. 17.2, а) в течение одного периода максимум магнитного поля, перемещаясь от фазы к фазе, сделает один полный оборот. В момент времени 1 в обмотке I, включенной в фазу A, будет максимум магнитного поля, образованный положительным максимумом тока в этой фазе. В момент 2 положительный максимум тока соответствует фазе B и, следовательно, максимум магнитного поля будет в обмотке II, а в момент времени 3 — в обмотке III, включенной в фазу C. Затем этот положительный максимум переместится вновь в обмотку I. Таким образом, за один период колебания тока, то есть за 1/50 с, магнитное поле сделает один оборот, за 1 с — 50 оборотов, за 1 мин $50 \times 60 = 3000$ оборотов.

Рассмотрим теперь электродвигатель с четырьмя полюсами на фазу, то есть с двумя парами полюсов. В этом случае каждая фазная обмотка как бы состоит из двух катушек (рис. 17.2, б). В момент времени 1 максимум магнитного поля будет в одной (I) и второй (I') катушках обмотки, включенной в фазу A. Соответственно в моменты времени 2 и 3 максимум переместится в обмотки II и III, а в момент времени 4 он снова будет в обмотке I. Таким образом, за один период тока в сети максимум магнитного поля переместится всего лишь на 1/2 оборота, за 1 с он сделает 25 оборотов и за 1 мин $25 \times 60 = 1500$ оборотов. Частота вращения магнитного поля (мин⁻¹) может быть подсчитана по приведенной ранее формуле (6.5):

$$n_{\text{м.п.}} = 60f/p = 3000/p, \quad (17.1)$$

где f — частота ($f = 50$ Гц); p — число пар полюсов на фазу (число же полюсов равно $2p$).

У многоскоростных электродвигателей обмотка выполнена так, что ее можно переключать с одного числа полюсов на фазу на другое; кроме того, могут быть две автономные (не соединенные между собой) обмотки, причем каждая допускает переключение пар полюсов

Так, двухскоростные двигатели с числом полюсов 4/2; 8/4; 12/6 имеют по одной обмотке с переключением числа полюсов соответственно с 4 на 2, с 8 на 4 и с 12 на 6, трехскоростные с числом полюсов 6/4/2 и 8/6/4 — по две обмотки (только одна из них с переключением числа полюсов), четырехскоростные с числом полюсов 12/8/6/4 — две переключаемых обмотки.

Величина, которая характеризует отставание частоты вращения ротора от частоты вращения магнитного поля, называется *скольжением*. Ее обычно выражают в процентах и определяют так:

$$s = \frac{n_{м.п.} - n_{рот}}{n_{м.п.}}, \quad (17.2)$$

где s — скольжение, %; $n_{м.п.}$ и $n_{рот}$ — соответственно частоты вращения магнитного поля и ротора.

Для большинства двигателей скольжение находится в пределах от 2 до 10%. Если двигатель работает вхолостую, частота вращения ротора приближается к частоте вращения магнитного поля. При перегрузке частота вращения ротора уменьшается, а ток возрастает.

Паспорт электродвигателя. Основные сведения, которые должен знать электрик, чтобы организовать правильную эксплуатацию электродвигателя, указаны на заводском щитке машины (рис. 17.3). Для асинхронного электродвигателя указаны: товарный знак предприятия-изготовителя, тип двигателя, заводской номер, род тока, частота, число и схема соединения фаз, номинальные значения мощности, напряжения, тока, частоты вращения, коэффициента полезного действия, коэффициента мощности, напряжения и тока ротора (для двигателя с фазным ротором), год выпуска, масса машины, номер стандарта, класс изоляции или допустимое превышение температуры, режим работы.

Основные типы электродвигателей. В сельском хозяйстве наибольшее распространение нашли электродвигатели единых серий А, АО, А2, АО2, 4А. Буквенные обозначения двигателей единых серий расшифровываются так: А, А2, 4АН — двигатели с чугунным корпусом, защищенного исполнения; АО, АО2, 4А — с чугунным корпусом, обдуваемые (то есть закрытого исполнения с охлаждением обдуванием корпуса снаружи); АОЛ, АОЛ2, 4АХ — двигатели с алюминиевым корпусом, обдуваемые.

Серия электродвигателей А2, АО2, АОЛ2 имеет ряд преимуществ перед предшествующей ей серией А, АО, АОЛ: более высокие коэффициент полезного действия и коэффициент мощности, а следовательно, и меньшая масса на единицу мощности, меньшие габаритные размеры для той же мощности, установочные размеры соответствуют международным требованиям, используются более высокопрочные изоляционные материалы и лаки.

Двигатель асинхронный									
Тип	4А90Л4	N-9183							
	50 Гц	22 кВт	cos φ 0.85						
	1420 об/мин	Δ/Y 220/380 В	8.6/4.9 А						
КПД	80 %	21.5 кг	1971 г						
ГОСТ	183-66	Режим S1	кл. изол. В						

Рис. 17.3. Заводской щиток асинхронного электродвигателя с техническим паспортом.

Асинхронные двухскоростные электродвигатели серии 3А (ЗАН280Х6/24 и др.) предназначены для лифтов. Они имеют 6 и 24 полюса, мощность при переключении числа полюсов меняется у них так: с 7,1 на 1,8 кВт, с 10 на 2,5 кВт, и с 14 на 3,55 кВт.

Единая серия асинхронных электродвигателей 4А общего применения мощностью от 0,12 до 400 кВт, соответствующая по технико-экономическим показателям перспективному уровню мировой техники, предусматривает все необходимые народному хозяйству модификации основного исполнения по конструкции, по условиям окружающей среды, узкоспециализированные (в том числе сельскохозяйственного назначения) по исполнению, а также по способу монтажа.

В обозначении электродвигателей серии 4А буква Н означает степень защиты IP23. Если буква Н отсутствует, то исполнение по степени защиты IP44 или IP54. Следующая далее буква Р означает, что двигатель с повышенным моментом, а С — с повышенным скольжением; буква В означает встраиваемый, а Е — однофазный двигатель. Далее указывается высота оси вращения (мм). Буквы S, M, L указывают установочный размер по длине станины, а буквы А и В означают длину сердечника статора. Далее следует четная цифра (2, 4, 6, 8, 10, 12), указывающая число полюсов на фазу. Буква, следующая за числом полюсов, означает: Ш — малошумный, Б — со встроенной температурной защитой, Х — химостойкая изоляция, СХ — сельскохозяйственный и т. д. И, наконец, указывается климатическое исполнение (У, Т, ХЛ) и категория размещения (1, 2, 3, 4, 5).

В сравнении с двигателями серии А2 двигатели серии 4А характеризуются меньшими габаритными и установочными размерами и массой, большими пусковыми моментами, пониженными уровнями шума и вибраций, увеличенной надежностью, удобствами при монтаже и эксплуатации.

Промышленность выпускает специальные асинхронные электродвигатели сельскохозяйственного назначения на базе серий АО2, 4А и Д. Они также предназначены для работы при температуре окружающей среды до 40°C, но для них техническими условиями предусмотрена возможность работать при влажности до 90% (температура 20°C) и наличии в воздухе горячей смолистой или хлопьевидной пыли, а также паров аммиака (до 0,03 г/м³), сероводорода и углекислого газа (до 14,7 г/м³). Двигатели серии Д имеют шкалу мощностей от 0,25 до 4 кВт (0,25; 0,55; 0,75; 1,1; 1,5; 2,2; 3,0; 4,0 кВт). Сельскохозяйственные двигатели серии АО2 изготавливают 3...7 габаритов.

Конструктивно эти двигатели выполнены закрытыми обдуваемыми, химо-, влаго- и морозостойкими. Они дороже (на 50...80%), чем двигатели единой серии общего применения.

Сельскохозяйственные электродвигатели серии 4А влагоморозостойкого исполнения (IP44) предназначены для работы в среде с повышенной влажностью и на открытом воздухе, а химовлагодостойкие (IP55) — для животноводческих помещений.

Крупные асинхронные электродвигатели единой серии А2 АК2 13, 14, 15 габаритов имеют шкалу мощностей от 200 до 1250 кВт.

а двигатели серии АН и АНН (Н — нормального исполнения) 14, 15, 16 габаритов — от 200 до 2000 кВт. Эти электродвигатели с короткозамкнутым ротором предназначены для привода механизмов, не нуждающихся в регулировании частоты вращения (насосы, вентиляторы и др.). Электродвигатели с фазным ротором предназначены для привода механизмов с тяжелыми условиями пуска и механизмов, требующих регулирования частоты вращения.

Отдельной единой серией выпускаются малые электродвигатели: трехфазного тока напряжением 127/220 и 220/380 В, мощностью от 50 (АОЛЮ11) до 600 (АОЛ122) Вт на 3000 и 1500 мин⁻¹, а также однофазного тока мощностью от 18 (АОЛБО11) до 600 (АОЛБ32) Вт на 3000 и 1500 мин⁻¹.

В обозначении типа (серии) электродвигателя А и А2, кроме буквенных символов, после первого дефиса (короткой черточки) указано двузначное число и после второго — цифра. Число после первого дефиса обозначает типоразмер; первая цифра — порядковый номер наружного диаметра сердечника (габарит), а вторая — номер длины электродвигателя. После второго дефиса указано число полюсов на фазу.

Кроме указанных выше типов электродвигателей общего применения, промышленность изготавливает ряд модификаций: АОП — с повышенным пусковым моментом — для привода механизмов, отличающихся статической нагрузкой в момент пуска (подъемные механизмы); АОС (4АХС) — с повышенным скольжением — для привода механизмов, характеризующихся наличием относительно больших маховых масс и «ударным» характером нагрузки (поршневые компрессоры, кузнечно-прессовые машины и т. д.); АОТ — с повышенными энергетическими показателями — для текстильной промышленности и других предприятий, где ввиду непрерывной работы двигателя особенно важны высокие КПД и коэффициент мощности; АОК — с фазным ротором; многоскоростные — на две, три или четыре частоты вращения. Встраиваемые двигатели обозначают АОПВ, взрывозащищенные — ВАО и т. д.

17.2. СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В СЕТЬ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ «НАЧАЛ» И «КОНЦОВ» СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ

Обозначение выводов обмоток. Выводы обмоток электрических машин определенным, общепринятым образом маркируются. Так, у асинхронных трехфазных двигателей условные «начала» обозначают С1, С2, С3, а соответствующие им «концы» — С4, С5, С6. У многоскоростных двигателей первая обмотка обозначается как 1С1...1С6, а вторая — 2С1...2С6 и т. д. Выводы обмоток малых машин помечают краской: первую фазу — желтой, вторую — зеленой, третью — красной, а концы обмоток, кроме того, черной краской по основному цвету.

Обмотки трехфазного электродвигателя соединяют по двум схемам, получившим названия «звезда» и «треугольник».

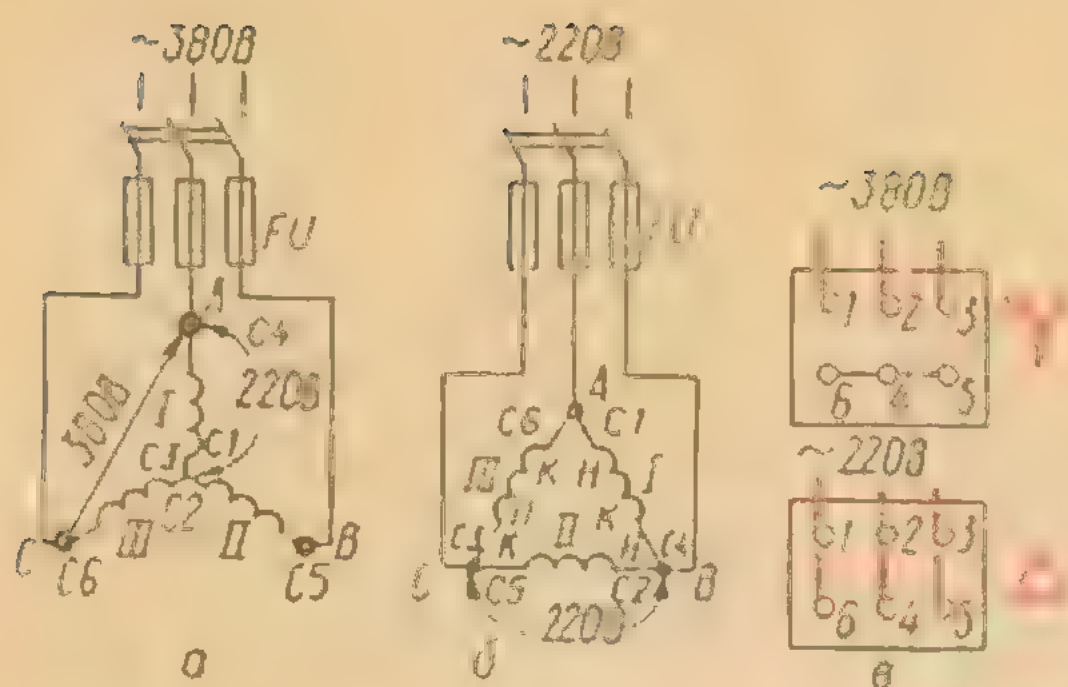


Рис. 17.4. Схема включения обмоток двигателя:

а — в звезду; б — в треугольник; в — исполнение схем «звезда» и «треугольник» на доске зажимов.

«треугольник», при которой конец первой фазной обмотки соединяют с началом второй, конец второй — с началом третьей, конец третьей — с началом первой, а общие точки подключают к фазам сети (рис. 17.4, б).

У большинства трехфазных асинхронных электродвигателей начала и концы обмоток выведены на клеммную доску таким образом, как это показано на рисунке 17.4, в. Тогда для соединения обмоток по схеме «звезда» надо замкнуть между собой три нижних или три верхних зажимов и подвести соответственно к трем верхним или к трем нижним зажимам фазы сети. Чтобы соединить обмотки по схеме «треугольник», следует по вертикали замкнуть каждую пару зажимов и к ним подвести напряжение сети.

Электромонтер должен знать, что если вместо схемы «треугольник» обмотки соединить по схеме «звезда», то электродвигатель может отдать только третью часть номинальной мощности. Если же двигатель при данном напряжении сети должен быть включен по схеме «звезда», то включать его в сеть по схеме «треугольник» нельзя: из-за перегрева обмоток будет повреждена изоляция и двигатель выйдет из строя.

Чтобы изменить направление вращения ротора, достаточно поменять местами две фазы сети.

Определение «начала» и «концов» обмоток. В практике, когда отсутствуют обозначения выводов, приходится опытным путем определять начала и концы обмоток.

Прежде всего при помощи контрольной лампы или других индикаторов находят пары выводов, принадлежащие отдельным фазным обмоткам. При этом к одному полюсу источника тока подключают один вывод обмотки, а к другому полюсу присоединяют провод от контрольной лампы или измерительного прибора (рис. 17.5). Затем концом второго

В паспорте электродвигателя указывают обычно два напряжения, например 127/220, 220/380 или 380/660 В. Если напряжение в сети совпадает с большим из напряжений, приведенных в паспорте электродвигателя, то обмотки соединяют в схему «звезда», показанную на рисунке 17.4, а. Для этого все три начала (концы) сводят в одну общую точку, а оставшиеся концы (начала) подключают к трем фазам сети.

Если напряжение в сети совпадает с меньшим из указанных в паспорте, то обращаются к схеме

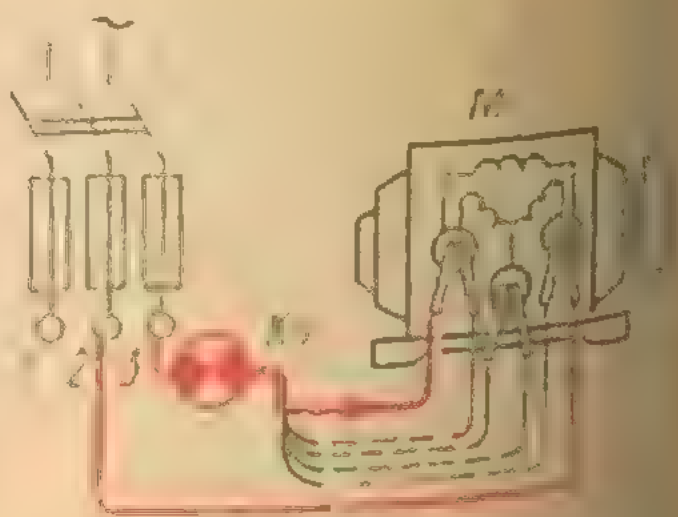


Рис. 17.5. Определение начала каждой из фаз обмотки при помощи контрольной лампы.

провода от контрольной лампы (прибора) поочередно касаются остальных выводов статорной обмотки. Лампа загорится, когда фазная обмотка замкнет цепь.

Каждую пару выводов, принадлежащих отдельным фазным обмоткам, каким-либо образом помечают.

После этого определяют согласованные выводы — начала и концы обмоток, пользуясь, как правило, одним из трех известных методов.

Метод трансформации заключается в том, что в одну из фазных обмоток (рис. 17.6, а) включают контрольную лампу *КЛ* (или прибор), а две других соединяют последовательно и включают в сеть 220 В. Когда конец одной из фаз окажется соединенным с началом другой, их общий магнитный поток будет направлен перпендикулярно плоскости обмотки третьей фазы и наведет в ней ЭДС, вызывающую свечение спирали лампы. Если свечение незаметно, можно применить в качестве индикатора вольтметр со шкалой до 30...60 В или лампу напряжением 127 В. Когда же в общей точке соединенных фаз окажутся два конца или два начала, как показано на рисунке 17.6, б, общий магнитный поток обмоток, направленный теперь вдоль плоскости обмотки третьей фазы, не наведет в ней ЭДС, что подтвердится отсутствием свечения спирали лампы или нулевым показанием вольтметра. В этом случае надо поменять местами выводы одной из фаз и включить схему снова.

Если лампа или вольтметр зафиксировали наличие напряжения в третьей обмотке, то помечают концы и начала двух соединенных последовательно обмоток (при этом совершенно безразлично, какой из встретившихся выводов обозначить началом, а какой — концом). Затем собирают схему, приведенную на рисунке 17.6, в; лампу (или вольтметр) включают на одну из двух обмоток с уже согласованными выводами, например в помеченную цифрой *I*, и приводят выводы обмотки *III* в соответствие с выводами обмотки *II*.

Источником тока может быть также аккумулятор или батарея сухих элементов. Тогда в качестве индикатора используют гальванометр (милливольтметр); предпочтителен прибор с нулевым отсчетом посредине шкалы. Схемы проверки аналогичны схемам, показанным на рисунке 17.6 с тем отличием, что подключение обмоток к аккумулятору (батарее) должно быть кратковременным (мгновенным, или, как говорят, «на искру»). При этом следует помнить, что в момент размыкания в обмотках может возникнуть импульсная ЭДС 200...300 В. Если в общей точке встретились условные начало и конец, то в момент замыкания и размыкания обмоток стрелка гальванометра отклоняется от начального положения. Направление отклонения в данном случае значения не имеет.

Методом подбора концов удобно пользоваться при определении начал и концов у двигателей мощностью до 3...5 кВт. По одному из

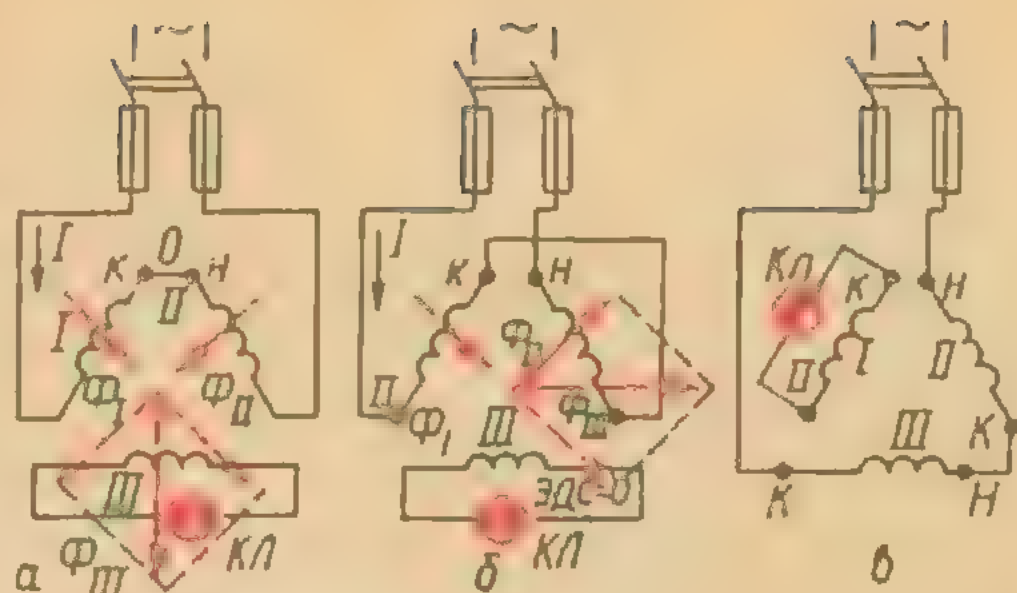


Рис. 17.6. Определение условных начал и концов обмоток методом трансформации.



Рис. 17.7. Определение условных начал и концов обмоток методом подбора:
а, б, в — варианты проб схемы «звезда».

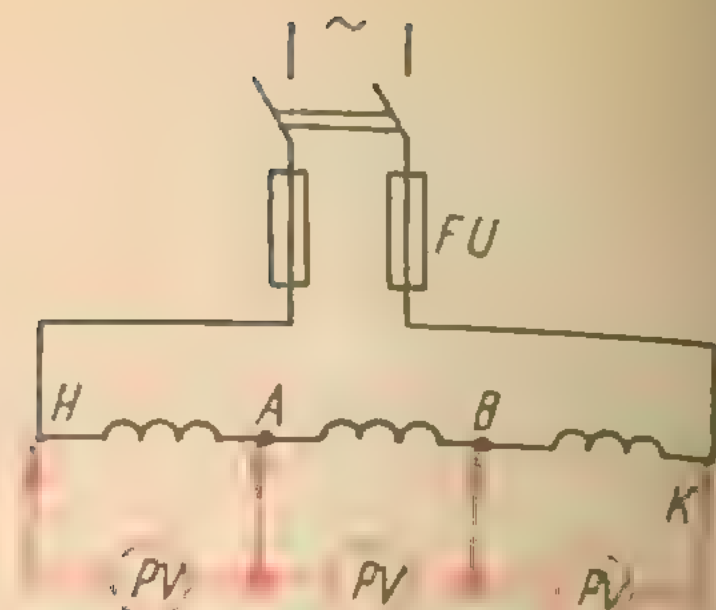


Рис. 17.8. Определение согласованных выводов методом сравнения напряжения в обмотках, включенных в открытый треугольник.

выводов от каждой обмотки соединяют в общую точку, а другие выводы включают в сеть. Если в общей точке оказались все три начала или конца, то электродвигатель будет работать нормально. Тогда выводы, подведенные к сети, помечают, например, как концы, а выводы, объединенные в общую точку, как начала.

Если в общей точке оказались, например, два начала и один конец (рис. 17.7, а), то электродвигатель сильно гудит, ротор его не сразу трогается с места и плохо вращается. В подобном случае не следует долго (более 2...3 с) держать двигатель включенным в сеть. После этого меняют местами выводы одной из фаз и снова включают в сеть (рис. 17.7, б). Если же и вновь схема не угадана, то выводы этой фазы возвращают на прежнее место и меняют местами выводы следующей (рис. 17.7, в) и т. д. Максимальное число проб в данном методе — три.

По третьему методу начала и концы обмоток определяют, собрав схему открытого треугольника (рис. 17.8). Если в точках А и В сошлись начало и конец, вольтметр показывает одинаковое напряжение на каждой обмотке. Когда одна из обмоток «перевернута», напряжение на ней будет несколько больше, чем на двух других.

17.3. СИЛА ТОКА, ПОТРЕБЛЯЕМОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ ИЗ СЕТИ. ПУСКОВОЙ ТОК И СПОСОБЫ ЕГО СНИЖЕНИЯ

Сила тока и мощность. Мощность, которую электродвигатель потребляет из сети при нормальной нагрузке на валу,

$$P_{\text{прис.н}} = P_{\text{н}} / \eta_{\text{н}} = \sqrt{3} U I_{\text{н}} \cos \varphi_{\text{н}}, \quad (17.3)$$

где $P_{\text{н}}$ — номинальная (эффективная) мощность электродвигателя, Вт; $\eta_{\text{н}}$ — номинальный КПД электродвигателя; U — напряжение сети, В; $I_{\text{н}}$ — номинальный ток электродвигателя, А; $\cos \varphi_{\text{н}}$ — номинальный коэффициент мощности.

В паспорте электродвигателя среди номинальных значений $P_{\text{н}}$, $U_{\text{н}}$, $\cos \varphi_{\text{н}}$ обычно приведены два значения номинального тока, например 13,8/8 А. Большой ток потребляется двигателем из сети

при включении обмоток по схеме «треугольник», то есть когда напряжение в сети соответствует меньшему из напряжений, указанных в паспорте (220 В), а меньший ток — при включении обмоток по схеме «звезда», когда напряжение в сети равно большему из указанных в паспорте значений (380 В). Мощность же, вычисляемая по формуле (17.3), остается постоянной, поскольку независимо от напряжения сети значение произведения UI_n в том и другом случае не изменяется.

Формулу (17.3) можно представить относительно I_n таким образом:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} U \cos \varphi_n} = \frac{P_{\text{приз.н}}}{\sqrt{3} U' \cos \varphi} \quad (17.4)$$

При холостом ходе потребляемая из сети мощность P_x значительно меньше номинальной мощности, так как ток холостого хода I_x меньше номинального тока I_n , ниже и значение $\cos \varphi_x$ по сравнению с $\cos \varphi_n$. Ток, потребляемый электродвигателем из сети, изменяется в весьма широких пределах.

Из формулы (17.3) следует также, что при перегрузке электродвигателя, когда $P_{\text{пер}} > P_n$, ток, потребляемый из сети, больше номинального. Вследствие этого происходит перегрев обмоток, что пагубно сказывается на состоянии их изоляции и может привести к выходу из строя электродвигателя в целом.

Подобное явление наблюдается и в случае, если при снятии номинальной мощности с вала снизится напряжение в сети. Например, уменьшение напряжения с 380 до 340 В (примерно на 10%) влечет за собой в этих условиях усиление тока приблизительно на 10%, что при достаточно длительной перегрузке может оказаться причиной значительного перегрева и порчи изоляции.

Таким образом, сила тока, потребляемого электродвигателем из сети, не остается постоянной, а меняется в зависимости от нагрузки.

При пуске двигателя этот ток, называемый пусковым, в существенной мере (в 5...8 раз) превышает номинальный, вызывая значительное уменьшение напряжения в сети, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на работе других электроприемников (снижается световой поток ламп накаливания, притормаживаются уже работающие электродвигатели, увеличивается потребляемый ими ток). На рисунке 17.9 приведены осциллограммы тока, потребляемого электродвигателем, и напряжения на его зажимах в момент пуска и подачи нагрузки. По осциллограммам можно определить продолжительность полного разбега, силу тока в момент пуска, при холостом ходе и нагрузке, степень снижения напряжения в момент пуска. Отклонения напряжения от номи-

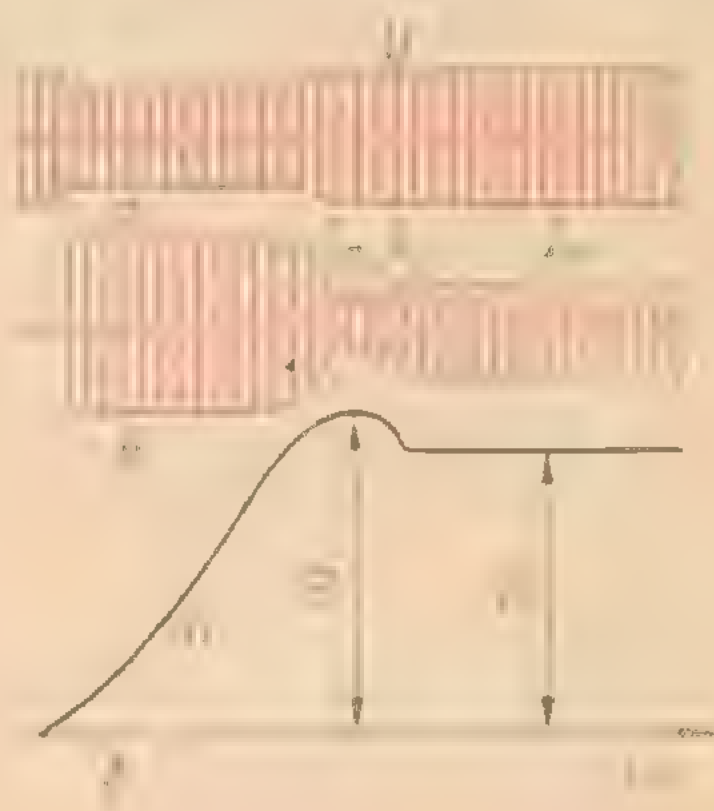


Рис. 17.9. Осциллограммы пускового тока I_n , тока I_x холостого хода, тока I_n номинальной нагрузки, напряжения на зажимах и частоты вращения n ротора электродвигателя.

нального значения будут тем большими, чем больше сопротивление (длина) линии от установки до источника тока (подстанции или электростанции).

Зависимость момента от напряжения. При затяжных (10...14 с) пусках в иных случаях работающие двигатели могут полностью затормозиться, так как момент на валу двигателя пропорционален квадрату напряжения: $M'/M_n = (U'/U_n)^2$. Например, при снижении напряжения на 30% (до 70% номинального) момент снижается на 51% и оказывается меньше момента сопротивления рабочей машины. При этом резко снижается частота вращения, возрастает потребляемый из сети ток и могут перегореть групповые предохранители и сработать на отключение автоматический выключатель.

Снижение пускового тока. Поскольку пусковые токи вызывают различные нарушения режима работы питающей сети и электроприемников, возникает необходимость их ограничения (уменьшения).

Наиболее простым способом снижения пускового тока является *пуск короткозамкнутого электродвигателя с переключением обмоток со звезды на треугольник*. Этот способ применим в тех случаях, когда напряжение сети соответствует меньшему из напряжений, указанных в паспорте, то есть когда электродвигатель при данном напряжении сети должен работать по схеме «треугольник». Например, если в паспорте указаны напряжения 660/380 В, а напряжение сети 380 В, то двигатель должен работать по схеме Δ . В момент же пуска на период разгона его включают по схеме Y . Благодаря этому на каждую из обмоток приходится напряжение не 380 В, а $380/\sqrt{3} = 220$ В. Потребляемый же из сети ток уменьшается при этом в 3 раза (пропорционально квадрату напряжения).

Снижение потребляемого из сети тока в 3 раза приводит к уменьшению развиваемой в момент пуска мощности также в 3 раза, то есть этот способ применим тогда, когда нагрузка на двигатель при пуске не превышает $1/3 P_n$.

Переключение обмоток электродвигателя со звезды на треугольник осуществляется при помощи специального переключателя 3Т («звезда» — «треугольник»). На рисунке 17.10 приведена схема пуска электродвигателя по этому способу. В нижнем положении переключателя 3Т обмотки электродвигателя включены звездой, так как все три начала (С1, С2, С3) замкнуты в общую точку, а к концам подведено напряжение сети. Ножи переключателя держат в нижнем положении до тех пор, пока двигатель полностью не закончит разбег (3...10 с). Затем ножи быстро, не давая ротору потерять частоту вращения, переводят в верхнее положение, соответствующее соединению обмоток статора треугольником.

Двигатель с фазным ротором. Для запуска рабочих машин, требующих длительного разгона при полной нагрузке (перегрузке), в условиях соблюдения режима работы и ограничения пусковых токов, то есть там, где способ переключения со звезды на треугольник неприменим, используют трехфазные асинхронные электродвигатели с фазным ротором, о которых уже упоминалось ранее. Такие двигатели

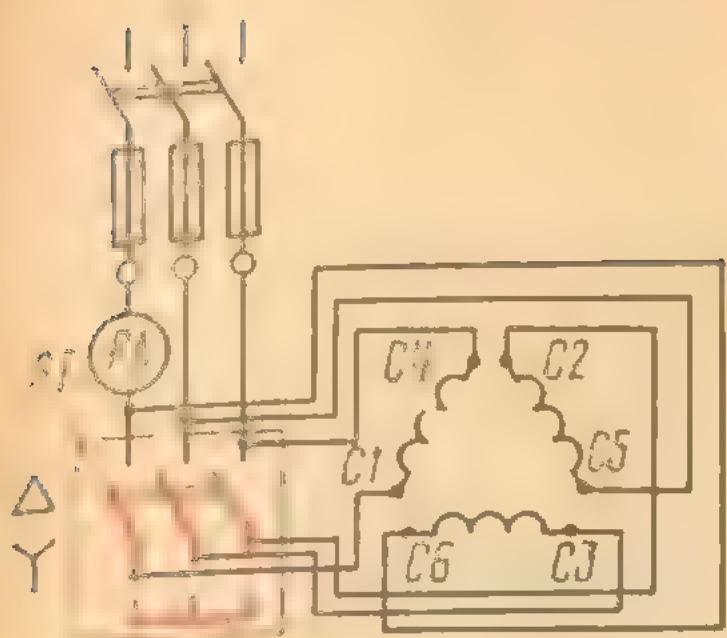


Рис. 17.10. Схема пуска трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором методом переключения обмоток со звезды на треугольник.

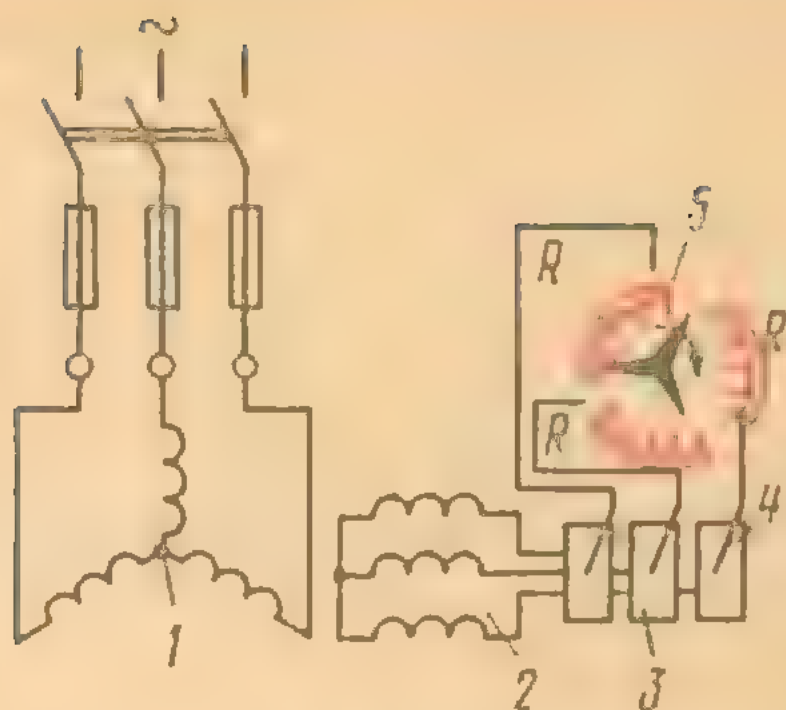


Рис. 17.11. Схема включения трехфазного асинхронного электродвигателя с фазным ротором:

1 — статор; 2 — ротор; 3 — кольцо; 4 — щетка; 5 — трехфазный реостат.

тели называют также двигателями с контактными кольцами (серия АК).

В момент включения электродвигателя в сеть (рис. 17.11) сопротивления реостата полностью введены в цепь обмотки ротора. Поэтому ток в его цепи, возникающий под действием наводимой в обмотке ротора ЭДС, снижается. Уменьшается и ток в обмотке статора (в сети).

Операции при пуске двигателя с фазным ротором следующие:

1) проверяют, лежат ли щетки на кольцах и введен ли реостат (рукоятка реостата должна быть поставлена в положение «пуск»);

2) включают статорную обмотку в сеть и постепенно, по мере увеличения частоты вращения ротора, выводят реостат до положения «работа» (обмотка ротора замкнута накоротко, двигатель работает как короткозамкнутый).

Чтобы остановить двигатель, отключают обмотку статора от сети, вслед за этим подготавливают реостат к следующему пуску, повернув его рукоятку против часовой стрелки до отказа (положение «пуск»).

Двигатели единой серии с фазным ротором изготовляют мощностью от 2,2 до 100 кВт.

Основное преимущество этих двигателей по сравнению с короткозамкнутыми в том, что пусковые токи всего в 1,2...2,5 раза больше номинальных. Однако они дороже короткозамкнутых двигателей примерно на 35%, менее надежны и долговечны и требуют более квалифицированного обслуживания. Следует помнить, что по окончании пуска реостат нужно вывести (отключить), так как он не рассчитан на рабочий режим и может выйти из строя.

17.4. ЧАСТОТА ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ. МОЩНОСТЬ И КПД ДВИГАТЕЛЯ. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ

Частота вращения ротора, которую двигатель развивает при номинальных значениях мощности и напряжения, указывается в паспорте двигателя.

Коэффициент полезного действия из формулы (17.3)

$$\eta = \frac{P_{\text{н}}}{P_{\text{прис}}} = \frac{P_{\text{н}}}{\sqrt{3} UI \cos \varphi} \quad (17.5)$$

Значение КПД указано в паспорте двигателя.

Мощность приблизительно прямо пропорциональна силе тока, потребляемой из сети. Если мощность, то есть нагрузка двигателя, возрастет, то увеличится сила тока. А чем больше ток, тем сильнее нагревается электродвигатель. Нельзя перегружать двигатель до такой степени, чтобы его нагрев превысил допустимый и вызвал порчу изоляции обмоток. Если указанная в паспорте мощность может быть получена при окружающей температуре, равной 40°C , то допустимая нагрузка может меняться в некоторых пределах в зависимости от изменения окружающей температуры, как это показано ниже

Температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$	40	45	50	55
Нагрузка, % от $P_{\text{н}}$	100	95	87,5	75

Коэффициент мощности — это отношение активной мощности P (Вт), расходуемой на полезную работу, нагрев стали и обмоток двигателя, механические потери, к полной мощности S (В · А), потребляемой двигателем из сети:

$$\cos \varphi = P/S = \frac{UI_{\text{а}}}{UI} = \frac{I_{\text{а}}}{I} \quad (17.6)$$

где $I_{\text{а}}$ — активный ток, пропорциональный нагрузке двигателя; $I = \sqrt{I_{\text{р}}^2 + I_{\text{а}}^2}$ — полный ток, потребляемый двигателем из сети и расходуемый на образование магнитного поля, нагрев двигателя и преодоление нагрузки на двигатель; $I_{\text{р}}$ — реактивный, или намагничивающий, ток двигателя.

Соотношения между полным, активным и реактивным токами в зависимости от нагрузки двигателя можно проанализировать при помощи векторной диаграммы (рис. 17.12).

Значение реактивного или намагничивающего тока $I_{\text{р}}$ в зависимости от нагрузки почти не меняется. Активный же ток пропорционален нагрузке двигателя. Поэтому значение коэффициента мощности в значительной мере зависит от нагрузки. Так, при холостом ходе $\cos \varphi = 0,2 \dots 0,3$, а при номинальной нагрузке $\cos \varphi = 0,7 \dots 0,95$ (большие значения $\cos \varphi$ относятся к двигателям большей мощности). На рисунке 17.12 видно, что, если двигатель работает на холостом ходу ($I_{\text{х}}$), угол φ — максимальный, а $\cos \varphi$ — минимальный. С ростом нагрузки увеличивается сила активного тока и уменьшается угол φ .

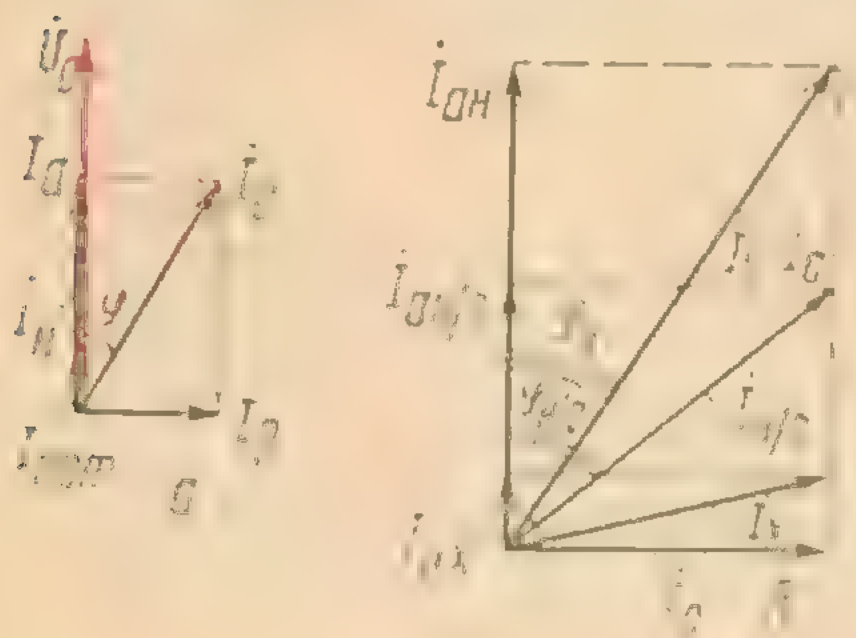


Рис. 17.12. Векторная диаграмма токов, потребляемых электродвигателем из сети (а) и изменения угла φ в зависимости от нагрузки на электродвигатель (б):

$I_{\text{н}}$ — ток при полной нагрузке; $I_{\text{н}/2}$ — ток при половинной нагрузке; $I_{\text{х}}$ — ток холостого хода.

следовательно, возрастает $\cos \varphi$. Для рассматриваемых на диаграмме положений: холостой ход I_0 , половина номинальной нагрузки $I_{н/2}$ и номинальная нагрузка $I_n \cos \varphi_x < \cos \varphi_{н/2} < \cos \varphi_n$.

Предположим, что для привода машины электродвигатель выбран правильно. Мощность, которую требует машина, обеспечивается силой активного тока $I_{ан}$. Этому режиму соответствуют полный ток I_n , потребляемый из сети, и коэффициент мощности $\cos \varphi_n$.

Если для этой машины взять электродвигатель мощностью, в несколько раз большей, чем требуется, сила реактивного тока будет примерно во столько же раз выше, чем в предыдущем случае. Сила потребляемого из сети полного тока во втором случае будет значительно больше, чем в первом, а $\cos \varphi$ — значительно меньше.

Если сила тока, потребляемого из сети, увеличится в 2 раза, то потери в линии возрастут в 4 раза, так как потери определяются как $I^2 R$, где I — сила тока в сети R — сопротивление каждого из проводов. Этот ток вызывает потери также в трансформаторе и генераторе. Мощность источника электроснабжения используется при этом нерационально.

Для стимулирования борьбы на предприятиях за высокий $\cos \varphi$ стоимость электроэнергии поставили в зависимость от его значения. Например, если $\cos \varphi$ больше 0,9, электроэнергию отпускают по более дешевой цене. Если же $\cos \varphi$ меньше 0,9, стоимость энергии возрастает по мере его снижения (см. также п. 6.12).

На векторной диаграмме можно также показать различие между коэффициентом мощности и коэффициентом полезного действия. Так, если $\cos \varphi$ есть отношение I_a / I_c , то КПД

$$\eta = \frac{I_a}{I} = \frac{I_a}{I_a + I_{пот}}, \quad (17.7)$$

где $I_a = I_n + I_{пот}$, то есть активный ток равен сумме токов, расходуемых на полезную нагрузку (I_n) и тепловые потери ($I_{пот}$).

17.5. ВРАЩАЮЩИЙ МОМЕНТ ДВИГАТЕЛЯ. УСИЛИЕ НА ВАЛУ

По паспортным данным электродвигателя можно определить его вращающий момент и усилие, развиваемое на шкиве. На рисунке 17.13 показано, каким образом приложено усилие в виде пары сил F к вращающемуся шкиву радиусом r . Вращающий момент $M_{вр}$ — мера этого усилия, изменяющего угловую скорость

$$\omega = 2\pi n / 60, \quad (17.8)$$

где n — частота вращения двигателя, мин^{-1} .

Между мощностью двигателя P (Вт), угловой скоростью ω (рад/с), силой F (Н), радиусом шкива r (м) и вращающим моментом $M_{вр}$ (Н·м) существует следующая зависимость:

$$M_{вр} = P / \omega = Fr. \quad (17.9)$$

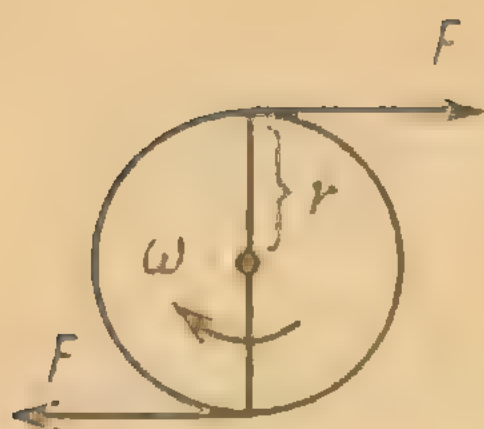


Рис. 17.13. Пара сил, действующих на шкив двигателя.

Подставив в формулу (17.9) значение угловой скорости ω из выражения (17.8), получим:

$$M_{вр} = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{60P}{2\pi n} = 9,554 \frac{P}{n}. \quad (17.10)$$

Вращающий момент асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором изменяется в зависимости от частоты вращения ротора по кривой, показанной на рисунке 17.14, где отмечены три значения вращающего момента двигателя: номинальный вращающий момент M_n , развиваемый двигателем в номинальном режиме работы; пусковой вращающий момент $M_{пн}$, соответствующий условиям пуска ($n=0$); максимальный вращающий момент $M_{мах}$, развиваемый двигателем при частоте вращения, меньшей номинальной, называемой критической ($n_{кр}$).

Максимальный момент определяет перегрузочную способность электродвигателя. При перегрузке, большей максимального момента, двигатель, снижая частоту вращения ($n < n_{кр}$), входит в неустойчивый режим работы и останавливается. Устойчивый режим работы двигателя в области от $n_{м.п.}$ до $n_{кр}$ можно восстановить, лишь сняв часть нагрузки со шкива. Пусковой вращающий момент характеризует способность двигателя брать нагрузку с места, а максимальный вращающий момент — способность двигателя преодолевать временные перегрузки при работе.

В каталожных данных на двигатели обычно заданы отношения $M_{пн}:M_n$ и $M_{мах}:M_n$. Для большинства асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором отношение пускового момента к номинальному составляет 1,1...1,5. У отдельных двигателей оно равно 1,9...2, а у двигателей типа АОС и АОП — 2,3...2,8. Отношение максимального момента к номинальному для разных типов асинхронных двигателей находится в пределах от 2 до 3 и несколько более, то есть электродвигатель способен преодолевать двукратные, трехкратные и даже большие временные перегрузки. Это отношение и есть перегрузочная способность асинхронного электродвигателя — одно из его достоинств.

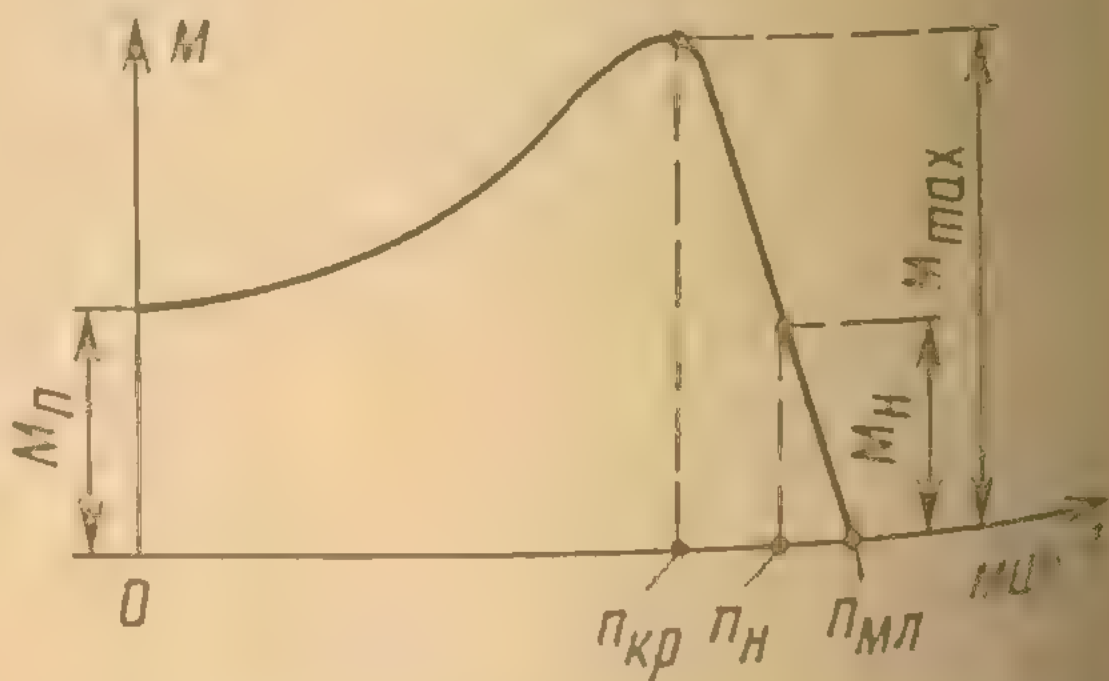


Рис. 17.14. Изменение момента асинхронного двигателя в зависимости от частоты вращения.

Пример 17.1. Найти номинальный, пусковой и максимальный вращающие моменты для двигателя А02-51-2 мощностью $P = 10$ кВт с частотой вращения $n = 2930$ мин⁻¹. Из каталога известно, что $M_n : M_H = 1,6$, а $M_{max} : M_H = 3,1$. Определить также силу F , обеспечиваемую двигателем на шкиве радиусом $r = 0,2$ м и на шкиве радиусом $r = 0,1$ м.

Решение: Номинальный вращающий момент

$$M_H = 9554 \frac{P}{n} = 9554 \frac{10}{2930} = 32,6 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой вращающий момент

$$M_n = 1,6 M_H = 1,6 \cdot 32,6 = 52,1 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Максимальный вращающий момент

$$M_{max} = 3,1 M_H = 3,1 \cdot 32,6 = 101 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Сила F при радиусе шкива 0,2 м

$$F_{0,2} = M_H / r = 32,6 / 0,2 = 163 \text{ Н}.$$

Сила при радиусе шкива 0,1 м

$$F_{0,1} = 32,6 / 0,1 = 326 \text{ Н}.$$

17.6. ОДНОФАЗНЫЕ АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ. ВКЛЮЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ОДНОФАЗНУЮ СЕТЬ

Простейший двигатель. Схема включения в сеть простейшего однофазного асинхронного электродвигателя изображена на рисунке 17.15, а. В пазах статора такого электродвигателя уложена одна рабочая обмотка 1, а ротор выполнен так же, как и ротор трехфазного двигателя.

Магнитное поле статора, образованное протекающим по обмотке однофазным током, носит не вращающийся, как в трехфазном асинхронном двигателе, а пульсирующий характер. Подобное поле не может создать сил, способных вывести ротор из неподвижного состояния, «развернуть» его. Если же при помощи посторонней силы толкнуть ротор в любом направлении, то он начнет разбег и в дальнейшем будет вращаться в нормальном рабочем режиме в заданном направлении.

Двигатель с пусковой обмоткой. Чтобы однофазный асинхронный электродвигатель смог самостоятельно начать разбег в заданном направлении, на статоре, кроме рабочей обмотки 1, укладывают также и вспомогательную обмотку 2 (рис. 17.15, б). По такой схеме включаются, например, электродвигатели серии АОЛБ, 4АХУТ, 4АХУ, А, ДАО, ДХО и др.

Выходы обмоток однофазного электродвигателя обозначают следующим образом: основная — С1 — С2, пусковая — П1 — П2. В малых машинах концы обмоток иногда помечают краской: начало и конец главной обмотки соответственно красной и красной с черной; вспомогательной — синей и синей с черной, а вывод от общей точки — черной.

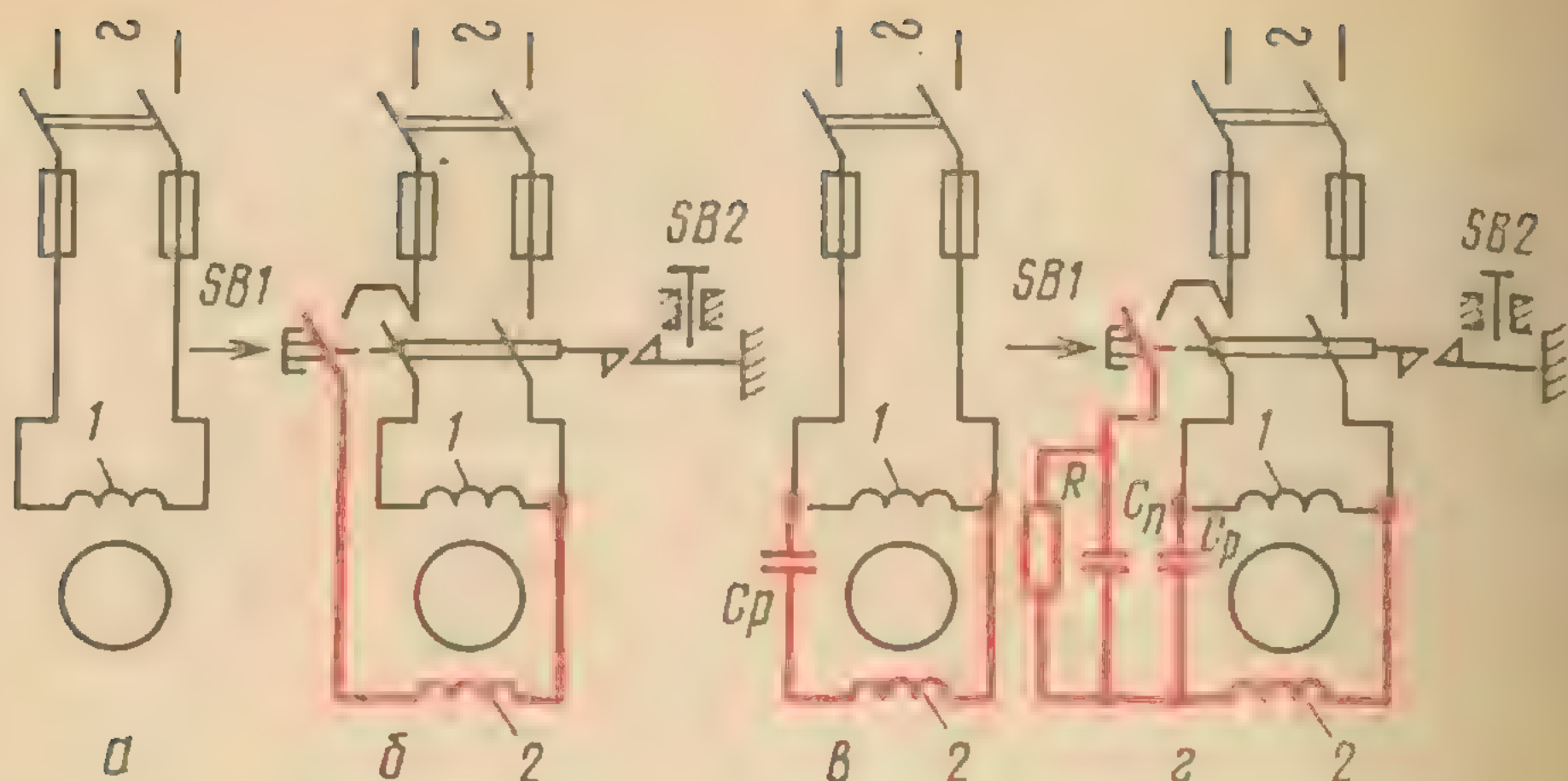


Рис. 17.15. Схемы включения однофазного асинхронного электродвигателя.

В момент пуска при нажатии кнопки *SB1* включаются основная и вспомогательная обмотки и создают вращающееся магнитное поле, которое приводит ротор двигателя во вращение. Вспомогательная обмотка, обладающая малым сопротивлением и потребляющая большой ток, не рассчитана на длительное включение. Поэтому по окончании процесса пуска (при отпускании кнопки *SB1*) пусковая обмотка отключается. Включенной в сеть остается только одна рабочая обмотка, обеспечивающая в дальнейшем нормальный двигательный режим.

Конденсаторный двигатель. В цепь вспомогательной обмотки в целях повышения пускового момента может быть включено активное, индуктивное или емкостное сопротивление. Наиболее эффективно включение в цепь пусковой обмотки конденсатора. Такой электродвигатель называют *конденсаторным* (рис. 17.15, в).

Пусковой момент и коэффициент мощности конденсаторного электродвигателя значительно больше тех же величин двигателя с активным или индуктивным сопротивлением в цепи вспомогательной обмотки.

Значение емкости конденсатора C_p выбирают таким, чтобы ток во вспомогательной обмотке был сдвинут по фазе относительно тока в рабочей обмотке на угол, близкий к $\pi/2$. Тогда максимум магнитного поля наступает в обмотках неодновременно и поле имеет явно выраженное направление вращения.

Двигатель с пусковым конденсатором. Для того чтобы создать повышенный пусковой момент, в ряде случаев применяют также и пусковой конденсатор C_n (рис. 17.15, г). Постоянно включенным его держать нельзя, так как через пусковую обмотку в таком случае проходит большой ток. Поэтому после разбега электродвигателя пусковой конденсатор отключают. Двигатель с постоянно включенной емкостью (рис. 17.15, в) позволяет получить пусковой момент, равный 45...50% номинального. Когда же требуется пусковой момент, превышающий 50% номинального, следует применять пусковой конденсатор.

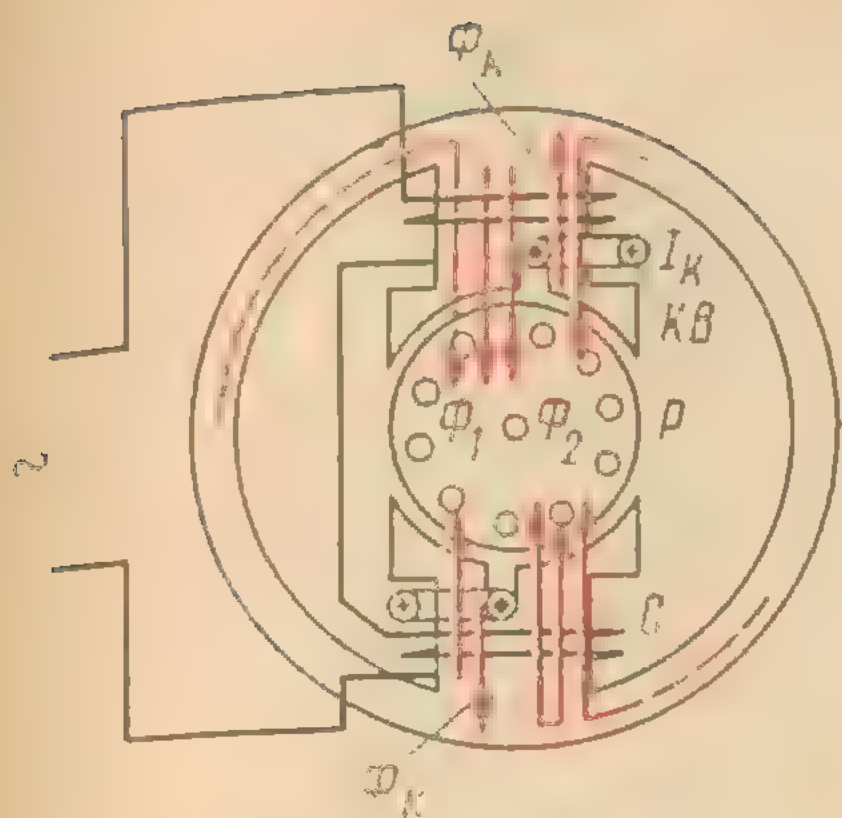


Рис. 17.16. Однофазный двигатель с расщепленными полюсами:

C — обмотка статора; P — короткозамкнутая обмотка ротора; KV — короткозамкнутые витки; Φ_K — магнитный поток короткозамкнутых витков; Φ_1 и Φ_2 — сдвинутые в пространстве и во времени магнитные потоки, образующие пусковой и вращающий моменты

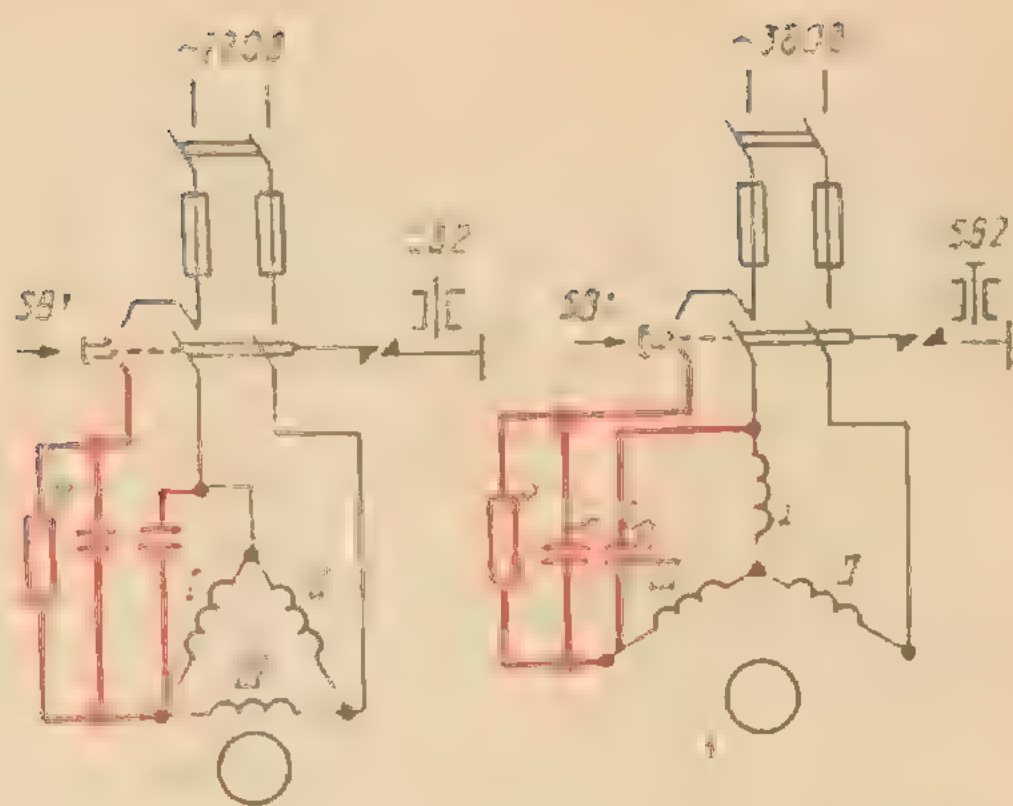


Рис. 17.17. Схемы включения трехфазного электродвигателя напряжением 380/220 В в однофазную сеть напряжением 220 В (а) и 380 или 440 В (б).

Для изменения направления вращения однофазного двигателя достаточно поменять местами концы одной из его обмоток — основной или вспомогательной.

Двигатель с расщепленными полюсами. В однофазных асинхронных электродвигателях мощностью до 100 Вт с целью создания пускового момента используют так называемые *расщепленные полюса* (рис. 17.16).

Полюса статора таких двигателей разрезаны (расщеплены) на две части, и на одной из них уложен короткозамкнутый виток. Магнитное поле, охватывающее короткозамкнутый виток, индуцирует в нем ток I_K , который создает свое магнитное поле, сдвинутое по фазе относительно основного поля и ослабляющее его в части полюса, охваченной витком. В двигателе образуется вращающееся эллиптическое поле, создающее вращающий момент постоянного направления.

Включение трехфазного двигателя в однофазную сеть. В случае необходимости в однофазную сеть можно включить трехфазный электродвигатель. Если напряжение однофазной сети равно 220 В, в то время как в паспорте двигателя указаны напряжения 220/380 В, то в качестве основной обмотки используется одна из фазных обмоток, а две другие исполняют роль пусковой (рис. 17.17, а). Если же напряжение сети 380 или 440 В, двигатель включают по схеме, показанной на рисунке 17.17, б. В качестве основной обмотки используются две фазные обмотки (I и II), соединенные последовательно.

В цепь пусковой обмотки трехфазного двигателя, работающего в однофазном режиме, целесообразно включать конденсатор.

Полезная мощность, развиваемая электродвигателем, составляет 50...60% его мощности в трехфазном режиме.

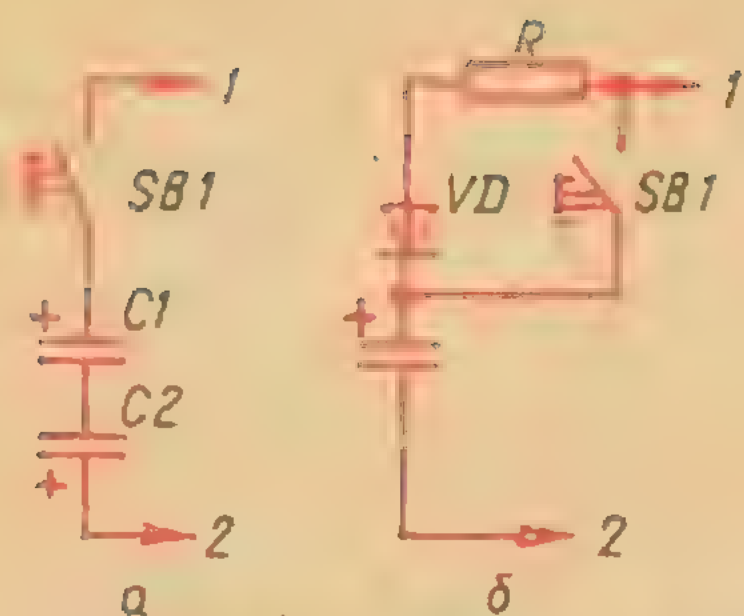


Рис. 17.18. Схемы включения полярных электролитических конденсаторов в качестве пусковых:
1 — к сети; 2 — к пусковой обмотке.

Выбор конденсаторов. Ниже приведены минимальные значения емкостей, которые следует применять при пуске трехфазных электродвигателей различных мощностей в однофазном режиме и которые могут быть оставлены включенными в процессе работы.

Мощность трехфазного электродвигателя, кВт	0,4	0,6	0,8	1,1	1,5	2,2
Минимальная емкость (мкФ) при включении двигателей в однофазную сеть напряжением:						
220 В	40	60	80	100	150	230
380 В	24	36	48	66	90	130

Для пуска под нагрузкой емкость должна быть увеличена в 2...3 раза по сравнению с указанной, но после пуска дополнительную емкость обязательно отключают.

В качестве пусковых и рабочих используют конденсаторы БГТ, ЭП, К42-19ПВ, К50-19, МБГЧ на рабочее напряжение не менее 500 В. В качестве только пусковых можно использовать и полярные электролитические конденсаторы с рабочим напряжением не менее 450 В при условии кратковременного включения. Для большей надежности их соединяют по схеме, показанной на рисунке 17.18, а. Общая емкость при этом равна $C/2$. При включении по схеме, приведенной на рисунке 17.18, б, после разгона конденсатор остается включенным в сеть через диод VD и резистор R , и в процессе работы эта емкость обеспечивает некоторое увеличение момента двигателя.

Пусковые конденсаторы должны быть зашунтированы резистором 200...500 кОм, так как после пуска на конденсаторах остается электрический заряд, который и разряжается через резистор.

Промышленность выпускает однофазные асинхронные двигатели мощностью от нескольких десятков до нескольких сотен ватт для привода различных устройств, механизмов, электроинструментов. Недостатки этих двигателей — сложность изготовления, относительно высокая стоимость, низкие значения КПД и $\cos\varphi$ — ограничивают сферу их применения.

17.7. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Частоту вращения асинхронных электродвигателей можно регулировать тремя способами: используя источник питания с изменяющейся частотой и напряжением, применяя двигатель с фазным ротором

с специальным пуско-регулирующим (усиленным) реостатом и изменяя число пар полюсов обмотки статора.

Для плавного пуска, регулирования частоты вращения и торможения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором выпускаются тиристорные преобразователи частоты. Диапазон регулирования частоты от 5 до 60 Гц, регулирование напряжения — от нескольких вольт до номинального — 230 или 400 В и т. д. Мощность таких преобразователей (типа ТПЧ) от 10 до 100 кВт.

У двухскоростных двигателей обмотка каждой фазы состоит из двух одинаковых частей, в одной из которых направление тока меняется при переключении частей обмоток с параллельного соединения на последовательное. Принцип изменения числа пар полюсов поясняется рисунком 17.19. Когда обе части обмотки фазы соединены последовательно (рис. 17.19, а), как показывает направление тока в витках, число пар полюсов $p = 2$. При параллельном соединении частей обмоток (рис. 17.19, б) число пар полюсов $p = 1$.

В практике используются следующие схемы переключения (рис. 17.20), со звезды (а) на двойную звезду (б) и с треугольника (в) на двойную звезду (г).

Если обозначить мощность, которую потребляет двигатель при соединении звездой, P_1 , мощность при соединении двойной звездой P_2 , допустимый ток I_n и принять, что $\cos \varphi_1 = \cos \varphi_2$, то

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{3I_n - \frac{U}{\sqrt{3}} \cos \varphi_1 \eta_1}{3 \cdot 2I_n - \frac{U}{\sqrt{3}} \cos \varphi_2 \eta_2} = \frac{1}{2}. \quad (17.11)$$

Отношение моментов

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{P_1 n_2}{P_2 n_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2}{1} = 1. \quad (17.12)$$

Следовательно, при этом способе регулирования частоты вращения момент остается постоянным.

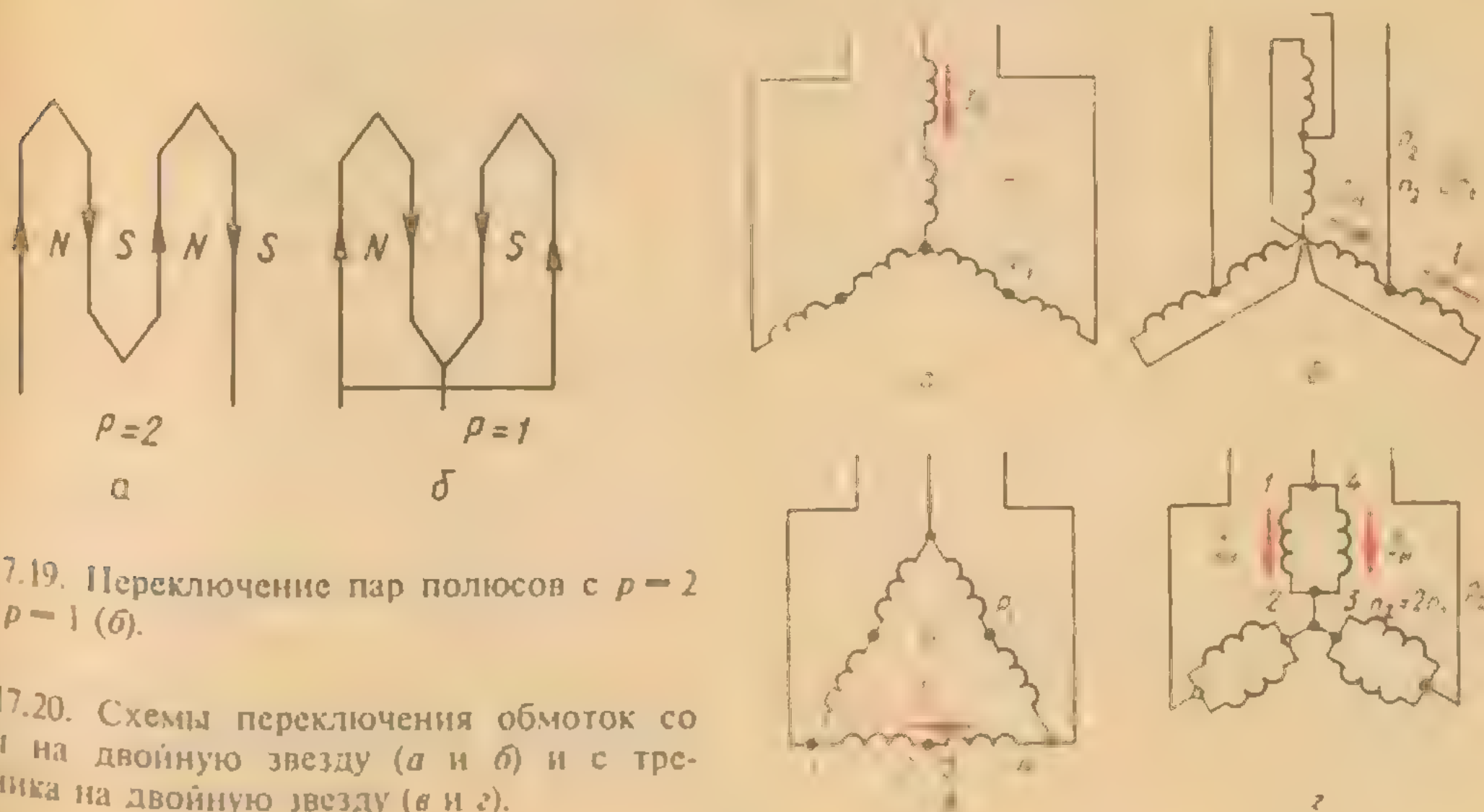


Рис. 17.19. Переключение пар полюсов с $p = 2$ (а) на $p = 1$ (б).

Рис. 17.20. Схемы переключения обмоток со звезды на двойную звезду (а и б) и с треугольника на двойную звезду (в и г).

Если обозначить мощности, которые потребляет электродвигатель при соединении обмоток треугольником, P_1 , а при соединении двойной звездой — P_2 , получим:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{3I_n U \cos \varphi_1 \eta_1}{3 \cdot 2I_n \frac{U}{\sqrt{3}} \cos \varphi_2 \eta_2} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,86. \quad (17.13)$$

Значит, при подобном способе регулирования мощность изменится на 14%, а момент в $\sqrt{3}$ раз.

Таким образом, можно заключить, что схему переключения со звезды на двойную звезду целесообразно применять там, где частота вращения регулируется при постоянном моменте, например в подъемных механизмах, а схему переключения с треугольника на двойную звезду — там, где требуется постоянная мощность (например, в приводе металлообрабатывающих станков).

Регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей позволяет существенно расширить сферу их применения. Поэтому, несмотря на сложность их конструкции, увеличенные габаритные размеры и сравнительно большую стоимость, отечественная промышленность выпускает многоскоростные асинхронные двигатели на различные пределы изменения частоты вращения.

В обозначении двух-, трех- и четырехскоростных двигателей серии АО2 приводятся соответственно две, три или четыре цифры, указывающие на число пар полюсов. Так, частота вращения двухскоростного двигателя АО2-11-4/2 мощностью 0,43 кВт в зависимости от схемы соединения составляет 1400 или 2700 мин⁻¹. Двигатель АО2-31-6/4/2 рассчитан на три частоты вращения: 960 мин⁻¹ при мощности 0,75 кВт, 1455 мин⁻¹ при 0,9 кВт, 2875 мин⁻¹ при 1,2 кВт. Четырехскоростной двигатель АО2-61-12/8/6/4 характеризуется следующими данными:

Частота вращения, мин ⁻¹	460	910	690	1410
Номинальная мощность, кВт	1,6	3,2	3,2	5,0

Промышленность изготавливает многоскоростные двигатели с еще более широким диапазоном регулирования частоты вращения.

17.8. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В сельском хозяйстве из специальных сравнительно мощных электродвигателей наиболее широкое распространение получили погружные водозаполненные трехфазные асинхронные электродвигатели типа МАПЗ, МАПЗм, ПЭД, ПЭДВ с короткозамкнутым ротором.

Двигатель МАПЗ-14-34/2 (2,5 кВт, 2880 мин⁻¹) предназначен для привода насосов серии АПВ (артезианский погружной высоконапорный) и ЭПВ (электрический центробежный водоподъемный). Внутренняя полость электродвигателя заполнена водой, которая используется в качестве смазки подшипников скольжения (выполнены из текстолита) и в качестве охлаждающей среды.

Корпус двигателя заполняют чистой водой перед погружением в скважину. Через фильтр в корпусе верхнего подшипника вода может совершать естественную циркуляцию. Двигатель рассчитан на работу в воде, температура которой не более $+15^{\circ}\text{C}$, не содержащей агрессивных растворов (щелочей и кислот) и механических примесей.

Двигатель МАПЗм-21,9-64/2 (35 кВт, 2880 мин^{-1}) конструктивно выполнен аналогично описанному выше.

Погружные трехфазные электродвигатели ПЭДВ (мощностью 2,8; 4,5; 5,5; 8; 11; 22; 45; 65 кВт) в отличие от двигателей серии МАП полностью герметизированы. Для предотвращения попадания внутрь двигателя механических примесей и для компенсации изменения объема чистой воды, находящейся в его полости, служат эластичные диафрагмы.

Для работы на электродождевальных машинах фронтального применения (ЭДМФ) типа «Кубань», для привода их ходовой части с тяжелыми условиями пуска и частыми включениями разработаны электродвигатели 4АБАР90ЛА4 и 4АБАР90ЛБ4. Они имеют защиту от воздействия водяных струй во время полива, а также от различных атмосферных воздействий при хранении. Их мощность, соответственно 0,75 и 1,1 кВт, кратность пускового момента 3,8, кратность максимального момента 4,2. Расчетный срок службы 12 лет.

К двигателям специального назначения могут быть отнесены и однофазные асинхронные электродвигатели небольшой (1...150 Вт) мощности (п. 17.6).

Они используются главным образом в бытовых приборах (например, ДАО — в стиральных машинах, ДХМ-3 — в холодильниках, КД-2 и КД-II — в магнитофонах), в лабораторной практике (например, КД-50 — в осциллографах Н-102 и Н-105), в разнообразных ручных электроинструментах и т. п.

Двигатель однофазный конденсаторный двухскоростной на 2900 и 425 мин^{-1} с повышенным пусковым моментом (3,2 и 2,1 от M_n) типа ДАСМ-2 предназначен для привода бытовых автоматических и полуавтоматических стиральных машин имеет мощность соответственно 120 и 60 Вт.

Двухскоростной реверсивный конденсаторный электродвигатель 4АУТ80В2/16 с числом полюсов $2p = 16$ (режим стирки и полоскания) и $2p = 2$ (режим отжима) также используется в стиральных машинах.

17.9. РАБОТА АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ В ГЕНЕРАТОРНОМ РЕЖИМЕ

Если отключенный от сети асинхронный двигатель привести во вращение от какого-либо первичного двигателя, то в соответствии с принципом обратимости электрических машин при достижении синхронной частоты вращения на зажимах статорной обмотки под действием остаточного магнитного поля образуется некоторая ЭДС. Если теперь к зажимам статорной обмотки подключить конденсатор С (рис. 17.21), то в обмотках статора потечет опережающий

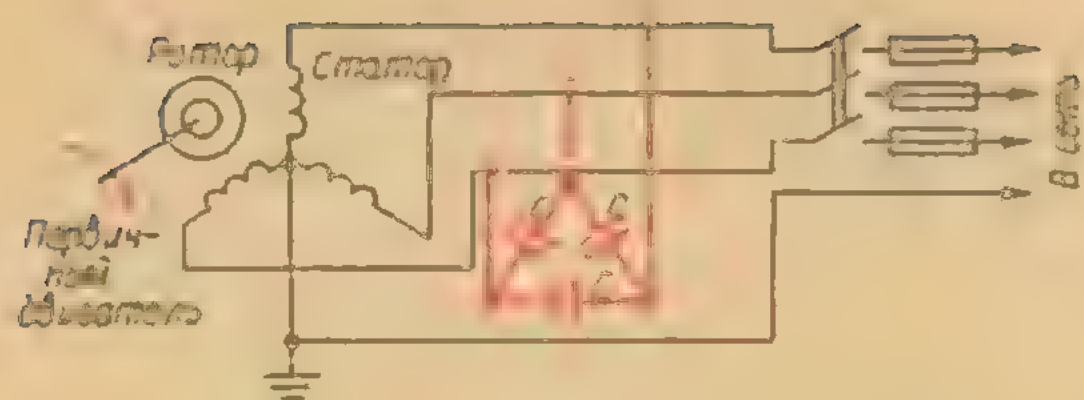


Рис. 17.21. Схема включения асинхронного генератора (асинхронного двигателя в режиме генератора).

емкостный ток, являющийся в данном случае намагничивающим. Под его действием по принципу самовозбуждения будет расти генерируемая ЭДС. Значение этой ЭДС зависит в конечном счете от характеристики машины и емкости конденсаторов. Таким образом асинхронный двигатель может быть превращен в асинхронный генератор.

Можно подобрать емкость так, чтобы номинальное напряжение и мощность асинхронного генератора равнялись соответственно напряжению и мощности при работе его в качестве электродвигателя.

В таблице 17.1 приведены емкости конденсаторов для возбуждения асинхронных генераторов (380 В, 750...1500 мин⁻¹).

Здесь реактивная мощность Q определена по формуле

$$Q = 0,314 U^2 C 10^{-6}, \quad (17.14)$$

где C — емкость конденсаторов, мкФ.

Как видно из приведенных данных, индуктивная нагрузка на асинхронный генератор, понижающая коэффициент мощности, вызывает резкое увеличение потребной емкости. Для поддержания напряжения постоянным с увеличением нагрузки необходимо увеличивать емкость конденсаторов, то есть подключать дополнительные конденсаторы.

Частота вращения асинхронного генератора в нормальном режиме должна превышать асинхронную на 5...10%.

В качестве асинхронного генератора может быть использован обычный асинхронный электродвигатель без каких-либо переделок. В случае параллельной работы с синхронным генератором нет необ-

17.1. Выбор емкости конденсаторов к асинхронным генераторам

Мощность генератора, кВт · А	Холостой ход		Полная нагрузка			
	емкость, мкФ	реактивная мощность, квар	$\cos \varphi = 1$		$\cos \varphi = 0,8$	
			емкость, мкФ	реактивная мощность, квар	емкость, мкФ	реактивная мощность, квар
2,0	28	1,27	36	1,63	60	2,72
3,5	45	2,04	56	2,54	100	4,53
5,0	60	2,72	75	3,40	138	6,23
7,0	74	3,36	98	4,44	182	8,25
10,0	92	4,18	130	5,90	245	11,1
15,0	120	5,44	172	7,80	342	15,5

ходимости в синхронизации и применении конденсаторов. Но использовать асинхронные генераторы мощностью выше 15...20 кВ · А нецелесообразно.

17.10. УСТРОЙСТВО АСИНХРОННЫХ МУФТ СКОЛЬЖЕНИЯ

Асинхронные, или электромагнитные, муфты скольжения применяются в тех установках, где требуется получить плавное изменение частоты вращения.

Якорь 2 электромагнитной муфты скольжения (рис. 17.22, а) по устройству напоминает короткозамкнутый ротор и может быть выполнен с короткозамкнутой обмоткой в виде беличьего колеса или в виде массивного стального сердечника. Второй основной частью электромагнитной муфты является индуктор 3, в пазах которого уложена обмотка, питаемая постоянным током.

При вращении ведущей части муфты, соединенной с приводным двигателем, индуктор наводит в якоре токи, магнитные потоки которых взаимодействуют с магнитным полем индуктора и создают вращающий момент. Таким образом, ведущая часть муфты увлекает ведомую, передающую движение производственному механизму (машине). При этом скольжение зависит от сопротивления якоря, интенсивности магнитного поля индуктора (определяется силой тока, регулируемого реостатом в обмотке индуктора) и нагрузочного момента. На рисунке 17.22, б показаны механические характеристики муфты, причем каждая из них приведена для определенного тока возбуждения индуктора (в % от номинального).

Система с электромагнитной муфтой может обеспечить диапазон плавного изменения частоты вращения в пределах примерно 10 : 1.

Мощности приводов, для которых можно использовать асинхронную электромагнитную муфту, колеблются от нескольких десятков ватт до нескольких тысяч киловатт.

Достоинства электропривода с электромагнитной муфтой — плавность изменения скорости и удобство управления; основной недостаток — низкий КПД электропривода в целом (определяется произведением КПД двигателя и КПД самой муфты и составляет примерно 50%).

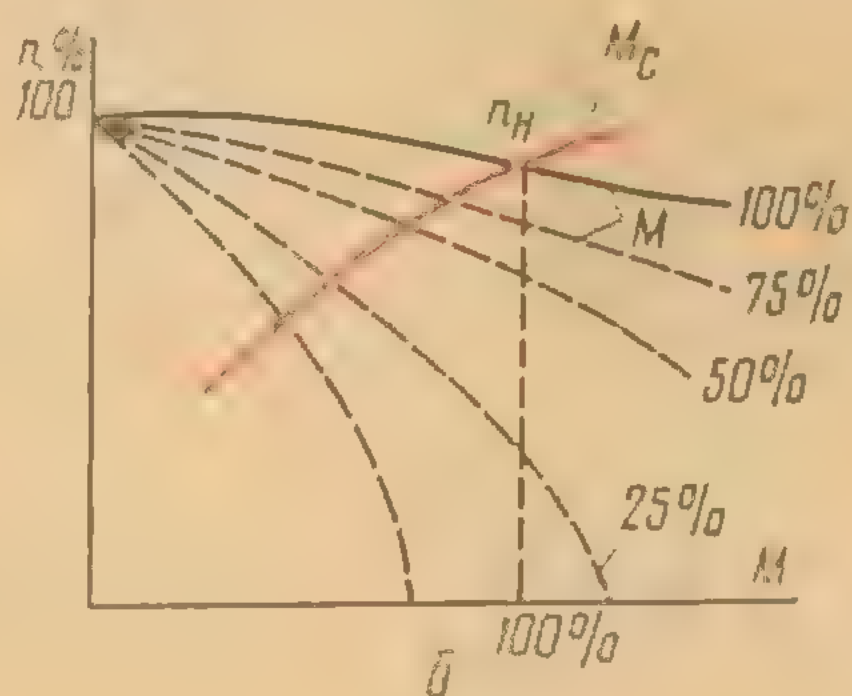
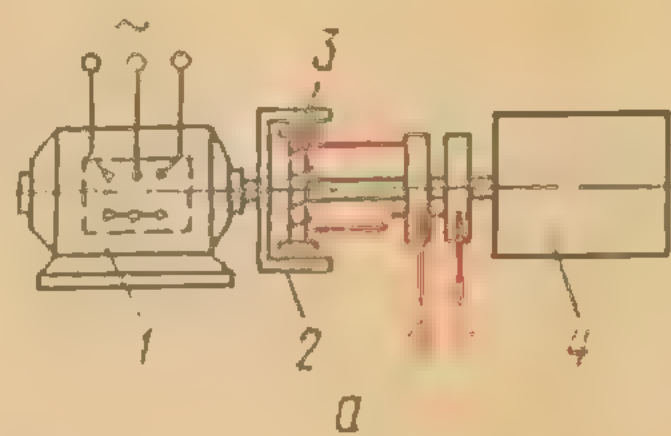


Рис. 17.22. Электромагнитная муфта скольжения (а) и ее механические характеристики (б):
1 — двигатель; 2 — якорь муфты; 3 — индуктор муфты; 4 — механизм; n — частота вращения индуктора; M — момент, развиваемый индуктором; M_c — момент механизма; n_n — номинальная частота вращения.

Схема, поясняющая принцип действия простейшего генератора постоянного по направлению пульсирующего тока, приведена на рисунке 17.23, а.

В проводе вращающейся рамки (приводится в движение от первичного двигателя), пересекающем силовые линии магнитного поля неподвижных полюсов N и S , наводится ЭДС, направление которой можно определить по правилу правой руки. Вместо колец, которые были у простейшего генератора переменного однофазного тока (см. рис. 6.2), здесь применен *коллектор*. Он состоит из двух полуколец. Верхняя щетка A все время соединяется с той стороной витка, которая в данный момент находится под северным полюсом, а нижняя щетка B — со стороной витка, расположенной над южным полюсом. Переключение щетки с одной коллекторной пластины на другую происходит в момент прохождения рамки через нейтральную (горизонтальную) плоскость. Следовательно, напряжение на щетках, хотя и изменяется по значению, остается постоянным по направлению. График выпрямленной коллектором ЭДС показан на рисунке 17.23, б.

Если ротор объединяет две рамки (рис. 17.23, в), расположенные под углом 90° (коллектор в этом случае состоит из четырех пластин), то характер изменения ЭДС становится таким, как показано на рисунке 17.23, г. Нетрудно заметить, что глубина пульсации (ГП) ЭДС значительно уменьшилась. При шестнадцати коллекторных пластинах (8 рамок) глубина пульсации составляет лишь 0,97% среднего значения напряжения во внешней цепи, то есть практически во внешней цепи протекает постоянный ток. Коэффициент пульсации определяют так:

$$K_{\text{пульс}} = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}}} \quad (17.15)$$

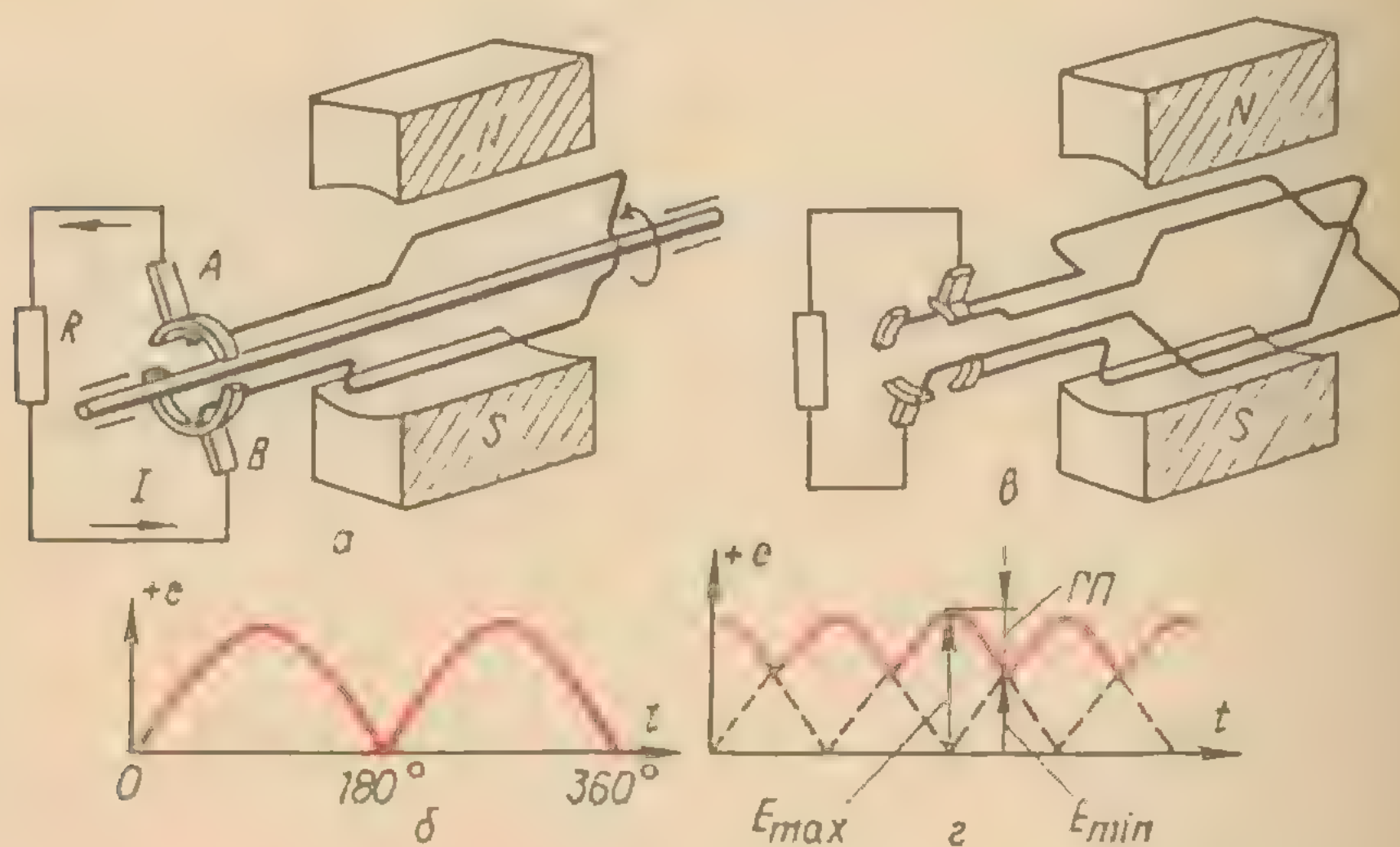


Рис. 17.23. Схема простейшего генератора с одной рамкой и двумя коллекторными пластинами (а) и с двумя рамками и четырьмя коллекторными пластинами (в) и графики получаемой ЭДС (б и г).

Машины постоянного тока обратимы. Так, если к коллектору подвести напряжение от внешнего источника тока, то рамка начнет вращаться в направлении, которое можно определить по правилу левой руки. Следовательно, в принципе электрическая машина может работать и в генераторном и в двигательном режимах.

Конструктивно машина постоянного тока состоит из неподвижной части — *статора*, обычно предназначенного для создания магнитного потока, и вращающейся части — *ротора*, в котором индуцируется ЭДС, если машина работает как генератор.

В небольших машинах постоянного тока мощностью в несколько ватт магнитное поле статора создается постоянными магнитами, а в машинах мощностью от нескольких десятков ватт до сотен киловатт — электромагнитами. Основные полюса статора называют *индуктором*, а ротор — *якорем*.

Кроме основных полюсов индуктора, на статоре устанавливают также добавочные полюса, назначение которых уменьшать искрение щеток на коллекторе.

Сердечники полюсов статора набирают из отдельных листов электротехнической стали. Их прикрепляют болтами к станине статора, по которой замыкается магнитный поток полюсов. Так как магнитный поток здесь практически постоянен по значению, станину выполняют литой. Сердечник ротора — якоря набирают также из листов электротехнической стали.

Коллектор изготавливают из пластин твердотянутой меди, которые изолируют одну от другой миканитом. Щетки — угольные или графитовые с добавками медного порошка — устанавливают в щеткодержателях, которые укрепляют на щеточных траверсах. Вал якоря опирается на подшипники в подшипниковых щитах, скрепленных со статором и удерживающих якорь между полюсами индуктора.

По способу возбуждения машины постоянного тока делят на машины с *независимым возбуждением* и с *самовозбуждением*.

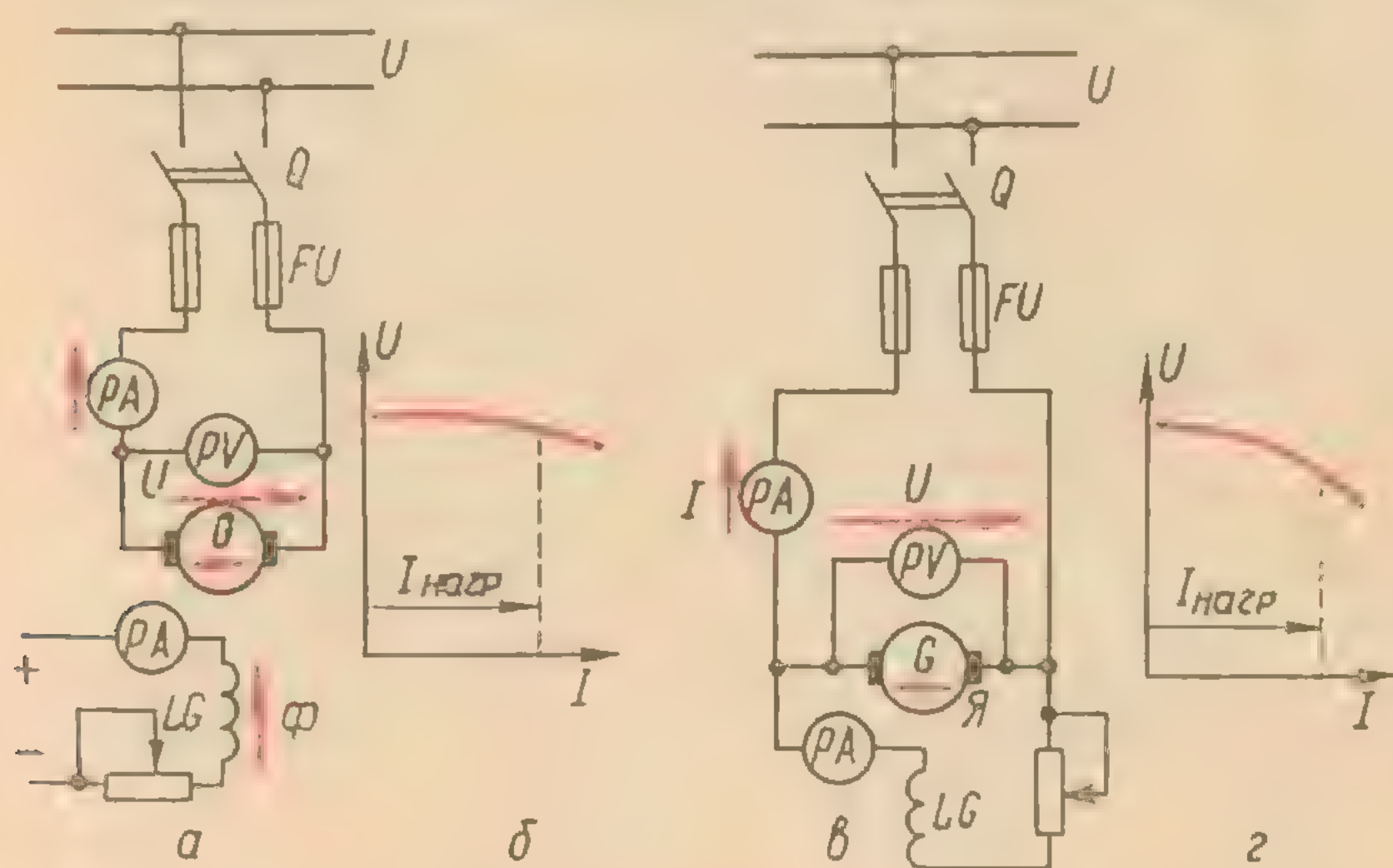


Рис. 17.24. Схемы включения генераторов с независимым возбуждением (а) и с самовозбуждением (б) и зависимости напряжения, индуцируемого генератором, от тока его нагрузки (б и г).

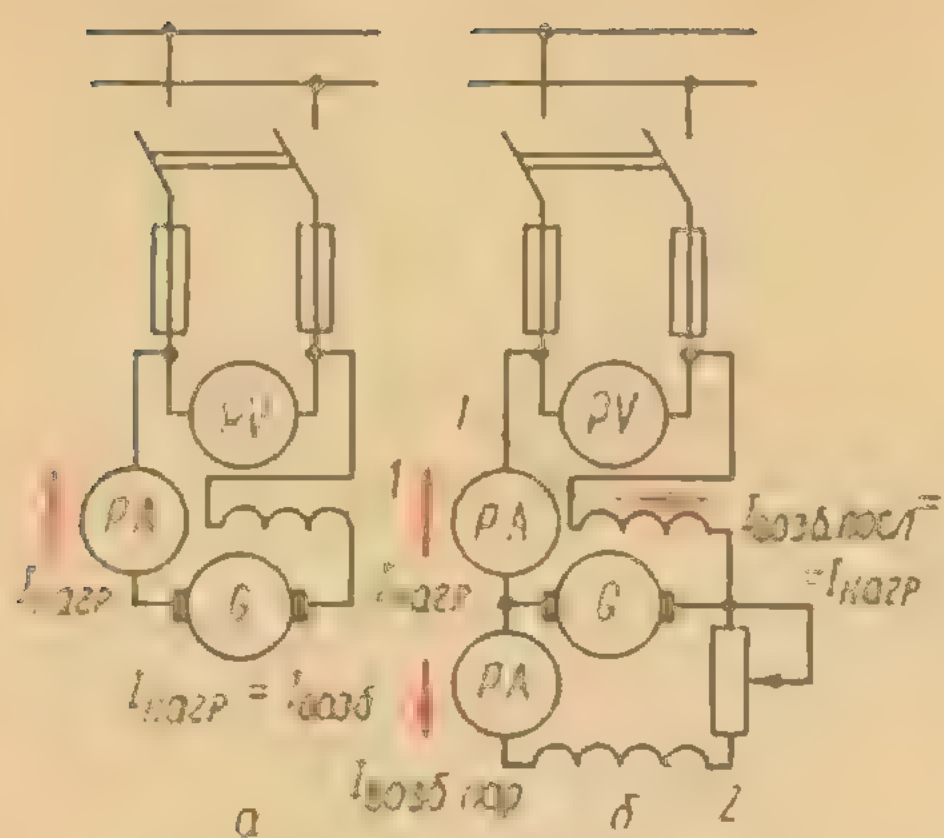


Рис. 17.25. Схемы генераторов с последовательным (а) и смешанным (б) возбуждением:
1 — последовательная обмотка возбуждения;
2 — параллельная обмотка возбуждения.

В генераторах первого типа (рис. 17.24, а и б) обмотка индуктора получает питание от постороннего источника тока — аккумулятора, выпрямителя, отдельного генератора постоянного тока. Ток возбуждения в этом случае не зависит от тока нагрузки и напряжения на обмотке якоря. Напряжение U на выходе генератора при

изменении в известных пределах тока нагрузки I изменяется незначительно. Генераторы с независимым возбуждением обладают и другим ценным свойством: они позволяют плавно и в широких пределах регулировать напряжение. С этой целью можно изменять силу тока возбуждения или частоту вращения.

В генераторах второго типа происходит процесс самовозбуждения, который заключается в следующем (рис. 17.24 в и г). Магнитная система индуктора сохраняет поток остаточного магнетизма, не превышающий 3% полного потока. Под действием остаточного магнитного потока индуктора в обмотке вращающегося якоря наводится небольшая ЭДС. Если обмотка возбуждения соединена так, что ток, протекающий под действием этой ЭДС, образует магнитное поле, совпадающее по направлению с остаточным, то ЭДС в обмотке нарастает до тех пор, пока не достигнет номинального для данного генератора значения или пока падение напряжения в обмотке возбуждения не окажется равным ЭДС машины. Если процесс самовозбуждения не возникает, то надо поменять местами концы обмотки возбуждения или на мгновение (на «искру») подвести напряжение к ней от постороннего источника постоянного тока (аккумулятора, выпрямителя). Изменяя сопротивление реостата в цепи обмотки возбуждения, регулируют напряжение генератора.

Обмотка возбуждения генератора с самовозбуждением может быть включена параллельно обмотке якоря, последовательно с обмоткой якоря или разделена на две части, одна из которых включается параллельно, а другая — последовательно. В соответствии со способом включения обмотки возбуждения различают генераторы с *параллельным* (шунтовые), с *последовательным* (сериесные) и со *смешанным* (компаундные) возбуждением, схемы которых показаны на рисунках 17.24, в, 17.25, а и б.

Наиболее широкое распространение в практике получили генераторы с параллельным возбуждением. Генераторы с последовательным возбуждением используются сравнительно редко, так как напряжение на их зажимах резко колеблется при изменении нагрузки, а при холостом ходе равно нулю. Генераторы со смешанным возбуждением применяют в установках с резкими и частыми колебаниями нагрузки, поскольку даже в этом режиме изменение напряжения на выходе

сравнительно невелико. Например, при резком увеличении нагрузки возрастает ток в последовательной обмотке, и ее поток усиливает общий поток возбуждения. Нагрузка преодолевается при незначительном колебании напряжения.

17.12. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА И СХЕМЫ ИХ ВКЛЮЧЕНИЯ

Обозначение двигателей и их обмоток. Промышленность выпускает машины постоянного тока (генераторы и двигатели) типа П. Шкала мощностей двигателей от 0,13 до 200 кВт, частота вращения 3000, 1500, 1000, 750, 600 мин⁻¹, напряжение 110, 220 В (по особому заказу — 440 В).

Разработаны новые серии машин постоянного тока 2П и П2, которые должны заменить серию П. Структура их условного обозначения 2 П X₁X₂X₃X₄ следующая:

2П — серия двигателей постоянного тока;

X₁ — исполнение по роду защиты: Н — защищенное с самовентиляцией, Ф — защищенное с независимой вентиляцией; Б — закрытое с естественным охлаждением, О — закрытое с обдувом от постороннего вентилятора;

X₂ — высота оси вращения (дву-трехзначное число), мм;

X₃ — условная длина сердечника якоря: М — первая, Л — вторая; Г — с тахогенератором;

X₄ — климатическое исполнение и категория размещения (двузначное): У — умеренный климат, Т — тропический климат.

Двигатели постоянного тока, как и генераторы, выполняют с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением. Как было указано ранее, машины постоянного тока обладают свойством обратимости: в принципе генераторы могут работать в качестве двигателей, а двигатели — в качестве генераторов. Однако конструкции двигателей имеют некоторые отличия от конструкций генераторов. Кроме того, номинальные напряжения двигателей и генераторов неодинаковы.*

Некоторые различия наблюдаются и в схемах включения этих машин. Так, двигатели постоянного тока большой мощности включают в сеть при помощи пусковых реостатов. Реостаты, представляющие собой дополнительное сопротивление в цепи обмоток двигателей, ограничивают пусковой ток, а также позволяют плавно с постепенным увеличением частоты вращения разогнать установку, состоящую из рабочей машины и двигателя. Прямое, безреостатное, включение двигателей применяется лишь при незначительной мощности (до 1 кВт).

Обмотки двигателя постоянного тока присоединяют к клеммам на его щитке. Обозначения обмоток стандартны: Я1, Я2 — обмотки якоря; Ш1, Ш2 — шунтовая (параллельная) обмотка возбуждения;

* В отличие от двигателей постоянного тока генераторы имеют другую шкалу мощностей и напряжения 115, 230 и 460 В, а у зарядных агрегатов — от 24 до 72 В.

$C1$ и $C2$ — серийная (последовательная) обмотка возбуждения; K — компенсационная обмотка; D — обмотка добавочных полюсов; P — пусковая; Y — уравнивательная и т. д.

Схема включения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением показана на рисунке 17.26, а. В пусковом реостате R зажим I подключают к линии, зажимы $Я$ и III соединяют с обмотками якоря и возбуждения.

На холостой контакт XK , выполненный из изолирующего материала, устанавливают рукоятку пускового реостата в случае остановки двигателя или перед пуском. Чтобы цепь обмотки возбуждения при выключении двигателя оставалась замкнутой, в пусковом реостате предусмотрена пластина II , соединяющая контакт III с первой ступенью пускового реостата. Если обмотка окажется разомкнутой, то при пуске в ней может возникнуть большая ЭДС, что приведет к пробое изоляции или к поражению обслуживающего персонала. Большая ЭДС самоиндукции может образоваться также в момент размыкания этой обмотки, когда двигатель отключен от сети, но его якорь продолжает вращаться по инерции.

Чтобы процесс пуска двигателя протекал плавно, без недопустимо больших колебаний тока, вначале пусковой реостат вводят полностью, а затем, по мере разбега, его сопротивление постепенно уменьшают, перемещая ручку реостата вправо.

Одно из ценных свойств двигателя с параллельным возбуждением заключается в том, что частота его вращения очень мало зависит от нагрузки (рис. 17.26, б). Кроме того, двигателю присущи высокая перегрузочная способность и широкий диапазон регулирования частоты вращения путем изменения тока возбуждения, подводимого напряжения и сопротивления пускового реостата. Первый способ применяют наиболее широко.

Схема включения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением приведена на рисунке 17.27, а.

Зажимы на щитке двигателя обозначают буквами C (серийная — последовательная обмотка возбуждения) и $Я$ (обмотка якоря). Обмотка возбуждения этого двигателя выполнена из малого числа витков

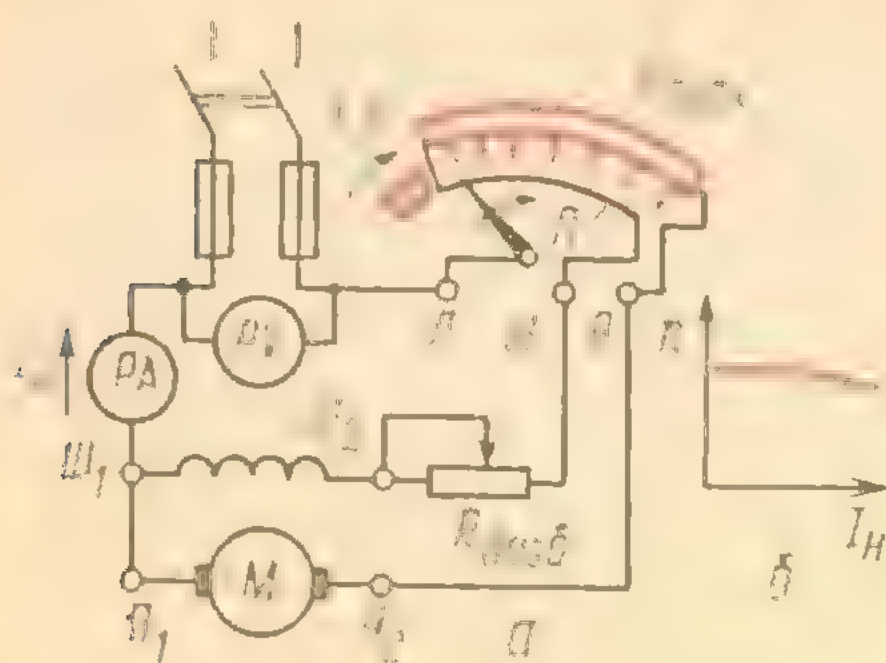


Рис. 17.26. Схема включения электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением (а) и зависимость частоты вращения n от тока нагрузки I_n (б).

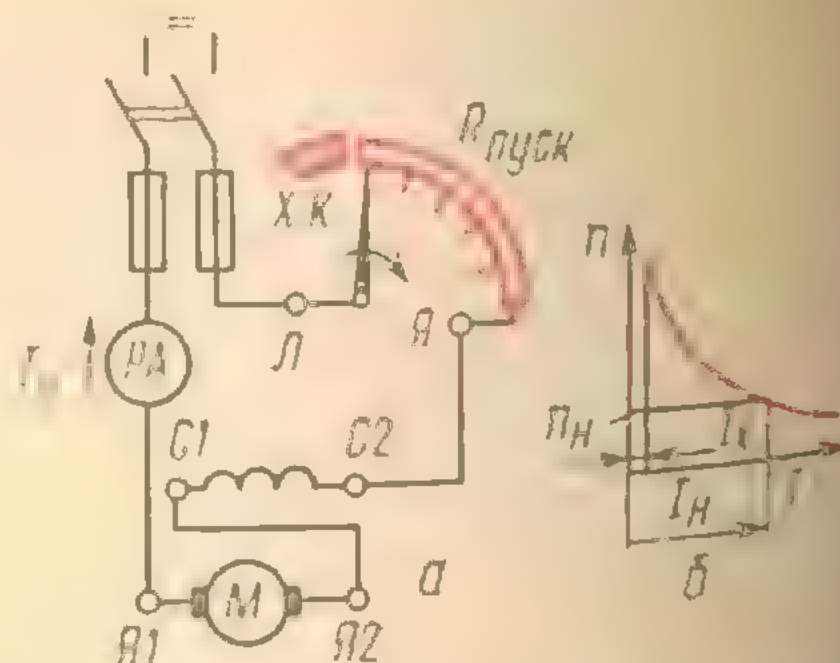
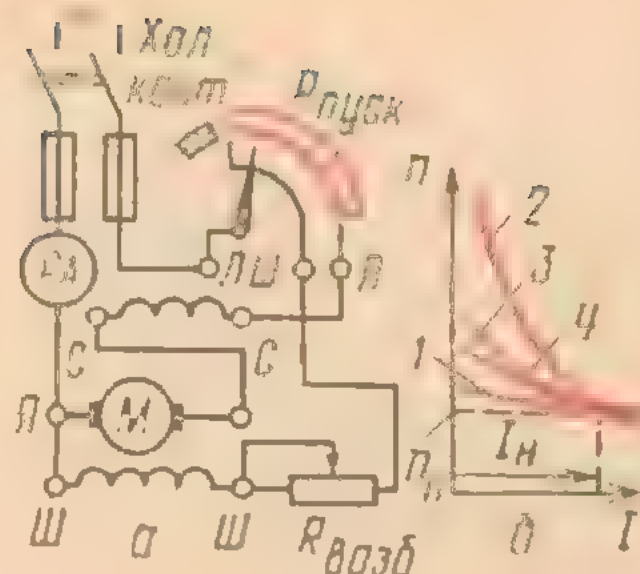


Рис. 17.27. Схема включения электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением (а) и зависимость частоты вращения n от тока нагрузки I_n (б).

рис. 17.28. Схема включения электродвигателя постоянного тока со смешанным возбуждением (а) и зависимость частоты вращения от тока нагрузки I_H (б):

1 — характеристика двигателя с параллельным возбуждением; 2 — то же, с последовательным возбуждением; 3 и 4 — то же, со смешанным возбуждением с преобладанием последовательной (3) и параллельной (4) обмоток.



провода с большой площадью сечения, так как по ней проходит полный рабочий ток двигателя.

Двигатель с последовательным возбуждением при пуске в ход развивает значительный вращающий момент. При нагрузках ниже 20...25% номинальной работа его практически недопустима из-за чрезмерного увеличения частоты вращения, которое опасно, так как возможно повреждение обмоток якоря под действием центробежных сил. Резкое возрастание частоты вращения с уменьшением нагрузки (тока I_H) видно из графика (рис. 17.27, б). Работа на холостом ходу тем более недопустима.

Двигатели с последовательным возбуждением широко применяются в транспортных и подъемных механизмах.

Двигатель постоянного тока со смешанным возбуждением, схема включения которого показана на рисунке 17.28, а, занимает промежуточное положение между двигателями с параллельным и последовательным возбуждением. Этот электродвигатель имеет хорошие тяговые характеристики и может работать на холостом ходу. Такие двигатели используют в установках с резко изменяющейся и падающей до нуля нагрузкой (прессы, прокатные станы, сварочные генераторы).

Питание якорных цепей электрических машин постоянного тока мощностью до нескольких сотен киловатт осуществляется от тиристорных агрегатов, подключаемых к сети и выдающих напряжение 230, 460 или 660 В с регулированием от 0 до 100%. Они, в частности, могут быть использованы в крановых установках.

17.13. СТАРТЕРНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Стартерный двигатель, применяемый для вращения коленчатого вала двигателя во время пуска, — это двигатель постоянного тока последовательного возбуждения, питаемый от аккумуляторной батареи. В цепи обмоток якоря и индуктора стартера протекают очень большие токи (порядка 300...400 А). Поэтому их обмотки выполняют из медных шин с большой площадью сечения, образующих небольшое число витков, причем у индуктора они изолированы, а у якоря голые. Коллектор более массивен, чем у генератора.

Обмотки 3 (рис. 17.29) индуктора одним концом подключены к минусовым щеткам, а другие их концы соединены в общую точку и подсоединены к стартерной кнопке 2. Две плюсовые щетки замкнуты

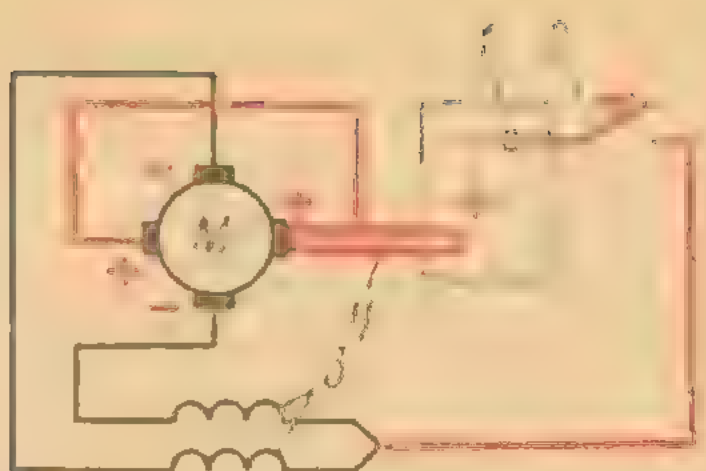


Рис. 17.29. Схема стартерного электродвигателя:
1 — аккумуляторная батарея; 2 — стартерная кнопка;
3 — обмотка возбуждения; 4 — масса (корпус электродвигателя).

на массу 4. Плюс аккумуляторной батареи также соединен с массой. При нажатии кнопки 2 стартерного пуска ток проходит по следующему пути: *плюс аккумулятора — масса — плюсовые щетки коллектора — обмотка якоря — минусовые щетки коллектора — обмотки 3 полюсов индуктора — минус аккумулятора.*

Во избежание порчи аккумулятора из-за больших токов разряда включать стартерный двигатель можно на очень короткий срок — до 8 с.

17.14. КОЛЛЕКТОРНЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Коллекторные двигатели переменного тока небольшой мощности применяют для привода бытовых пылесосов, полотерных и швейных машин, вентиляторов и др. По своему устройству эти двигатели аналогичны двигателям постоянного тока с последовательным возбуждением.

Часто подобные двигатели выполняют универсальными, рассчитанными для работы и на переменном и на постоянном токе. Для этой цели у двигателей мощностью более 60...80 Вт от обмотки возбуждения делают дополнительный вывод. При включении в сеть переменного тока (рис. 17.30, а) используется только часть витков обмотки возбуждения, а при постоянном токе (рис. 17.30, б) вводится вся обмотка возбуждения.

Чтобы изменить направление вращения коллекторного двигателя, нужно поменять местами концы обмотки возбуждения.

Поскольку в машинах переменного тока возникает переменный магнитный поток, статор собирают из тонких листов электротехнической стали, в то время как ярмо статора машин постоянного тока выполняют из литой или прокатной стали.

Коллекторные двигатели развивают значительные пусковой и вращающий моменты, высокие частоты вращения (несколько десятков тысяч оборотов в минуту). К недостаткам коллекторных машин переменного тока, ограничивающим их распространение, следует отнести

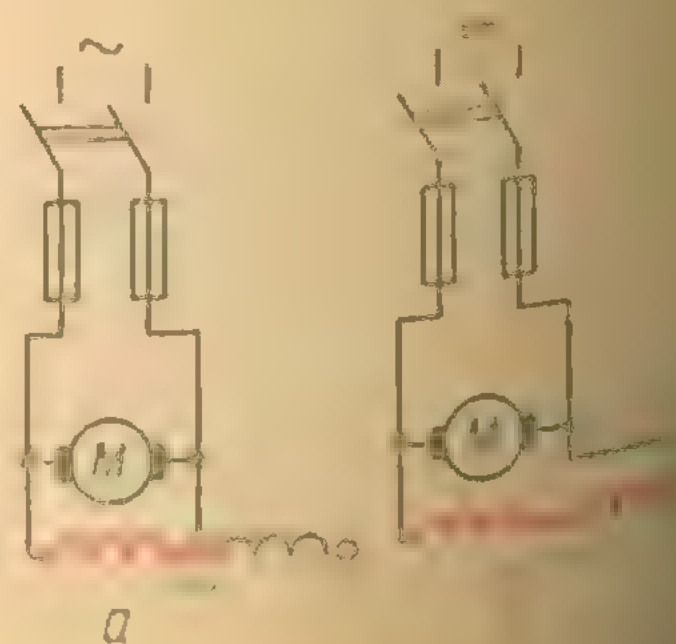


Рис. 17.30. Схема включения универсального коллекторного электродвигателя:
а — в сеть переменного тока; б — в сеть постоянного тока.

ложно по изготовлению, относительно большую стоимость, необходимость тщательного ухода за коллектором и щетками, недостаточную надежность в работе.

Серия коллекторных универсальных электродвигателей мощностью от 5 (УЛО2) до 600 (УЛО72) Вт на 8000, 5000, 2700 мин⁻¹ состоит из 12 типоразмеров, базирующихся на семи наружных диаметрах сердечников статора (габариты 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08), причем габариты от 04 до 08 имеют по две длины в каждом диаметре (габарите).

Коллекторные однофазные и трехфазные двигатели большой мощности (до 200 кВт) предназначены для специальных целей и распространены мало.

17.15. СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

По своему устройству синхронные двигатели ничем не отличаются от синхронных генераторов. Для улучшения условий пуска воздушный зазор между ротором и статором двигателя делают меньшим, чем у генератора.

Синхронные двигатели распространены в электроприводе и выпускаются на мощности до нескольких тысяч киловатт.

Постоянство частоты вращения и полная независимость ее от нагрузки на валу — характерная особенность и ценное свойство этих машин.

Другое ценное качество синхронного двигателя — способность работать с различными коэффициентами мощности. Изменяя ток возбуждения, можно получить значение $\cos\varphi$ в широких пределах независимо от нагрузки. Недовозбужденный двигатель работает с отстающим $\cos\varphi$, так как из сети потребляется намагничивающий ток. При увеличении тока возбуждения (перевозбуждении) $\cos\varphi$ будет опережающим (емкостным), как при подключении конденсаторов. В сеть будет поступать опережающий ток.

Это свойство перевозбужденных синхронных двигателей широко используется при компенсации $\cos\varphi$ в сети. В таких случаях перевозбужденный синхронный двигатель называют *синхронным компенсатором* реактивной мощности. Посылая реактивную (при опережающем $\cos\varphi$) мощность в сеть, компенсатор снижает реактивную индуктивную мощность, потребляемую двигателями из сети от основного источника тока. Линия к источникам электроснабжения, а также трансформаторы и генераторы разгружаются от реактивных намагничивающих токов.

Мощность компенсаторов составляет от нескольких сотен до нескольких тысяч киловольт-ампер реактивных.

Синхронные двигатели мощностью от долей ватта до нескольких сотен вт выполнены без скользящих контактов, применяют там, где требуется строго заданная частота вращения: в магнитофонах и проигрывателях, в звуковых киноаппаратах, электрических часах, измерительных приборах и т. п. По принципу действия их делят на активные и гистерезисные.

У реактивных бесконтактных электродвигателей ротор явнополюсный, без обмоток возбуждения и без постоянных магнитов. Магнитное поле в роторе наводится магнитным полем обмотки статора, которая уложена в пазах железа статора и равномерно распределена по окружности или же выполнена в виде одной или нескольких катушек возбуждения, расположенных на полюсах статора.

В гистерезисных электродвигателях применен цилиндрический (из магнитотвердого материала) или дисковый (из закаленной стали) ротор без обмотки. Вращающий момент создается благодаря явлению гистерезиса (остаточной магнитной индукции). Причем в асинхронном режиме (например, при разгоне) материал ротора перемагничивается, а в синхронном режиме имеется постоянное остаточное магнитное поле, которое взаимодействует с вращающимся магнитным полем статора.

При мощностях до нескольких десятков ватт эти двигатели выполняют однофазными с одной обмоткой на статоре. Такие двигатели просты по конструкции, удобны и надежны в эксплуатации и незаменимы там, где требуется синхронная частота вращения при небольшом вращающем моменте. В сельском хозяйстве их ожидает большое будущее.

Контрольные вопросы и задания к главе 17. 1. Какие сведения приводятся на шитке (паспорте) электродвигателя? 2. Какие типы асинхронных электродвигателей вы знаете? 3. Нарисуйте и объясните схемы включения двигателя в звезду и треугольник. 4. Покажите с помощью схем, как определить начала и концы обмоток. 5. Двигатель 220/380 В, мощностью 11 кВт, $\cos \varphi = 0,9$ и $\eta = 0,85$ включен в треугольник. Найти потребляемый из сети ток при номинальной нагрузке на валу. 6. Нарисуйте схему включения двигателя с переключением обмоток со звезды на треугольник. 7. Нарисуйте схему включения двигателя с фазным ротором и расскажите порядок операций по его включению. 8. Найти вращающий момент двигателя (см. вопрос 5), если $n_n = 2810$ мин⁻¹. 9. Нарисуйте и расскажите особенности схем включения однофазного электродвигателя. 10. Как включить трехфазный электродвигатель для работы от однофазной сети? 11. Нарисуйте схемы включения двигателей постоянного тока с параллельным и последовательным возбуждением. 12. Расскажите об устройстве синхронного электродвигателя.

Глава 18. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА. АВТОМОБИЛЬНЫЕ И ТРАКТОРНЫЕ ГЕНЕРАТОРЫ

18.1. ВРАЩАЮЩИЕСЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ТОКА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЧАСТОТЫ В ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Использование повышенной частоты тока. Как известно, в нашей стране электрическая энергия вырабатывается и распределяется преимущественно в виде энергии переменного трехфазного тока промышленной частоты 50 Гц. Однако ряд отраслей промышленности (электрохимическая, металлообрабатывающая, металлургическая), некоторые сельскохозяйственные установки, городской и железнодорожный электрифицированный транспорт нуждаются в энергии постоянного тока.

В приводе различных машин и механизмов широко используют

ются высокоскоростные электродвигатели. Питание которых осуществляется на нормализованных (узаконенных) частотах 100, 150, 200, 400 Гц. Индукционный нагрев металлических деталей на машиностроительных и ремонтных предприятиях требует применения частот до 10 000 Гц; для других целей обращаются к еще более высоким частотам, вырабатываемым при помощи электронных генераторов.

Наиболее простой способ получения энергии постоянного тока или энергии тока частоты, отличной от промышленной, связан с использованием машинных преобразователей — вращающихся и статических.

К вращающимся преобразователям переменного тока в постоянный относят двигатель-генератор и одноякорный преобразователь.

Двигатель-генератор состоит из двигателя переменного тока и расположенного с ним на одном валу генератора постоянного тока. В преобразователях малой мощности (зарядные и сварочные агрегаты) в качестве первичного двигателя используется асинхронный короткозамкнутый электродвигатель, а в преобразователях большой мощности — синхронный двигатель. Двигатель-генераторный преобразователь надежен в работе и прост в обслуживании. Существенный его недостаток — низкий КПД, равный произведению КПД обеих машин.

Одноякорный преобразователь представляет собой генератор постоянного тока, на валу которого (обычно с обратной от коллектора стороны) расположены контактные кольца. Их может быть два или три, в зависимости от числа фаз преобразуемого переменного тока. Принцип действия одноякорного преобразователя (рис. 18.1) основан на свойстве замкнутой якорной обмотки A при ее вращении в неподвижном магнитном поле давать одновременно постоянное напряжение на коллекторе $Kл$ и переменное на кольцах $Kц$.

Если вращать обмотку такой машины посторонним двигателем, то с коллектора можно снимать постоянный ток, а с колец — переменный. Если же к коллектору $Kл$ подвести постоянный ток, то якорь будет вращаться, а с колец при этом можно получать переменный ток. И, наконец, если к кольцам подвести переменный ток, то машина будет работать как синхронный двигатель, а с коллектора можно снимать постоянный ток (механическое выпрямление переменного тока). Последний режим — нормальный рабочий режим одноякорного преобразователя. Напряжение выпрямленного тока регулируют, изменяя напряжение переменного тока, подводимое к кольцам.

Несмотря на простоту и компактность устройства, одноякорный преобразователь имеет ряд эксплуатационных недостатков (прежде всего малая надежность скользящих контактов); кроме того, для него характерны сравнительная сложность пуска мощных машин, узкий предел регулирования выпрямленного напряжения и др.

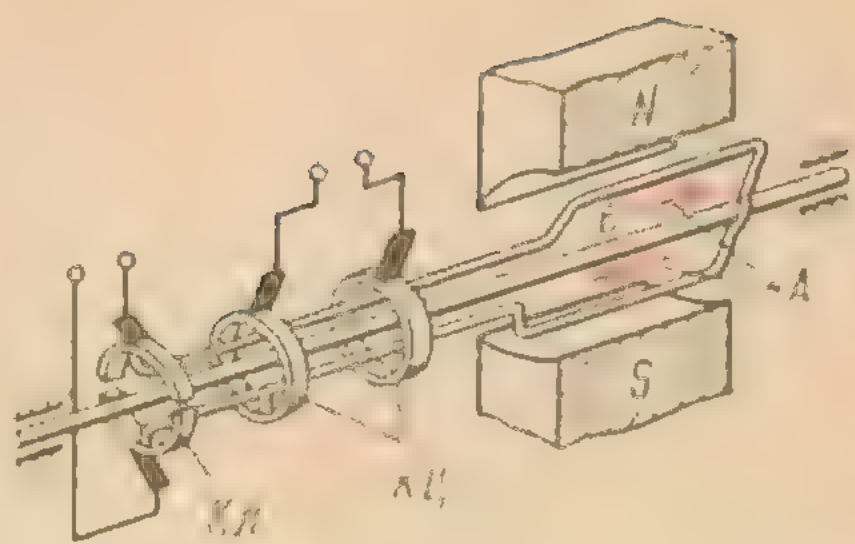


Рис. 18.1. Схема одноякорного преобразователя переменного тока в постоянный.

Поэтому в настоящее время одноякорные преобразователи вытеснены выпрямителями.

Машинные зарядно-буферные преобразователи мощностью от 1,7 до 42 кВт, со вторичным напряжением от 24 до 440 В, работают на нагрузку и одновременно заряжают параллельно подключенную аккумуляторную батарею. Низковольтные преобразовательные агрегаты постоянного тока мощностью 14...90 кВт со вторичным напряжением от 6 до 80 В предназначены для целей электролиза, сварки и др.

Машинные преобразователи постоянного тока низкого напряжения в постоянный ток высокого напряжения, имеющие два коллектора на своем валу, называют *умформерами*.

18.2. АСИНХРОННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

На рисунке 18.2 приведена схема преобразователя частоты И75В, который преобразует сетевой трехфазный ток частотой 50 Гц в трехфазный ток повышенной частоты 200 Гц. В общем корпусе и на одном валу расположены первичный двигатель (трехфазный асинхронный короткозамкнутый, 3000 мин⁻¹) и шестиполюсный преобразователь частоты, представляющий собой по конструкции асинхронный двигатель с фазным ротором, работающий в режиме генератора-преобразователя. Обмотка трехфазного ротора преобразователя включена в сеть таким образом, что ее магнитное поле вращается в обратную по отношению к вращению самого ротора сторону. Обмотка статора преобразователя имеет $p = 3$. Поэтому в ней наводится ЭДС с частотой

$$f = \frac{(n_r + n_{\text{м.п.}})p}{60} = \frac{(3000 + 1000)3}{60} = 200 \text{ Гц}, \quad (18.1)$$

где n_r — частота вращения ротора; $n_{\text{м.п.}}$ — частота вращения магнитного поля обмотки ротора; p — число пар полюсов обмотки статора преобразователя.

В преобразователе И75В мощность первичного двигателя 4,5 кВт, а вторичную сторону (36 В и 200 Гц) можно нагружать мощностью до 3,5 кВт · А.

Асинхронные преобразовательные агрегаты серий АЧ-100

АКЧ-100 и др. предназначены для преобразования трехфазного тока частотой 50 Гц

в трехфазный ток частотой 100 Гц. Агрегаты

применяются для питания быстроходных асинхронных электродвигателей. Преобразо-

вательный агрегат состоит из асинхронного преобразователя частоты и приводного асин-

хронного трехфазного электродвигателя с короткозамкнутым ротором (серия АЧ-100) или

с фазовым ротором (серия АКЧ-100). Агрегаты рассчитаны на мощности 4,5; 14; 40; 55;

125 кВт и напряжения сети 220 В и 380 В.

Для частотного управления асинхронными двигателями серий 4А, 4АП, 4АХП, 4АШ,

4АХШ выпускаются преобразователи частоты серии ПЧ. Преобразователь ПЧ-4-200У4 имеет

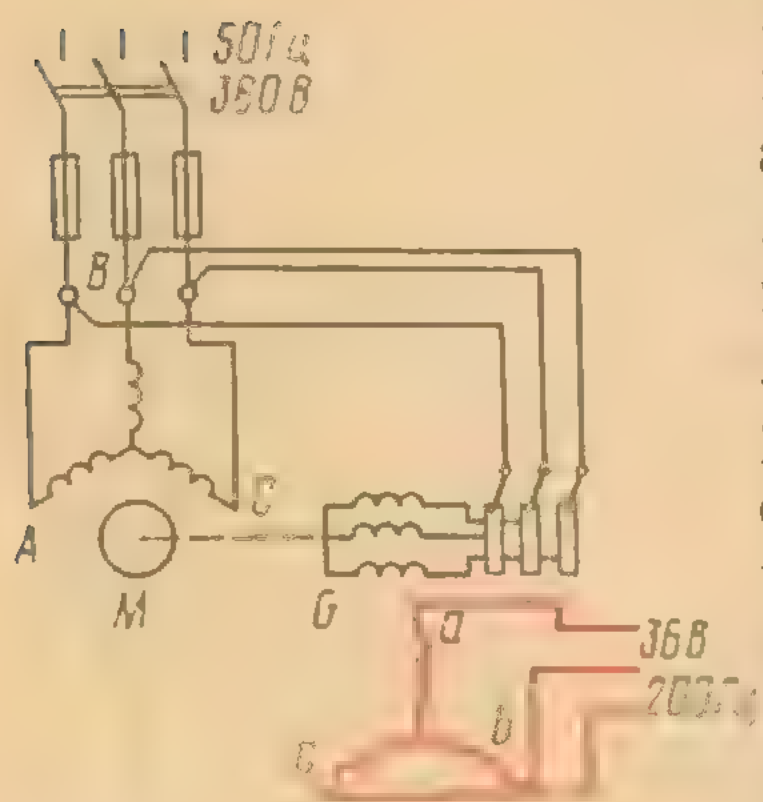


Рис. 18.2. Схема преобразователя частоты.

ность 4 кВ · А (для двигателей до 2,2 кВт), наибольшая частота 200 Гц. Он обеспечивает диапазон регулирования частоты вращения вниз от номинальной 1 : 10 и вверх от номинальной 2 : 1. Выходное междупазное напряжение при регулировании частоты меняется в пределах от 25 до 270 В.

18.3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ (500...8000 Гц)

Такие агрегаты служат для питания электрических индукционных печей и специальных установок, в которых металлические детали подвергаются воздействию поля повышенной частоты, индуктирующего в них вихревые токи. Эти токи нагревают металл, причем чем выше частота тока, тем меньший слой металла подвержен их проникновению (поверхностная закалка). В индукционных установках используются повышенные (до 10 000 Гц) частоты, главным образом 500, 1100, 2600 и 8000 Гц. Повышенные частоты в диапазоне от 500 до 8000 Гц получают при помощи индукторных генераторов конструкции В. И. Вологодина, приводимых во вращение трехфазными асинхронными электродвигателями.

В пазах на статоре индукторного генератора (рис. 18.3) уложены две обмотки — возбуждения и рабочая. Обмотка возбуждения (на рисунке не показана) питается постоянным током от независимого источника (чаще всего от полупроводникового выпрямителя) и создает магнитное поле $N-S$. Ротору генератора придан специальный зубчатый профиль. При его вращении зазор под зубцами периодически меняется, благодаря чему магнитный поток в статоре пульсирует и индуктирует в рабочей обмотке переменную ЭДС повышенной частоты:

$$f = zn/60, \quad (18.2)$$

где z — число зубцов ротора; n — частота вращения ротора, мин⁻¹

Промышленность выпускает агрегаты повышенной частоты с генераторами ВГО, ОПЧ и другими мощностью до 2500 кВт.

Преобразователи частоты, как автономные источники токов повышенной частоты, комплектуются всеми необходимыми средствами для управления режимом работы и контроля за ним, а преобразователи мощностью выше 50 кВт снабжаются также устройствами ступенчатого пуска.

18.4. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПЕРЕМЕННЫЙ

Преобразователи этого типа (например, ОП-120, ПО-550Ф) предназначены главным образом для питания аппаратуры связи. Их мощность составляет обычно несколько сот ватт, напряжение постоянного тока (питание) 24, 110 или 220 В, напряжение на выходе 120 В, частота 50 Гц.

Конструктивно преобразователи выполнены в одном корпусе и на общем валу. У преобразователя ПО-550Ф якорные обмотки постоянного и переменного тока соединены по-

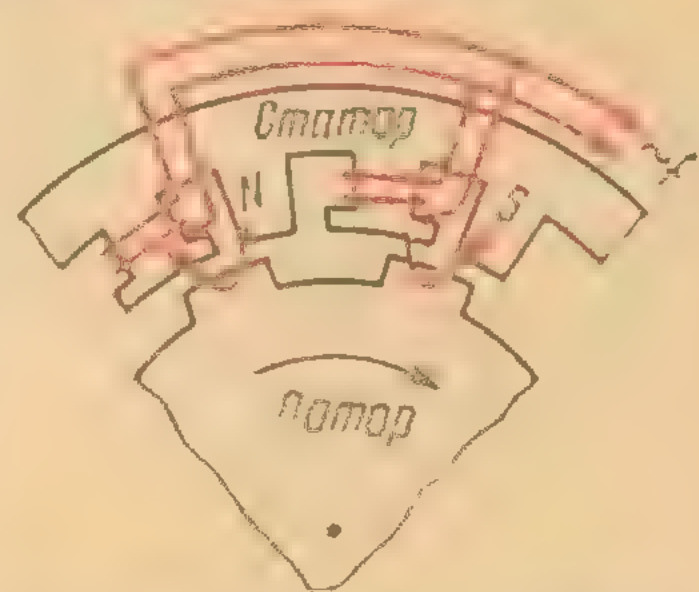


Рис. 18.3 К принципу действия индукторного генератора.

следовательно, заложены в одни и те же пазы железа якоря и выведены соответственно к коллектору и контактными кольцам.

В преобразователе ПО-550АФ якорные обмотки постоянного и переменного токов представляют собой одну обмотку, концы которой заложены в коллектор, а от средних точек обмотки выведены для отпайки к кольцам. Система возбуждения смешанная (общая для постоянного и переменного токов) с питанием со стороны постоянного тока.

У преобразователя ПО-550АФ последовательно с обмоткой постоянного тока включена обмотка дополнительных полюсов, улучшающая коммутацию. Исполнение открытое с самовентиляцией.

Преобразователи рассчитаны на длительный режим работы. Пуск осуществляется непосредственным включением в сеть.

18.5. СТАТИЧЕСКИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ (УМНОЖИТЕЛИ)

Чтобы понять принцип действия статического (невращающегося) преобразователя частоты, рассмотрим разложение в гармонический ряд (ряд Фурье) несинусоидальных кривых (функций). На рисунке 18.4, а приведен график несинусоидального напряжения u , которое может быть получено в обмотке, наложенной на сердечник с перенасыщенным магнитным полем. Подобный график прямоугольной формы представляет собой сумму синусоидальных напряжений нечетных гармоник (1, 3, 5 и т. д.) и выражается аналитически формулой

$$u = \frac{4U_m}{\pi} \sin \omega t + \frac{4U_m}{3\pi} \sin 3\omega t + \frac{4U_m}{5\pi} \sin 5\omega t + \dots \quad (18.3)$$

Первый член правой части уравнения (18.3) характеризует первую (основную) гармонику частотой 50 Гц ($\omega = 2\pi f$), второй член — третью гармонику частотой 150 Гц ($3\omega = 2\pi 3f$) и т. д.

Из этого ряда гармоник нетрудно выделить нужную нам гармонику, настроив, например, на эту частоту контур, состоящий из индуктивности L и емкости C , в резонанс току частоты данной гармоники. Поскольку контур будет представлять значительное сопротивление для гармоник с другими частотами, то в цепи нагрузки протекает в основном ток нужной нам частоты.

Чтобы получить четные гармоники, первичное магнитное поле делают пульсирующим (выпрямленный ток в цепи частотой 50 Гц). Например, форма тока после двухполупериодного выпрямления, показанная на рисунке 18.4, б, может быть представлена как сумма постоянной составляющей и четных гармоник и аналитически выражена так:

$$i = \frac{2I_m}{\pi} - \frac{2I_m}{3} \cos 2\omega t - \frac{2I_m}{15} \cos 4\omega t - \dots \quad (18.4)$$

Первое слагаемое правой части уравнения (18.4) — постоянная составляющая (постоянный ток), далее вторая гармоника (частота 100 Гц), четвертая и т. д.

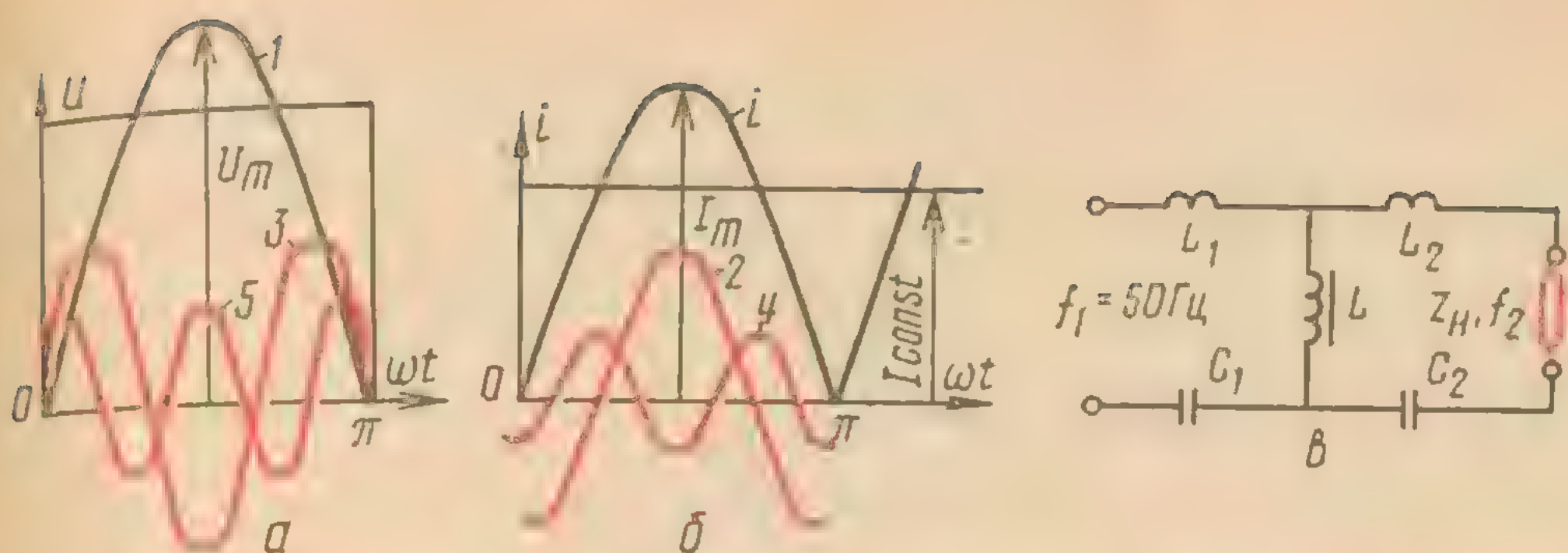


Рис. 18.4. Разложение в гармонический ряд напряжения u и прямоугольной формы (а), пульсирующего тока, полученного на выходе двухполупериодного выпрямителя без фильтра (б) и схема простейшего умножителя частоты (в):

1 — первая гармоническая составляющая (гармоника) напряжения u ; 3 и 5 — третья и пятая гармоники, 2 и 4 — вторая и четвертая гармоники пульсирующего тока i .

На рисунке 18.4, в приведена простейшая схема умножения частоты. Цепь, состоящая из индуктивностей $L_1 + L$ и емкости C_1 , настраивается в резонанс с первичной частотой f_1 для повышения $\cos \varphi$ и КПД установки, а также с целью максимального искажения формы напряжения u на зажимах катушки L , что достигается перенасыщением ее стального сердечника. К зажимам этой катушки присоединяют контур, состоящий из $L_2 C_2$ и сопротивления нагрузки Z_H , который настраивают в резонанс той гармонике, которую необходимо выделить.

Промышленность выпускает статические преобразователи частоты на 100 (удвоители), 150 (утроители), 200 и 400 Гц для питания привода ручного инструмента, высокоскоростных машин и т. д.

Статические преобразователи, повышающие частоту с 50 до 200 Гц и с 50 до 400 Гц, имеют шкалу мощностей от 0,4 до 40 кВт (11 ступеней). В обозначении преобразователя, например ПЧС-10-200-36, числа означают выходные параметры: мощность 10 кВт, частота 200 Гц, напряжение 36 В. Выпускаются также статические преобразователи частоты со вторичным напряжением 230 В.

18.6. АВТОМОБИЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА С РЕГУЛЯТОРОМ НАПЯЖЕНИЯ

На автомобилях, тракторах, разнообразных самоходных машинах применяют генераторы постоянного и переменного тока мощностью несколько сот ватт и номинальным напряжением 6 и 12 В, приводимые в действие от коленчатого вала двигателя обычно через ременную передачу.

Автомобильные генераторы постоянного тока выполняют с параллельным возбуждением. Один конец от обмотки якоря (одну из щеток) и один от обмотки возбуждения соединяют с корпусом (массой) машины, два других конца выводят к зажимам A' и B' на щитке генератора.

Условия работы автомобильных генераторов весьма специфичны.

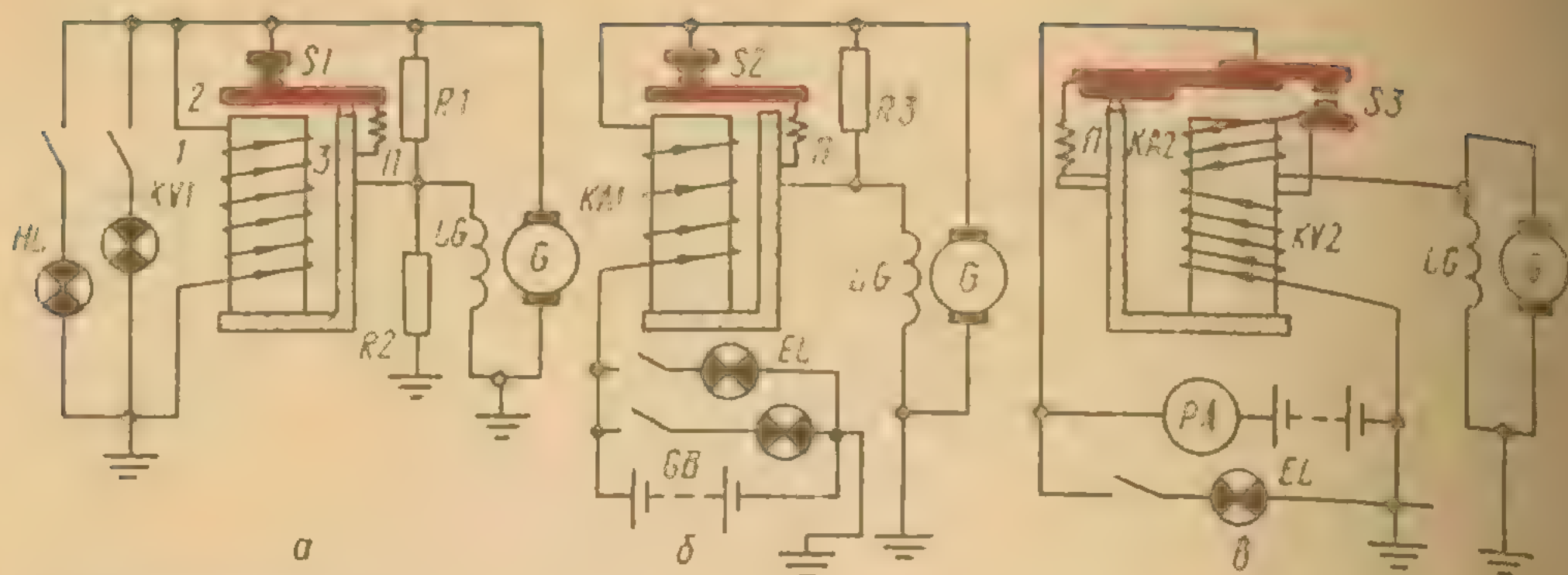


Рис. 18.5. Реле-регулятор:

а — вибрационный регулятор напряжения; б — реле-ограничитель тока; в — реле обратного тока. Сердечник обмотки $KV1$ регулятора напряжения; 2 — вибратор; 3 — магнитный шунт; П — пружина; $R1$ и $R3$ — добавочные сопротивления; $R2$ — искрогасительное сопротивление; LG — обмотка возбуждения; G — якорь генератора; $KA1$ — обмотка регулятора тока; $KV2$ — параллельная намагничивающая обмотка; $KA2$ — последовательная размагничивающая обмотка; $S1...S3$ — контакты вибраторов.

Достаточно сказать, что частота вращения коленчатого вала изменяется в довольно широких пределах, нагрузка также не остается постоянной. Поэтому для того, чтобы независимо от частоты вращения приводного вала и значения нагрузки поддерживать напряжение неизменным, а также координировать работу генератора и аккумуляторной батареи, генераторы снабжают специальными регулируемыми устройствами — *реле-регуляторами* (рис. 18.5). В этом приборе на одной панели смонтированы регулятор напряжения, реле-ограничитель тока и реле обратного тока.

Регулятор напряжения, схема которого изображена на рисунке 18.5, а, представляет собой автоматически действующий электромагнитный прибор вибрационного типа, предназначенный для поддержания постоянного напряжения.

Обмотка регулятора напряжения ($KV1$) включена параллельно нагрузке. Сердечник $KV1$ намагничивается и стремится притянуть вибратор 2. Однако пружина П отрегулирована так, что при номинальном напряжении вибратор не притягивается и его контакты $S1$ замкнуты. При увеличении частоты вращения двигателя и генератора повышается напряжение генератора, вибратор притягивается к сердечнику $KV1$, контакты $S1$ размыкаются и в цепь обмотки возбуждения LG включается дополнительное сопротивление $R1$. Напряжение генератора снижается, вибратор под действием пружины отходит, контакты $S1$ шунтируют дополнительное сопротивление $R1$, напряжение генератора снова растет, и вибратор притягивается и т. д. Следовательно, происходит процесс периодического размыкания замыкания (вибрации) контактов $S1$. При частоте 50 колебаний в секунду напряжение генератора можно считать достаточно постоянным. Для уменьшения искрения контактов $S1$ предусмотрено искрогасительное сопротивление $R2$.

Регулятор напряжения снабжен также магнитным шунтом. Через него замыкается часть магнитного потока сердечника 1. Шунт выполнен из сплава, магнитная проводимость которого мала.

зависимости от температуры. Чем ниже температура, тем выше магнитная проводимость, и наоборот. Значит, в зимнее время шунт замыкает большую часть магнитного потока, чем летом. Следовательно, зимой необходимо большее напряжение на катушке $KV1$, чтобы притянуть вибратор. Так автоматически достигается увеличение напряжения генератора, а следовательно, и зарядного тока в зимнее время.

Реле — ограничитель тока (рис. 18.5, б) представляет собой электромагнитный, автоматически действующий прибор вибрационного типа, предохраняющий систему электрооборудования от появления в ней недопустимо большого тока (перегрузки, короткие замыкания и др.).

Обмотка реле $KA1$ включена последовательно в цепь зарядного тока, выполнена из сравнительно малого числа витков провода с большой площадью сечения, так как по ней проходит весь ток нагрузки. При увеличении значения зарядного тока сверх допустимого катушка притягивает к себе вибратор (контакты $S2$ размыкаются), и в цепь обмотки возбуждения генератора включается дополнительное сопротивление $R3$. Возбуждение уменьшается, напряжение генератора снижается. В остальном работа реле — ограничителя тока подобна работе регулятора напряжения.

Реле обратного тока (рис. 18.5, в) — это электромагнитный, автоматически действующий вибрационный прибор, координирующий совместную работу генератора и аккумуляторной батареи (включение генератора в цепь, когда его напряжение больше напряжения аккумуляторной батареи, а в противном случае — отключение генератора от цепи).

Реле пропускает ток только в одном направлении: от генератора к аккумулятору. При обратном токе оно размыкает цепь между аккумулятором и генератором. На сердечник реле намотаны две обмотки: параллельная — намагничивающая $KV2$ и последовательная — размагничивающая $KA2$. Обмотка $KA2$ из небольшого числа витков толстого провода включена последовательно в цепь якоря таким образом, что при направлении тока от генератора к аккумулятору его магнитное поле совпадает по направлению с полем обмотки $KV2$. Если же напряжение генератора упадет (уменьшится частота вращения) ниже напряжения аккумулятора, то ток изменит направление и поток последовательной катушки ослабит поток параллельной катушки, контакты $S3$ разомкнутся. Следующее замыкание этих контактов произойдет тогда, когда напряжение генератора станет несколько больше, чем ЭДС аккумулятора.

18.7. ГЕНЕРАТОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Генераторы переменного тока с постоянными магнитами широко применяются на тракторах, где основным потребителем являются фонари постоянного тока. Эти генераторы дешевле других генераторов постоянного тока и проще их по конструкции. Недостатки их заключаются в том, что они обладают сравнительно малой мощностью, узким диапазоном частот вращения, при которых поддерживается

необходимое напряжение (6...7,5 В), и не могут быть использованы для подзарядки аккумуляторов.

На статоре генератора уложена обмотка якоря. Ротор выполнен из магнитного железоникельалюминиевого сплава в виде шести-полюсного магнита с чередованием полюсов $N-S-N-S-N-S$. Обмотка статора соединена в звезду. К одному из четырех зажимов на щитке генератора выведена нейтральная точка, к трем другим присоединены концы обмоток.

На тракторах с карбюраторными двигателями при отсутствии аккумуляторов применяется система зажигания от магнето. Магнето представляет собой генератор-трансформатор переменного тока. Его устройство показано на рисунке 18.6. Магнето состоит из двух стальных стоек 1 с сердечником 2, катушки 4 низкого напряжения и катушки 3 высокого напряжения. Стойки 1 имеют полюсные башмаки 5, между которыми вращается ротор 6, представляющий собой сильный магнит. Один конец обмотки низкого напряжения, или первичной обмотки, выведен на массу M , а второй — на подвижный контакт K прерывателя 7. Вторичная обмотка служит для получения высокого напряжения и распределения его по свечам зажигания двигателя. Один конец этой обмотки соединен с обмоткой низкого напряжения, а второй — скользящий угольный контакт 8 — с контактами распределителя 9.

При вращении ротора магнето от двигателя трактора в обмотке низкого напряжения индуцируется ЭДС переменного тока 12...15 В. ЭДС наводится и в обмотке высокого напряжения. При замкнутых контактах прерывателя в обмотке низкого напряжения протекает ток, который усиливает магнитное поле Φ сердечника. Когда это поле достигает максимальной интенсивности, контакт S прерывателя размыкается, исчезает ток и вместе с ним магнитный поток. При этом в обмотке высокого напряжения индуцируется ЭДС высокого напря-

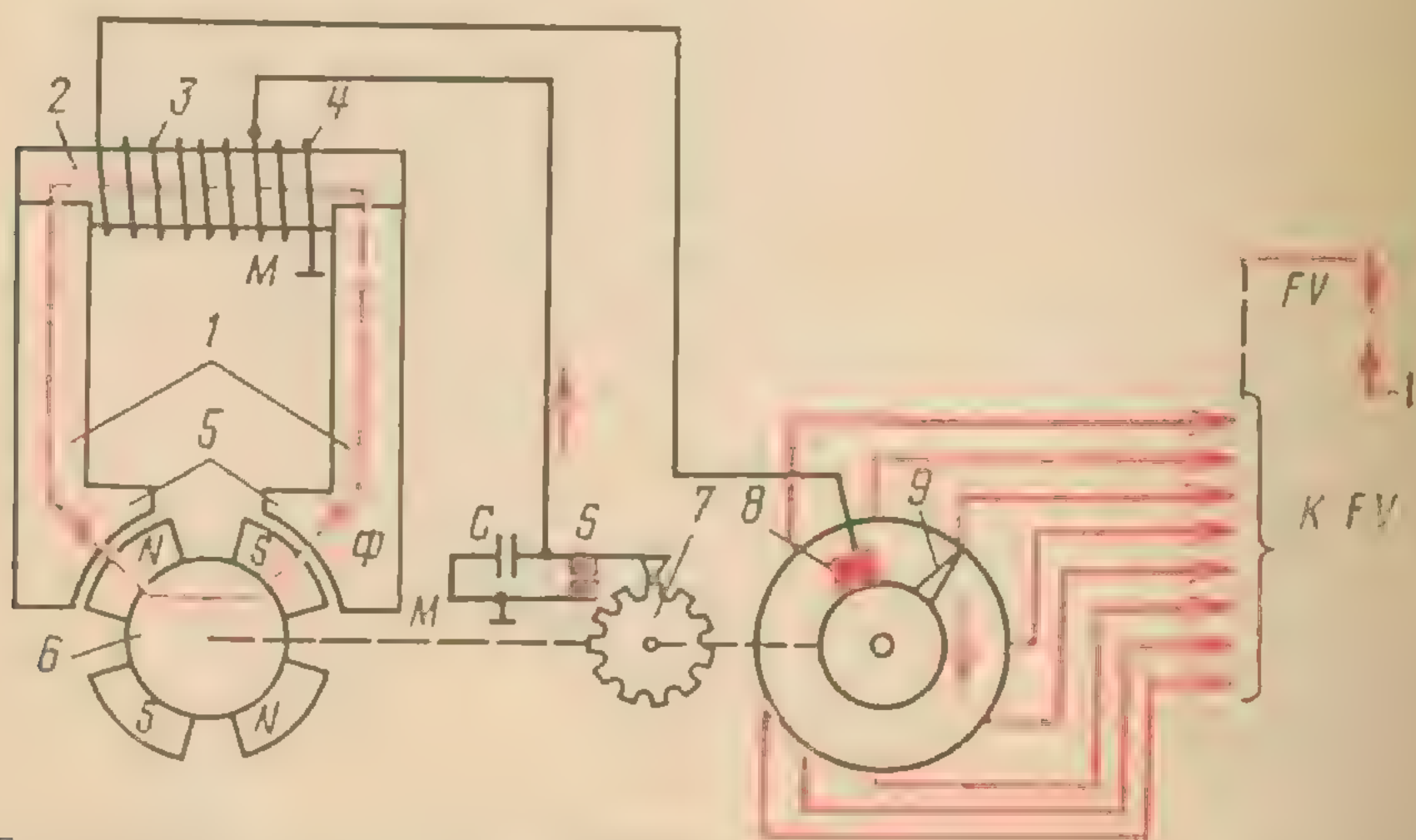


Рис. 18.6. Схема магнето высокого напряжения:

1 — железные стойки; 2 — сердечник; 3 — катушка высокого напряжения; 4 — катушка низкого напряжения; 5 — полюсные башмаки; 6 — ротор с постоянными магнитами; 7 — прерыватель; 8 — угольный контакт; 9 — распределитель в цепи высокого напряжения; M — масса (корпус); FV — искровые промежутки свечей зажигания двигателя внутреннего сгорания.

жения, которая складывается с наведенной ЭДС от потока магнита ротора. При помощи распределителя это высокое напряжение поочередно подводится к электродам искровых свечей зажигания.

Импульс высокого напряжения вызывает пробой искровых промежутков FV и образовавшаяся электрическая искра воспламеняет рабочую смесь в очередном цилиндре двигателя. Параллельно контактам прерывателя включен конденсатор C , назначение которого погасить ЭДС самоиндукции в первичной обмотке при размыкании контактов прерывателя. Его иногда называют искрогасительным конденсатором.

Контрольные вопросы и задания к главе 18. 1. Как устроен вращающийся преобразователь тока? 2. Расскажите по схеме о принципе действия преобразователя частоты с 50 на 200 Гц. 3. Расскажите о принципе действия статического преобразователя частоты (умножителя). 4. Как работает автомобильный регулятор напряжения? 5. Как устроено магнето?

Глава 19. ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА ПРОМЫШЛЕННОЙ ЭЛЕКТРОНИКИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

19.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ. ДВУХЭЛЕКТРОДНЫЕ ПРИБОРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ

Использование электронных приборов. В промышленной электронике применяются различные электронные схемы для контроля, регулирования производственных процессов и управления ими, а также схемы для преобразования тока. В этих схемах используются соответствующие приборы для выпрямления переменного тока в постоянный, преобразования слабых электрических сигналов в более мощные, генерирования-преобразования электрической энергии в световую и наоборот, коммутации напряжения и токов, преобразования формы и частоты электрических колебаний и т. д.

Электронные приборы и устройства имеют высокую чувствительность, быстроедействие, универсальность и малые габаритные размеры. Быстроедействие достигается при помощи различных усилительных схем, универсальность заключается в возможностях преобразования всех видов энергии — тепловой, лучистой, звуковой, механической — в электрическую.

Электровакuumный диод — это двухэлектродная лампа, которая представляет собой простейший электровакuumный прибор. В стеклянной колбе 7 (рис. 19.1), из которой выкачан воздух, расположены два электрода: *катод* 5 — испускатель электронов — нить накала (с прямым или косвенным нагревом) и *анод* 6, притягивающий (когда на него подан положительный потенциал) или отталкивающий (когда на него подан отрицательный потенциал) электроны, испускаемые катодом. В первом случае диод «открыт» — в цепи анода протекает электрический ток; во втором «закрит» — ток анодной цепи практичес-

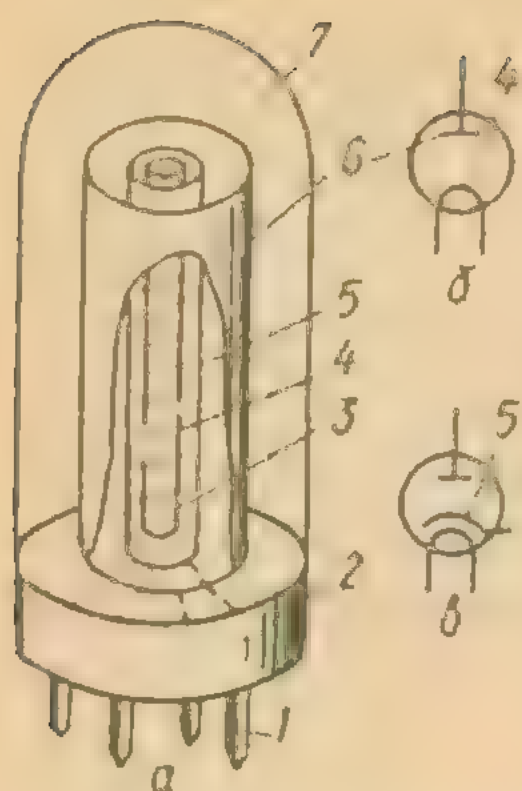


Рис. 19.1. Устройство диода с косвенным накалом (а) и условные обозначения диодов прямого (б) и косвенного (в) накала:
1 — контактные штырьки; 2 — цоколь; 3 — держатель подогревателя; 4 — безиндукционный подогреватель; 5 — катод — трубка из никеля с оксидным покрытием; 6 — анод (никель, молибден или тантал); 7 — стеклянный баллон.

ки отсутствует, поскольку сопротивление обратному току очень велико.

Катод прямого накала обладает малой тепловой инерцией. Он предназначен для использования в устройствах с питанием цепей накала постоянным током.

Катод косвенного накала представляет собой никелевую трубку, внутри которой находится нить накала, а снаружи — слой (например, оксидов бария и стронция), который легко испускает электроны при нагреве. Катод с косвенным подогревом потребляет большую мощность, но позволяет использовать для накала переменный ток.

Основной характеристикой диода является зависимость анодного тока от анодного напряжения (*вольт-амперная характеристика*).

Диоды применяют в качестве детекторов в радиоаппаратуре и в качестве кенотронов для выпрямителей тока. На рисунке 19.2 приведены схемы однополупериодного (а) и двухполупериодного (б) кенотронных выпрямителей. Катод кенотрона *K* включен на напряжение накала 6,3 В. Раскаленная нить испускает электроны, которые под действием положительного потенциала, приложенного к аноду *A* в полупериоды *I* и *III*, образуют цепь тока в направлении от катода к аноду, а затем через нагрузку. Для сглаживания пульсаций служит фильтр, состоящий из дросселя *L* и конденсаторов *C1* и *C2*. В схеме двухполупериодного выпрямления с двуханодным кенотроном работают как бы два однополупериодных выпрямителя: в полупериоды *I* и *III* выпрямляется напряжение с витков между нулевой и верхней точками вторичной обмотки, а во *II* и *IV* — с нижней части обмотки.

Полупроводниковые диоды подразделяют на выпрямительные (мощные диоды называют силовыми), высокочастотные, импульсные, опорные (стабилитроны), варикапы, туннельные, фото-, светодиоды и др. Их условные обозначения показаны на рисунке 19.3.

Различают германиевые и кремниевые диоды. В чистом монокристаллическом виде эти полупроводниковые материалы близки к диэлектрикам, так как не содержат

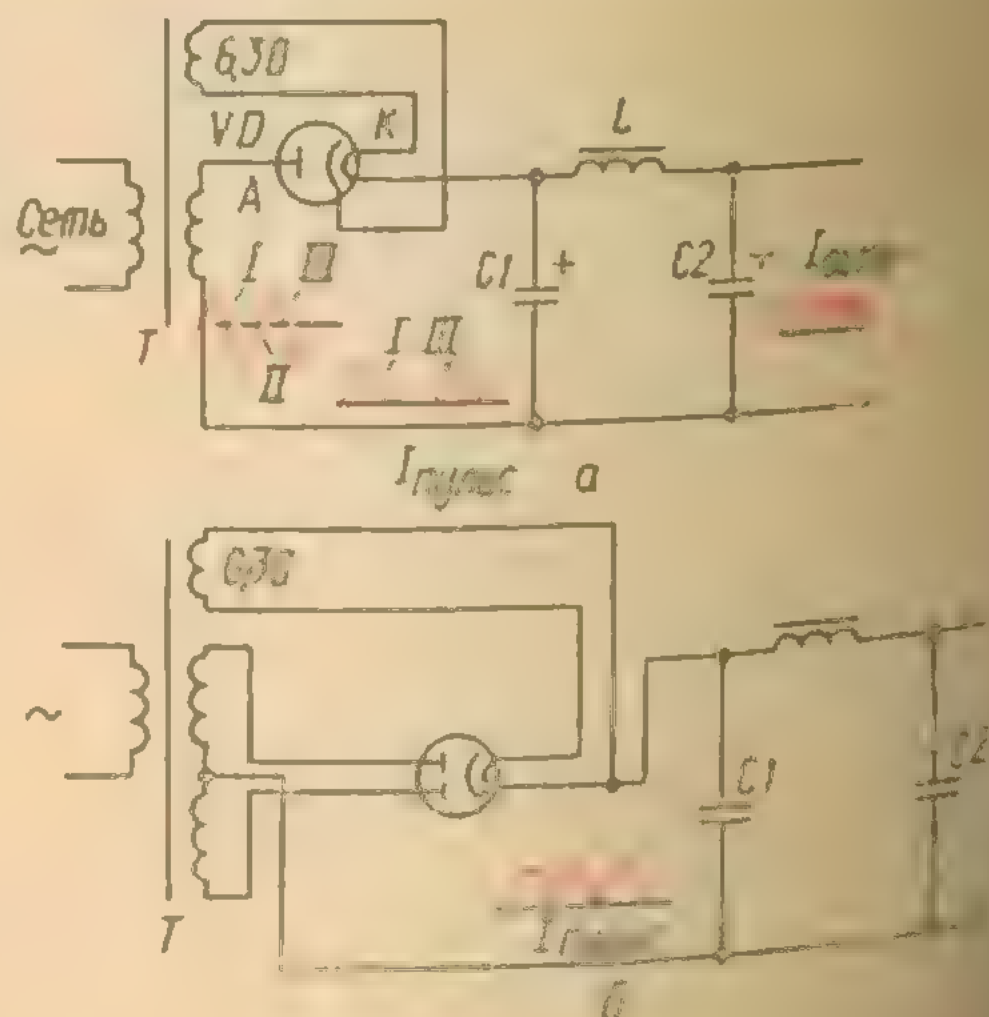
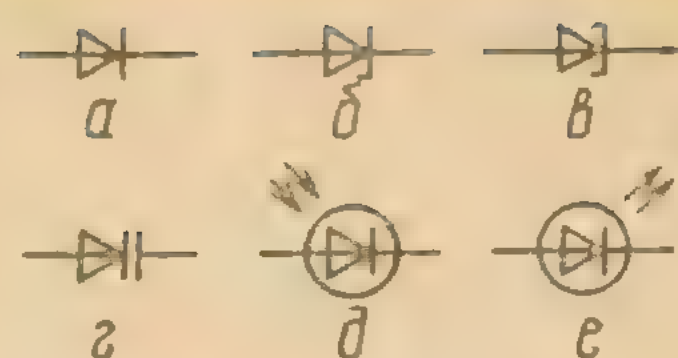


Рис. 19.2. Кенотронный однополупериодный (а) и двухполупериодный (б) выпрямители:
T — трансформатор; *L* — дроссель фильтра; *C1* и *C2* — электролитические конденсаторы фильтра.

Рис. 19.3 Полупроводниковые диоды (условные обозначения).
 а — выпрямительные и импульсные; б — стабилитроны; в — туннель-
 диоды; г — варикапы; д — фотодиоды; е — светодиоды.



свободных электронов (носителей заряда). Носители зарядов в полупроводниках возникают лишь при поглощении энергии — тепловой, лучистой, электрической и т. д. Полупроводники можно сделать электропроводными, введя в их состав очень малое количество примесей ($10^{-5} \dots 10^{-6}\%$) других элементов.

Например, если в чистый германий, который является четырехвалентным элементом, добавить примесь пятивалентной сурьмы или мышьяка, то в нем увеличится число свободных электронов. Такой полупроводник называют полупроводником с электронным типом электрической проводимости (*n*-типа). Если же введена примесь трехвалентных элементов (индия, галлия или алюминия), то в германии окажется недостаток электронов, или, как говорят, в нем образуются «дырки», которые стремятся принимать электроны, то есть ведут себя как положительно заряженные частицы. Такой полупроводник называют полупроводником с положительным типом электрической проводимости (*p*-типа) или полупроводником с дырочной электрической проводимостью.

Принцип действия полупроводникового диода показан на рисунке 19.4. Он представляет собой соединение полупроводниковых элементов с электронной (*n*-типа) и «дырочной» (*p*-типа) проводимостями. Область на границе этих полупроводников называют *n-p*-переходом. Здесь образуется слой, который способен хорошо пропускать электрический ток в одном направлении: когда минус источника оказывается соединенным с *n*-слоем, а плюс — с *p*-слоем (рис. 19.4, а). Физическая суть подобного явления приблизительно такова: электроны отталкиваются от отрицательного полюса источника тока и направляются к граничному слою. Сюда же от положительного полюса движутся «дырки» и здесь легко рекомбинируют с электронами. Электрическое сопротивление *n-p*-перехода в этом случае мало. В цепи протекает ток, ограниченный в основном внешним сопротивлением *R* цепи. На смену рекомбинированным электронам из сети поступают новые электроны, в *p*-слое образуются

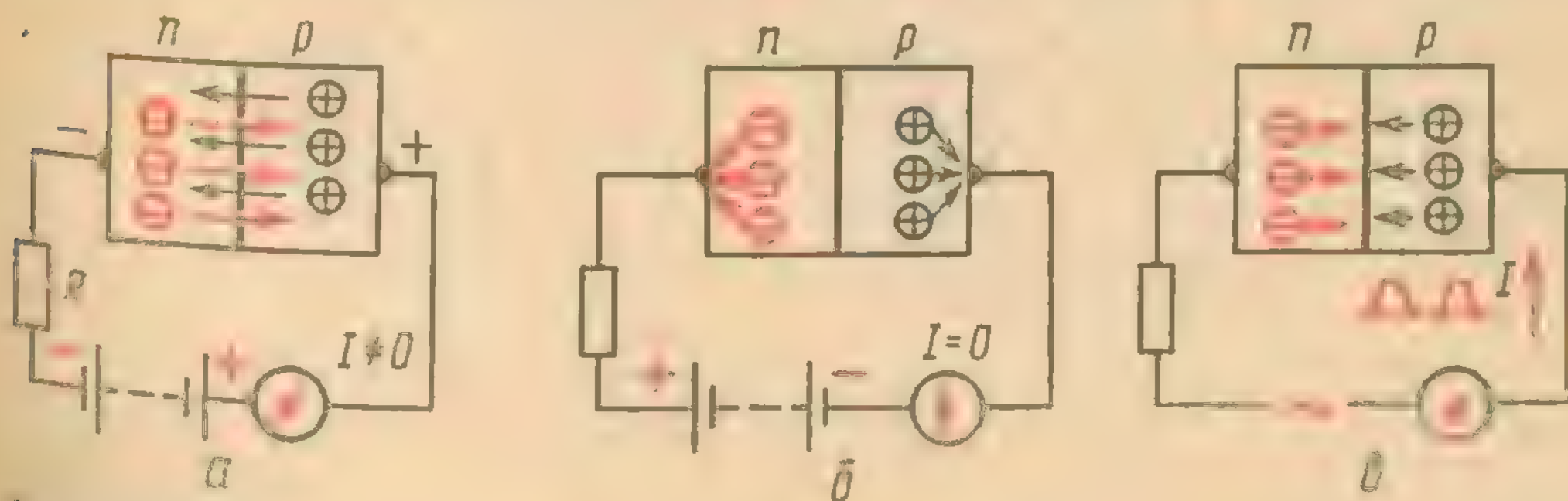


Рис. 19.4. Принцип действия полупроводникового диода.

новые «дырки», а освободившиеся при этом электроны уходят к положительному полюсу источника тока.

Если поменять полярность батареи питания (рис. 19.4, б), то электроны из n -слоя устремятся к положительному электроду батареи, а «дырки» — к отрицательному; и те и другие удаляются от n — p -перехода. Сопротивление перехода в этом случае настолько велико, что практически ток в цепи отсутствует.

Если к n — p -переходу приложить переменное напряжение, то в цепи появится пульсирующий ток, свидетельствующий о том, что такой переход работает как вентиль (рис. 19.4, в).

К основным параметрам *выпрямительных диодов* относятся следующие: среднее значение выпрямленного тока $I_{пр ср}$, длительное протекание которого нагревает диод до допустимой температуры; среднее значение прямого падения напряжения $U_{пр ср}$; среднее значение обратного тока $I_{обр}$ при заданном значении обратного напряжения $U_{обр}$; диапазон рабочих частот. Важным параметром является также предельно допустимая амплитуда обратного напряжения, которое диод выдерживает длительно. Как правило, это напряжение на 20% меньше напряжения пробоя $U_{обр.пр}$ (рис. 19.5).

Выпрямительные диоды разделяют на диоды малой мощности (выпрямленный ток до 0,3 А), средней (ток от 0,3 до 10 А) и большой мощности (ток больше 10 А). Последние называют *силовыми вентилями*.

На большое напряжение диоды (вентили) собирают в *высоковольтные столбы*, в которых несколько диодов включают последовательно.

В отличие от выпрямительных *высокочастотные диоды* более универсальны, так как могут работать в широком диапазоне частот, а также в детекторах, модуляторах и нелинейных преобразователях электрических сигналов. Их разновидностью являются *импульсные диоды*, предназначенные для использования в качестве ключевых элементов в быстродействующих импульсных схемах. Они обладают максимальным быстродействием.

Для стабилизации уровня постоянного напряжения в слаботочных

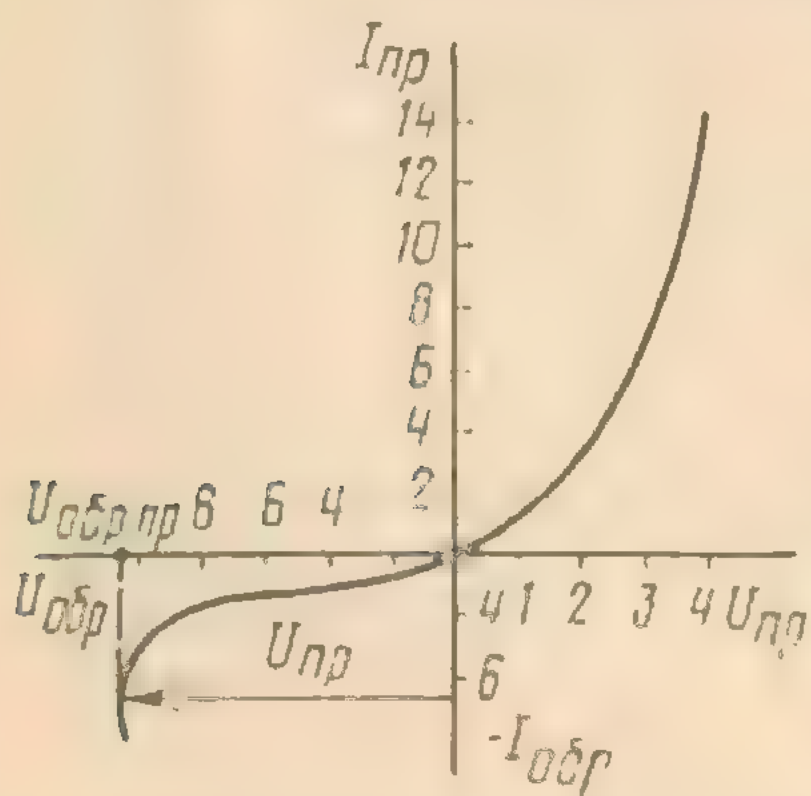


Рис. 19.5. Статическая вольт-амперная характеристика диода с p — n -переходом.

схемах применяют *стабилитроны* — кремниевые плоскостные диоды, напряжение на которых в области электрического пробоя слабо зависит от тока.

В некоторых слаботочных схемах применяются диоды, которые меняют емкость в зависимости от приложенного напряжения — *варикапы*. *Туннельные диоды* и их разновидность — *обращенные диоды* используются в быстродействующих переключателях (до 10^9 переключений в секунду).

Фотодиоды используются для преобразования световых сигналов в электрические. Они могут работать без источника питания в качестве вентильных элемен-

гов. В цепи, в которую включен фотодиод, ток возникает лишь при освещении фотодиода. Ток появляется в результате образования парных зарядов электрон-«дырка». «Дырки» перемещаются в p -область, а электроны — в n -область: на выводах фотодиода появляется разность потенциалов (0,1...0,3 В). В замкнутой цепи, подключенной к фотодиоду, протекает ток.

19.2. СХЕМЫ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ НА ДИОДАХ (ВЕНТИЛЯХ)

На рисунке 19.6, а показана схема однополупериодного выпрямителя однофазного тока. Напряжение переменного тока, которое необходимо для выпрямления, получают при помощи трансформатора. Нагрузку включают в цепь вторичной обмотки трансформатора последовательно с выпрямителем VD , который пропускает положительную полуволну переменного тока, когда верхние витки имеют положительный потенциал по отношению к нижним. Обратная полуволна напряжения не вызывает прохождения тока через нагрузку, так как обратное сопротивление выпрямителя очень велико.

Недостаток однополупериодной схемы заключается в том, что в цепи нагрузки течет пульсирующий ток (частота пульсаций — 50 в секунду).

На рисунке 19.6, б приведена двухполупериодная схема выпрямителя однофазного тока. От средней точки вторичной обмотки выведен один полюс цепи с выпрямленным током, а вторым полюсом попеременно являются концы от крайних витков a и b обмотки. По существу эта схема объединяет два однополупериодных выпрямителя, которые работают попеременно в зависимости от направления и знака полуволны напряжения.

При положительной полуволне напряжения верхние витки имеют положительный потенциал по отношению к средним виткам (средняя точка), а средние витки — положительный потенциал по отношению к нижним виткам. Вектор напряжения делится пополам, и выпрямляется его верхняя половина от точки O до точки a . Ток проходит по цепи: *средняя точка — верхние витки — выпрямитель 1 — нагрузка — средняя точка*. При отрицательном полупериоде средняя точка имеет отрицательный потенциал по отношению к точке b , но в то же время положительный потенциал по отношению к точке a . Выпрямленный ток проходит по цепи: *средняя точка — выпрямитель 2 — нагрузка — средняя точка*. Таким образом, выпрямление происходит в каждый полупериод, но выпрямляется лишь половина напряжения, получаемого во вторичной обмотке трансформатора. В этом заключается основной недостаток схемы.

Схема, изображенная на рисунке 19.6, в, свободна от подобного недостатка. Четыре выпрямителя включены по мостовой схеме. В момент положительной полуволны, когда верхние витки имеют положительный потенциал по отношению к нижним, ток проходит по цепи: *точка а — выпрямитель 1 — нагрузка — выпрямитель 1' — точка б*. При отрицательной полуволне, когда нижние витки имеют

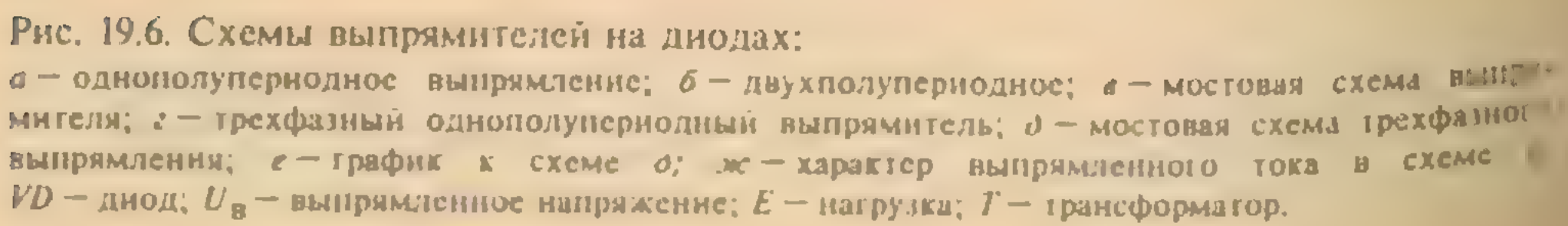
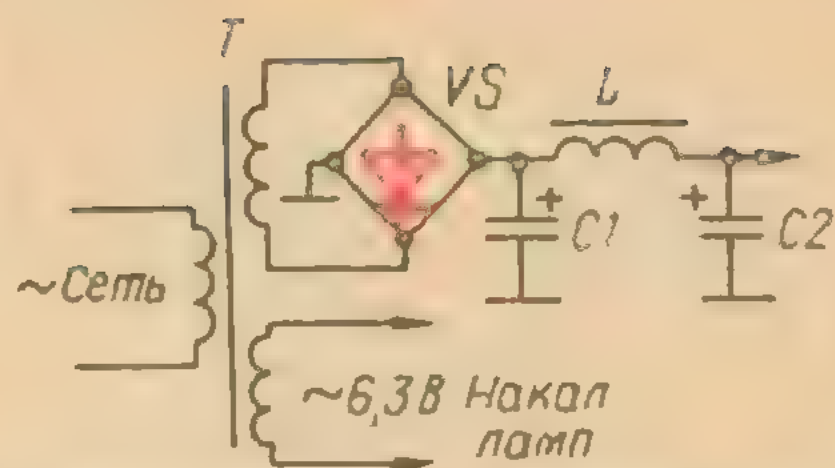


рис. 19.7. Схема выпрямления по мостовой схеме со сглаживающим фильтром: T — трансформатор; VS — мост из вентиляй; L — дроссель; $C1$ и $C2$ — конденсаторы сглаживающего фильтра.



положительный потенциал по отношению к верхним, ток проходит по цепи: точка b — выпрямитель 2 — нагрузка — выпрямитель 2' — точка a . Мостовые схемы более экономичны, чем предыдущие, и широко применяются в технике.

На рисунке 19.6, $г$ показана схема выпрямления трехфазного тока. В каждой фазе работает однополупериодный выпрямитель. Но так как векторы напряжения фаз сдвинуты на 120° по отношению друг к другу, то полуволны выпрямленного тока перекрывают друг друга и пульсация уменьшается.

На рисунке 19.6, $д$ приведена мостовая схема трехфазного выпрямителя (схема Ларионова). В каждой фазе выпрямляются обе полуволны, так как здесь двухполупериодное выпрямление. К мостику из выпрямителей подводится линейное напряжение. В течение каждой шестой периода в цепи под действием выпрямленного напряжения одной из фаз проходит постоянный ток.

В момент времени I мгновенное напряжение фазы A — максимальное. Положительный потенциал имеют правые витки обмотки. Ток в цепи нагрузки идет по цепи: фаза A — выпрямитель 1 — нагрузка — выпрямители 4 и 6 — фазы B и C — нулевая точка обмотки — фаза A . В момент I' (рис. 19.6, $е$), когда на фазе A максимум обратной полуволны, ток идет по цепи: фаза A — нулевая точка O — фазы B и C — выпрямители 3 и 5 — нагрузка — выпрямитель 2 — фаза A . Таким образом, оба полупериода в фазе A дали выпрямленный ток. В моменты 2 и 2' аналогичное выпрямление произойдет в фазе B , а в моменты 3 и 3' — в фазе C .

Общая картина выпрямленного тока представлена на рисунке 19.6, $ж$.

Схема Ларионова в настоящее время получила преимущественное распространение для выпрямления трехфазного тока.

В радиотехнических устройствах (сетевых радиоприемниках, телевизорах, магнитофонах) используют главным образом выпрямители на диодах, собранных по мостовой схеме (рис. 19.6, $в$). Для сглаживания пульсаций переменного тока на выходе выпрямителя включают сглаживающий фильтр (рис. 19.7), состоящий из дросселя L и конденсаторов $C1$ и $C2$.

19.3 СИЛОВЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ — ТИРИСТОРЫ. УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Тиристором называют прибор с тремя или более $p-n$ -переходами, вольт-амперная характеристика которого имеет участок отрицательного сопротивления. Если тиристор включить в цепь переменного

тока, то он будет открывать цепь для прохождения тока в нагрузку лишь при достижении мгновенным значением напряжения заданного уровня или же при подаче на управляющий электрод отпирающего напряжения. Тиристоры подразделяются на двухэлектродные (динисторы) и трехэлектродные (тринисторы). Они содержат по четыре чередующихся слоя с электрической проводимостью типа p и n , образующих три $p-n$ -перехода.

На рисунке 19.8, а показаны схема устройства и вольт-амперная характеристика динистора. Несмотря на весьма интенсивное повышение напряжения U_{np} на динисторе, ток сначала нарастает медленно до значения $I_{пер}$ (ток переключения). В этот период диод заперт. При достижении напряжением значения $U_{пер}$ ток резко возрастает, падение напряжения на приборе уменьшается. Сила тока в цепи в этот момент определяется главным образом сопротивлением нагрузки R_n .

Диод допускает определенный максимальный ток I_{max} , значение которого указано в паспорте прибора. Если этот ток будет превышен, диод выйдет из строя. При снижении тока в цепи до определенного значения $I_{выкл}$ (ток выключения) прибор возвращается в первоначальное (закрытое) состояние. Другими словами, динистор является переключающим диодом.

Если от одной из базовых областей сделать отвод, то напряжением отпираания можно управлять (схема тринистора на рисунке 19.8, б). При этом для отпираания тиристора на управляющий электрод достаточно подать лишь кратковременный импульс тока.

Запирание переключаемых диодов возможно или уменьшением тока до значения $I_{выкл}$, или переключением полярности напряжения в цепи анода (при обратной полуволне переменного тока, если диод включен в цепь переменного тока).

Если тиристор включен в цепь переменного тока, то его можно выключить, уменьшив импульс на управляющем электроде U или замкнув этот электрод на катод (n -слой).

Промышленность выпускает кремниевые тиристоры на анодные токи до нескольких сот ампер, причем ток управления составляет несколько десятков миллиампер, а у тиристоров на ток до 10 А — всего несколько миллиампер.

Перспективно использовать тиристоры в бесконтактных схемах автоматического управления нагревательными, осветительными и другими установками (см. гл. 21).

Широкое применение находят также специальные тиристоры: симметричные, фототиристоры, высокочастотные, запираемые и др. Их условные обозначения показаны на рисунке 19.9.

Симметричные тиристоры (симисторы) имеют пятислойную структуру типа $n-p-n-p-n$ с четырьмя $p-n$ -переходами (рис. 19.10). Здесь происходит пропускание тока при подаче управляющего сигнала на УЭ как в прямом, так и в обратном направлении (рис. 19.10, б).

Фототиристоры имеют в корпусе окно для облучения структуры световым потоком. Фототиристор отпирается как при подаче управляющего импульса, так и под воздействием светового потока.

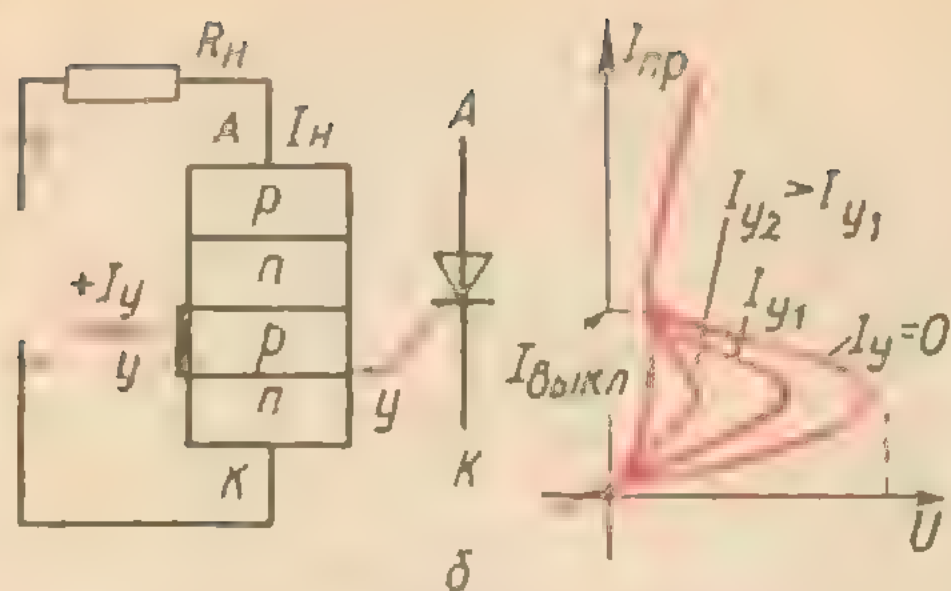
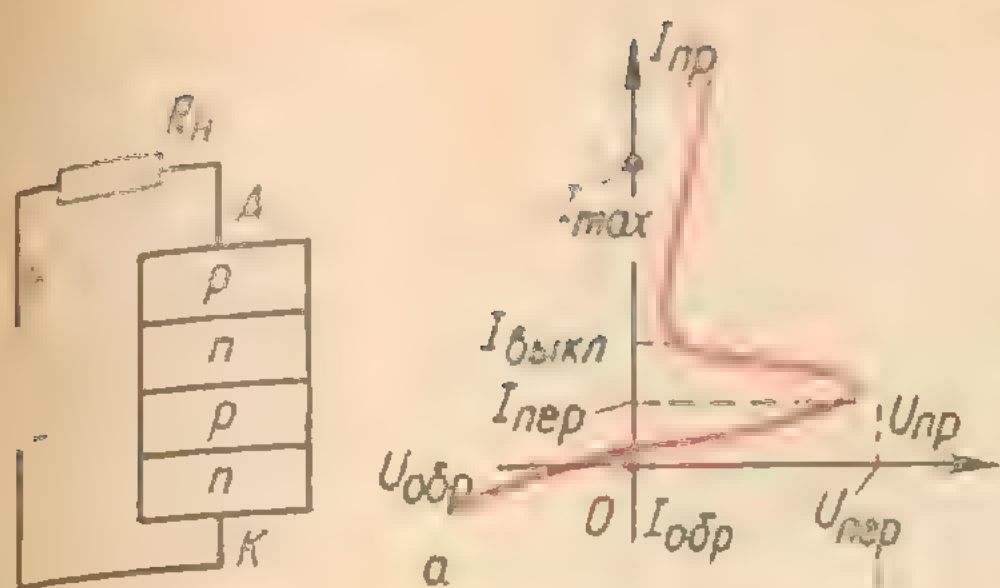


Рис. 19.8. Схемы устройства и вольт-амперные характеристики тиристоров — динистора (а) и триистора (б):
 A — анод; K — катод; Y — управляющий электрод.

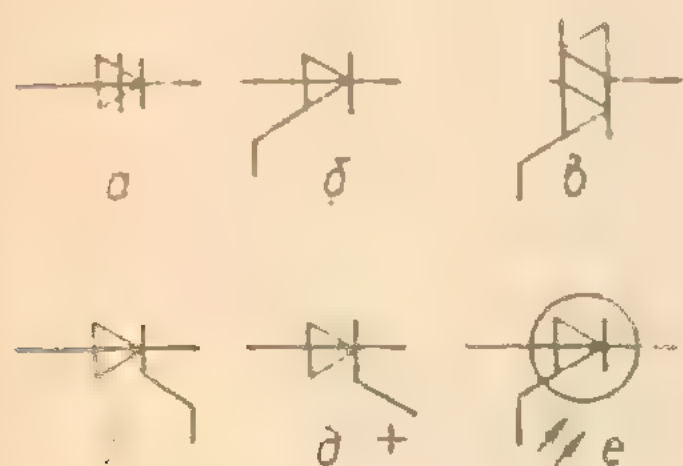


Рис. 19.9. Условные обозначения тиристорov:
 a — динистор; $б$ — тиристор с управлением по аноду;
 $в$ — симметричный тиристор; $г$ — тиристор с управлением по катоду; $д$ — запираемый тиристор; $е$ — фото-
 тиристор.

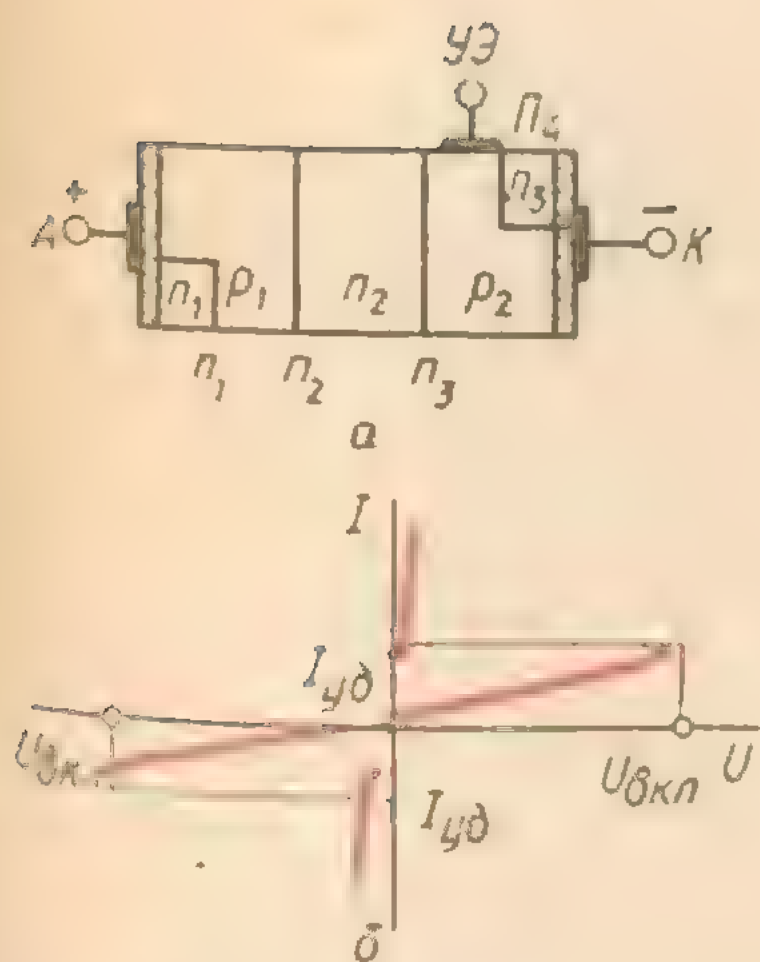


Рис. 19.10. Физическая структура тиристора (а) и его вольт-амперная характеристика (б):
 A — анод; K — катод; $YЭ$ — управляемый электрод; $n_1 - n_4$ — переходы; $I_{yд}$ — ток удержания; $U_{вкл}$ — напряжение включения.

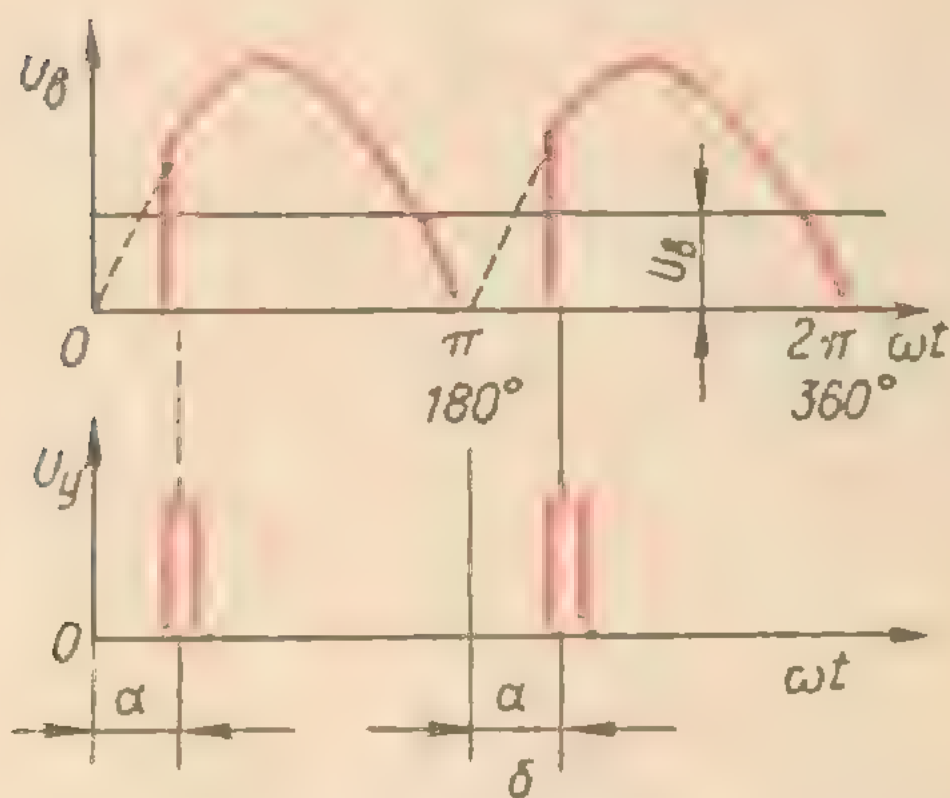
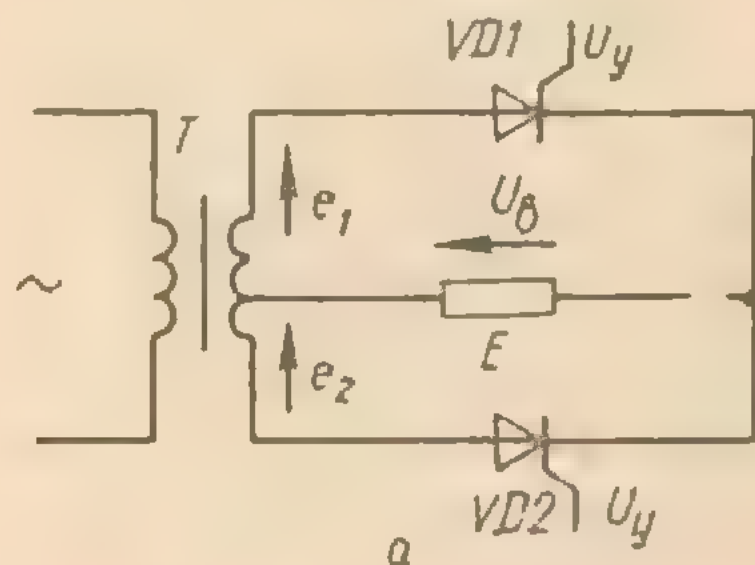


Рис. 19.11. Схема управляемого выпрямителя (а) и график выпрямленного напряжения (б):
 $VD1$ и $VD2$ — тиристоры; E — нагрузка; U_B — выпрямленное напряжение (среднее значение); U_y — напряжение управляющих импульсов; α — фазовый сдвиг момента включения тиристорov (угол управления).

Высокочастотные тиристоры могут работать на повышенных частотах.

Широкое применение находят тиристоры для управляемого выпрямления тока, когда имеется возможность регулировать уровень выпрямленного напряжения. В схеме выпрямления с управляемыми тиристорами (рис. 19.11) момент открывания тиристоров определяется моментом подачи управляющих импульсов u_{α} . Тиристоры при этом открываются с соответствующей задержкой на угол α по отношению к моменту перехода напряжения через нуль. Угол α называется углом управления. Среднее значение выпрямленного напряжения, равное площади прошедших через тиристоры долей полуволн, деленной на время ωt , можно регулировать в широких пределах.

Используются также трехфазные управляемые выпрямители.

19.4. УПРАВЛЯЕМЫЕ ЭЛЕКТРОВАКУУМНЫЕ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ — ТРИОДЫ И ТРАНЗИСТОРЫ

Электривакуумный триод. Электривакуумный триод — это электронная лампа, между катодом и анодом которой помещена *управляющая сетка*. Устройство триода, схема включения и его анодно-сеточные характеристики показаны на рисунке 19.12. Если на сетку 3 подать небольшой отрицательный потенциал, то поток электронов, направленный от катода к аноду, и, следовательно, ток в анодной цепи уменьшается. При большом отрицательном потенциале на сетке анодный ток прекращается вообще, лампа «заперта». Положительный потенциал на сетке ускоряет движение электронов, усиливает их поток и увеличивает ток в анодной цепи.

Если на сетку триода подать переменное напряжение (сигнал u_{α}), то колебание тока в анодной цепи будет по форме аналогично входному сигналу, но значительно больше его по мощности. Таким образом, триод увеличивает подведенный сигнал, то есть работает как электронный усилитель. Нагрузкой для усиленного сигнала служит сопротивление R_n , напряжение с которого может быть направлено на следующий каскад усиления или на прибор выхода.

На сетке обычно требуется поддерживать некоторое отрицательное напряжение, называемое напряжением сеточного смещения U_{α} (рис. 19.12, б). Это напряжение выбирают таким, чтобы входной сигнал находился в пределах прямолинейного участка анодно-сеточной характеристики, благодаря чему удастся избежать искажений сигнала в процессе его усиления.

Характеристики на рисунке 19.12, в изображены в несколько условном виде, в предположении, что напряжение на аноде остается неизменным. В реальных условиях напряжение на аноде меняется в зависимости от мгновенного значения тока в анодной цепи.

Электривакуумные триоды применяются в различных схемах автоматического управления, в усилителях низкой частоты и т. д.

Полупроводниковые триоды (транзисторы). Понятие «транзистор» (дословно — «передающее сопротивление») значительно шире поня-

тия «триод», так как относится и к многоэлектродным полупроводниковым приборам. Биполярный транзистор состоит из трех слоев полупроводника, причем крайние слои имеют одинаковый, а средний — иной тип электрической проводимости. На рисунке 19.13 показаны схемы устройства и условные обозначения триодов $n-p-n(a)$ и $p-n-p(b)$ типов. В триоде первого типа два $n-p$ -перехода. Переход, работающий в прямом направлении, называется эмиттером (E), средний слой (тысячные доли миллиметра) — базой (B), а следующий переход — коллектором (K).

Принцип действия можно уяснить, пользуясь рисунком 19.13, *в*. Батарея A присоединена так, что ее минус подключен к эмиттеру из материала n -типа, а плюс — к базе p -типа; в цепи эмиттер — база проходит ток. Если теперь батарею B подключить минусом к коллектору, а плюсом к базе, то ток в цепи не проходит. Когда же батарея B подключена так, как показано на рисунке, электроны, притягиваемые положительно заряженной базой, проходят через нее и попадают на коллектор. Значит, в цепи база — коллектор протекает ток, сила которого зависит от напряжения, приложенного между эмиттером и базой. Если, например, в цепь эмиттера передать слабый сигнал C от входного трансформатора $T1$, то напряжение u_k (или ток) в этой цепи будет иметь форму, показанную на графике 1: напряжение сигнала наложено на напряжение батареи. Напряжение же u_k в цепи коллектора будет повторять форму тока в цепи эмиттера. При помощи трансформатора $T2$ усиленный сигнал может быть выведен и передан на прибор — индикатор выхода (Вых.).

Принцип работы триода типа $p-n-p$ аналогичен описанному выше. Различие состоит лишь в полярности электродов, то есть в направлении движения носителей тока.

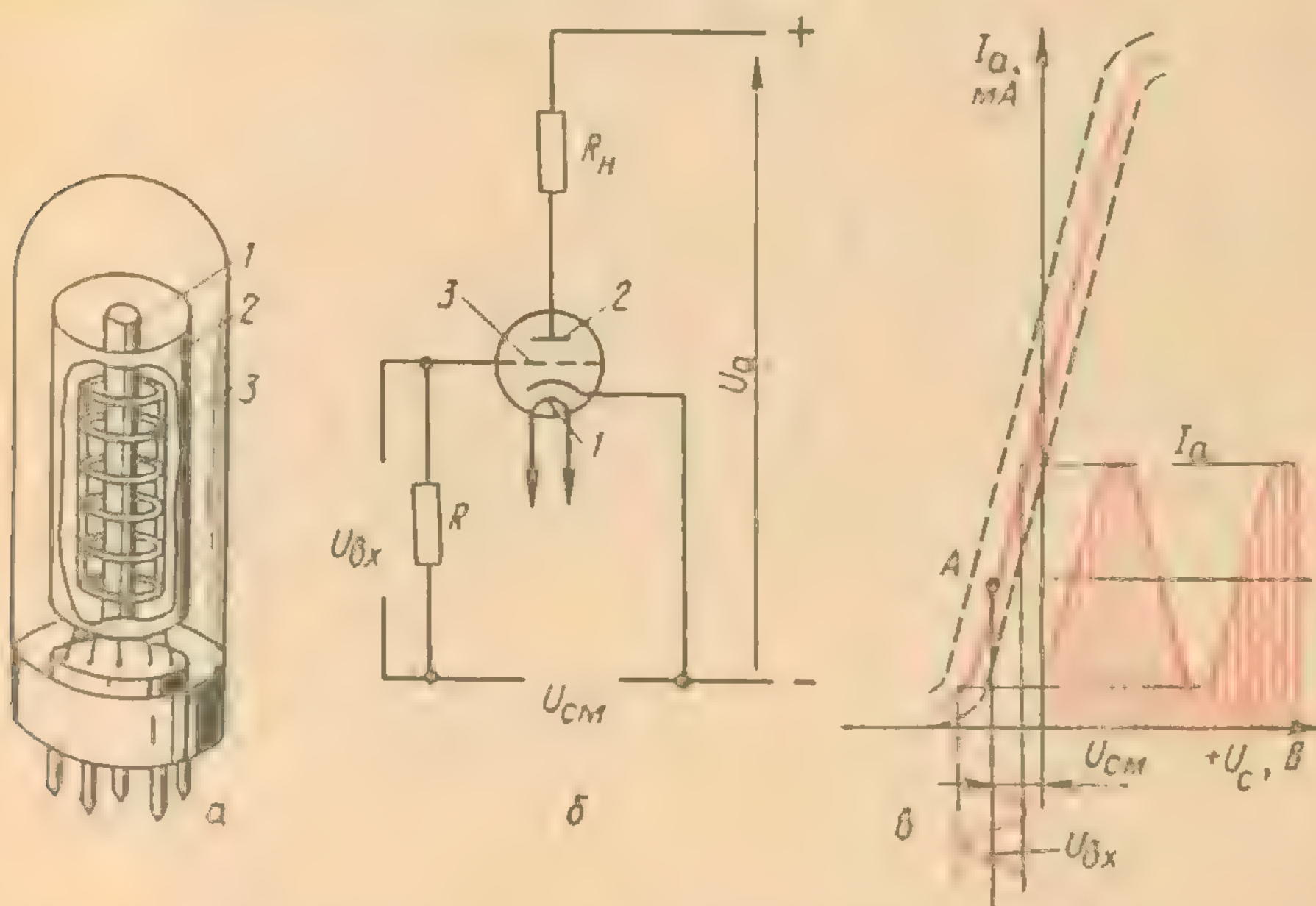


Рис. 19.12. Устройство (*а*), схема включения (*б*) и анодно-сеточные характеристики (*в*) триода:

1 — катод; 2 — анод; 3 — сетка.

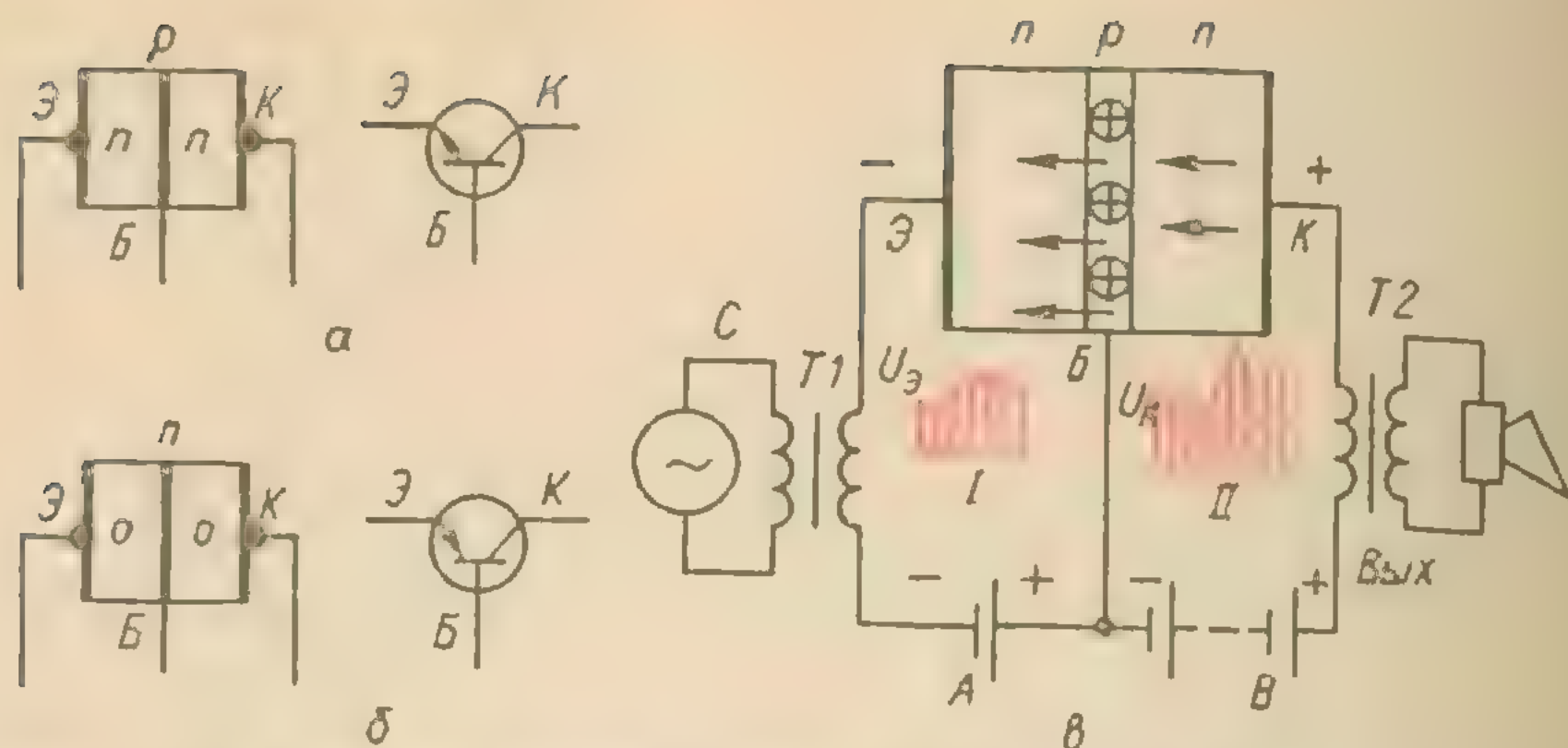


Рис. 19.13. Схемы транзистора типа $n-p-n$ (а) и типа $p-n-p$ (б) и схема включения транзистора на усиление напряжения сигнала (в): Э — эмиттер; К — коллектор; Б — база; С — сигнал; $U_э$ — напряжение в цепи эмиттера; $U_к$ — напряжение в цепи коллектора.

Триод может быть включен по трем различным схемам: с общей базой, как на рисунке 19.13, в, с общим эмиттером и с общим коллектором — в зависимости от необходимости получить тот или иной коэффициент усиления тока, напряжения или мощности.

Полевые (униполярные) транзисторы управляются при помощи электрического поля. При изменении напряженности поля, приложенного к управляющему каналу транзистора, изменяется проводимость канала, по которому протекает ток выходной цепи.

Совершенствование полупроводниковых приборов, уменьшение кристаллов, используемых в приборах, до размеров булавочной головки, а выводов от них до толщины волоса привело к созданию интегральных микросхем, в которых на общей подложке объединены электрически связанные между собой транзисторы, диоды, резисторы и конденсаторы. Переход к интегральной электронике позволил повысить плотность упаковки аппаратуры до десятков тысяч деталей в 1 см^3 .

19.5. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ И ИМПУЛЬСНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Типы усилителей. Электронным усилителем называется устройство, используемое для усиления сигналов по мощности за счет энергии источника питания усилителя. Блок-схема усилителя приведена на рисунке 19.14. Входной сигнал $U_{вх}$ подается на вход усилителя. Этот сигнал управляет расходом энергии источника питания ИП при помощи внутренней схемы собственно усилителя Ус. К выходу усилителя подключается нагрузка Е, например исполнительное устройство регулятора технологического процесса.

Хотя по своей природе все электронные усилители являются усилителями мощности, в ряде случаев основным показателем усилителя целесообразно принимать не значение мощности, а значение тока или напряжения.

Усилитель напряжения на выходе (на нагрузке) обеспечивает

заданное выходное напряжение. При этом при небольших изменениях тока во входной и выходной цепях обеспечивается сравнительно большое изменение напряжения на нагрузке. Этот режим требует соблюдения условий: $R_{вх} \gg R_{и}$, то есть внутреннее сопротивление усилителя на входе должно быть значительно больше внутреннего сопротивления источника входного сигнала, и $R_E \gg R_{вых}$. В усилителях тока должно быть выполнено условие $R_{вх} \ll R_{и}$ и $R_E \ll R_{вых}$. Для усилителя мощности $R_{вх} \approx R_{и}$ и $R_E \approx R_{вых}$.

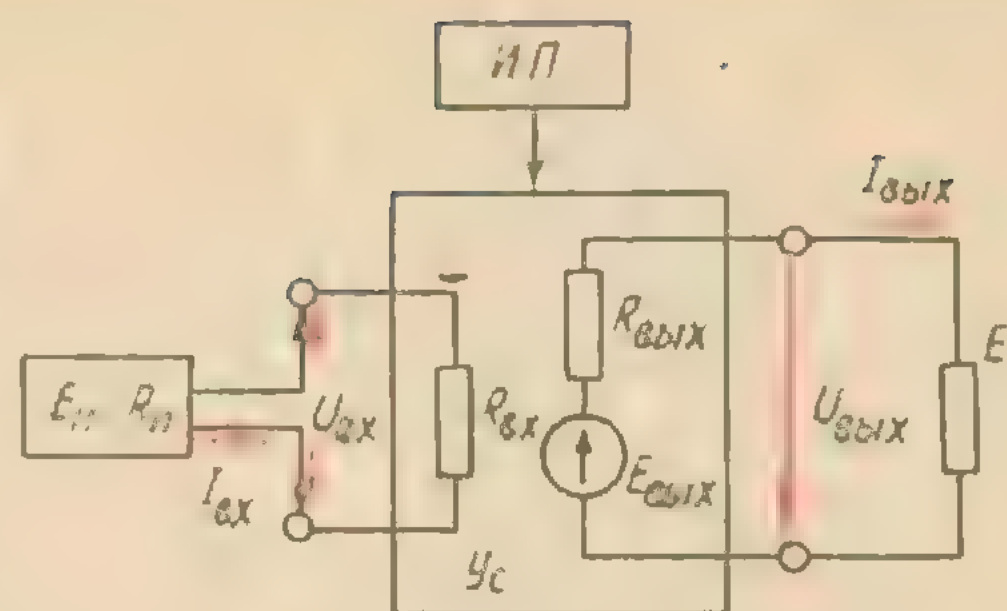


Рис. 19.14. Блок-схема усилителя:
Ус — собственно усилитель; ИП — источник питания; $U_{вх}$ — напряжение входного сигнала; E — нагрузка усилителя.

Различают усилители постоянного тока и переменного тока в зависимости от характера изменения во времени входного сигнала. Усилители переменного тока, в свою очередь, подразделяются на усилители низкой и высокой частоты. Импульсные усилители являются разновидностью усилителей высокой частоты.

Основные параметры усилителей. Кроме входного и выходного сопротивлений усилителя, к его основным параметрам относят: коэффициент усиления, представляющий собой отношение напряжений (токов или мощности) на выходе и входе усилителя; коэффициент полезного действия, определяемый как отношение выходной мощности усилителя к мощности, потребляемой усилителем от источника питания. Важное значение имеют также амплитудно-частотная характеристика (зависимость модуля коэффициента усиления от частоты) и фазо-частотная характеристика (зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжением от частоты) и др.

Импульсные устройства применяются в промышленной электронике для получения импульсных сигналов с целью передачи, обработки, хранения информации (маломощные информационные импульсные устройства) и для генерирования и формирования мощных импульсов с целью воздействия на различные процессы (силовые импульсные устройства).

К генераторам импульсов относятся триггеры — электронные реле с гальваническими связями и мультивибраторы — релаксационные автогенераторы, генерирующие импульсное напряжение прямоугольной формы. Для генерирования коротких импульсов используют блокинг-генераторы.

В устройствах промышленной электроники наряду с импульсными схемами находят применение также элементы цифровой вычислительной техники, так называемые логические элементы и схемы.

Элементы «Логика», получая сигнал от датчика или от предыдущего звена схемы управления, реализуют различные логические функции (операции): а) функцию И, когда сигнал на выходе логического элемента появляется при подаче сигналов одновременно на двух или более входах; б) функцию ИЛИ, когда сигнал на

выходе появляется при подаче сигнала на один из входов; в) функцию НЕ, когда сигнал на выходе имеется при отсутствии сигнала на входе или наоборот и т. п. (функции ЗАПРЕТ, ПАМЯТЬ, ЗАДЕРЖКА, ПОВТОРЕНИЕ и др.).

Выпускаются логические элементы как полупроводниковые, так и магнитные и пневматические (работающие на сжатом воздухе).

19.6. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СХЕМАХ И ПРИБОРАХ ДЛЯ ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Микросхема — это микроэлектронное изделие с высокой плотностью монтажа элементов. Существует два основных вида интегральных микросхем (ИМС), отличающихся технологией производства: полупроводниковые (твердые) и гибридные (пленочные). Плотность упаковки полупроводниковых ИМС достигает в настоящее время 1000...1500 элем/см², а гибридных ИМС — 150...200 элем/см². Эта плотность постоянно растет.

Сформированную ИМС помещают в герметизированный корпус с выводами, и после этого она уже не подлежит переделке или ремонту. В связи с малыми размерами ИМС имеют небольшие обратные напряжения на переходах и мощности рассеяния. Превышение подводимого напряжения приводит к выходу ИМС из строя.

Наиболее распространены цифровые ИМС. Их применяют для цифровой (дискретной) обработки информации в вычислительной технике, цифровых измерительных приборах и различных устройствах автоматики.

Для счета числа импульсов в устройствах информационно-вычислительной и цифровой измерительной техники используют цифровые счетчики импульсов. Их выполняют на основе триггеров, и они могут быть суммирующими, вычитающими или реверсивными, то есть работать и как суммирующие, и как вычитающие.

Регистры — это устройства, предназначенные для приема, хранения и передачи информации. Информация в них записывается в виде различных сочетаний импульсов. Эта информация может быть преобразована затем в управляющие сигналы для передачи на исполнительные элементы вычислительной машины, цифровые индикаторы и другие устройства при помощи дешифраторов.

Для отображения информации применяют различные специальные приборы, позволяющие получить цифровые, буквенные и знаковые сигналы, а также зависимости величин в виде графиков.

Электронно-лучевая трубка (ЭЛТ) — один из универсальных приборов для отображения информации. В ЭЛТ электронный поток, выходящий из катода, формируется магнитным или электрическим полем в узкий пучок, который под действием отклоняющей системы пишет или рисует на светящемся экране ту или иную информацию.

Для воспроизведения цифровых, буквенных или знаковых сигналов применяются специальные лампы накаливания — накальные индикаторы, а также газоразрядные приборы — неоновые лампы, газора-

рядные индикаторы и приборы, действие которых основано на принципе электролюминесценции.

Накальные индикаторы серии ИВ представляют собой лампы накаливания в стеклянном баллоне, у которых на фоне пластинки черного цвета натянута несколько нитей (от четырех до девяти). Все нити имеют один общий выход, а вторые концы выведены на отдельные электроды. Сочетанием включенных нитей накаливания можно получить стилизованное изображение буквы или цифры. Недостаток этих индикаторов — большая инерционность (до 0,2 с) и относительно высокая потребляемая мощность.

В качестве индикаторов широко также применяются ионные приборы самостоятельного тлеющего разряда с холодным катодом.

Слаботочные ионные приборы тлеющего разряда заполняют инертными газами — неоном, аргоном, гелием или их смесью.

Неоновая лампа представляет собой двухэлектродный прибор, применяемый в качестве сигнальной лампы напряжения. Напряжение зажигания — 60...150 В, ток — несколько миллиампер.

Цифровая индикаторная лампа объединяет ряд катодов, выполненных из нихромовой проволоки, которая изогнута в форме цифр от 0 до 9. Подводя напряжение к выводам катодов, можно получить светящееся изображение каждой из этих цифр или их сочетаний. Эту лампу применяют в показывающих электрических приборах и вычислительных машинах, а также в различных схемах автоматического управления.

Знакобуквенные газоразрядные индикаторные лампы имеют катоды, выполненные в виде букв латинского или греческого алфавитов или математических символов.

Электролюминесцентные индикаторы, в которых используется явление электролюминесценции — свечения некоторых веществ (люминофоров) при возбуждении их электрическими полями или токами, применяют на пультах и табло, а также для отображения выходных данных на вычислительных машинах и показаний цифровых измерительных приборов.

Светодиоды (электролюминесцентные диоды) преобразуют энергию электрического поля в оптическое излучение видимой части диапазона и применяются для индикации и вывода информации в микроэлектронных устройствах. При помощи их набора можно воспроизводить цифры от 0 до 9.

Жидкокристаллические индикаторы используют внешнюю световую энергию и потому отличаются очень малым расходом электроэнергии.

19.7. НЕКОТОРЫЕ ДАТЧИКИ, ШИРОКО ПРИМЕНЯЕМЫЕ С ЭЛЕКТРОННЫМИ СХЕМАМИ УСИЛЕНИЯ. ФОТОРЕЛЕ

В устройствах автоматического регулирования широко применяются отдельные электронные устройства, выполненные с различными датчиками — температуры, влажности, освещенности и т. п. В настоящее время многие типы датчиков выполняют на основе полупроводнико-

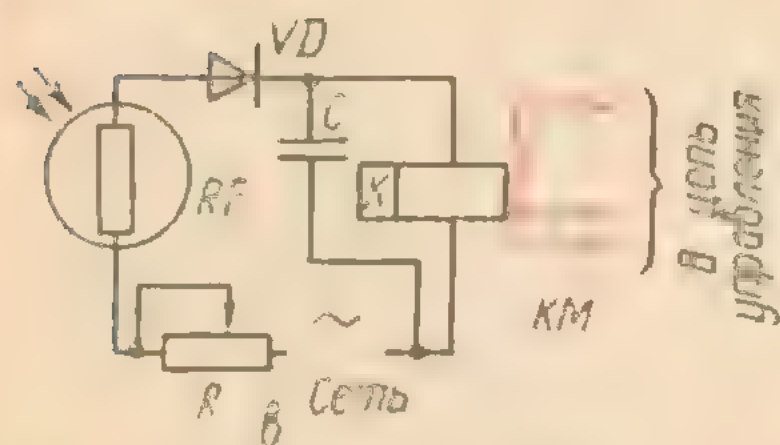
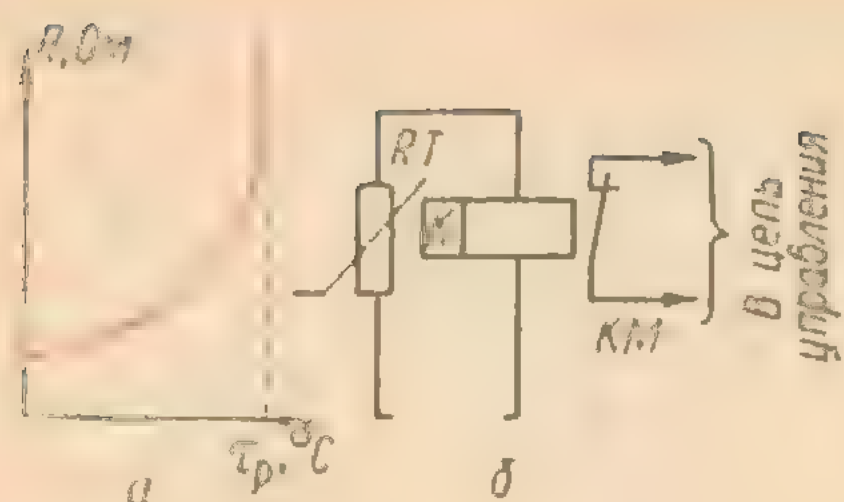


Рис. 19.15. Зависимость сопротивления позистора от температуры (а), принципиальная схема простейшего реле с позистором (б), схема фотореле с фоторезистором (в):

RT — позистор; K — поляризованное электромагнитное реле; KF — фоторезистор; VD — диод; C — конденсатор фильтра.

вых материалов. Это так называемые полупроводниковые нелинейные элементы. Их нелинейность проявляется в том, что сопротивление меняется в зависимости от различных энергетических воздействий (механическое, тепловое, облучение, освещение и т. д.). Такими элементами являются термисторы, позисторы, фоторезисторы (фотосопротивления),

варисторы, тензолиты, газоразрядные приборы. Различают нелинейные элементы первого рода, сопротивление которых возрастает с увеличением тока, и второго рода, сопротивление которых убывает при усилении тока.

Термисторы — полупроводниковые резисторы инерционного типа с отрицательным температурным коэффициентом, обладающие характеристикой первого рода. Их выполняют из оксидных (подвергнутых окислению) полупроводниковых материалов, состоящих из смеси двух или трех оксидов металлов. Наибольшее распространение получили медно-марганцевые (ММТ) и кобальто-марганцевые (КМТ) термисторы. Последние более чувствительны к температуре.

Позисторы — это полупроводниковые нелинейные элементы с активным сопротивлением с положительным температурным коэффициентом сопротивления. Им свойственна значительно более нелинейная характеристика, нежели термисторам. Материалом для их изготовления служат титанат бария и специальные примеси.

Позисторы типа СТ6-3Б применяют в схемах измерения температуры, а позисторы типов СТ6-1А и СТ6-1Б — в схемах с релейным режимом работы. Понятие о схеме с релейным режимом работы иллюстрируется рисунком 19.15, а и б. Когда температура окружающей среды ниже заданной, контакты KM реле разомкнуты, так как сопротивление позистора сравнительно мало и по катушке реле K протекает ток. При возрастании окружающей температуры до значения t_p сопротивление позистора скачкообразно увеличивается (релейный эффект). ток в цепи реле K падает, а его контакты замыкаются и включают исполнительные и сигнализирующие устройства.

Варисторы — нелинейные элементы, сопротивление которых изменяется в зависимости от приложенного напряжения, — изготавливают на основе карборунда (карбид кремния).

Элементы с таким сопротивлением (вилит) используются в вентилях разрядниках для защиты электрических сетей, станций и подстанций от волн перенапряжения, возникающих в линиях во время грозных разрядов и по другим причинам. При появлении волны перенапряжения сопротивление разрядника резко падает, линия на

мгновение оказывается соединенной с землей, в которую и уходят заряды, создающие волну перенапряжения.

Фоторезисторы — нелинейные элементы, сопротивление которых изменяется под действием облучения или освещения, изготавливают из сернистого свинца (ФС-А), сернистого висмута (ФС-Б), сернистого кадмия (ФС-К) и др.

Если неосвещенному (необлученному) фоторезистору свойственно очень большое сопротивление (от десятков тысяч до десятков миллионов омов), то сопротивление освещенного (облученного) фоторезистора резко падает, снижаясь в несколько сот раз.

Чувствительность фоторезисторов в тысячи раз превышает чувствительность вакуумных фотоэлементов, а способность пропускать сравнительно большие токи позволяет применять их в автоматических схемах непосредственного действия (без использования усиления). Следует заметить, что соблюдения полярности в схемах с фотосопротивлениями не требуется. Существенный недостаток фоторезисторов — значительная инерционность — ограничивает область их применения и снижает в ряде случаев практическую ценность этих элементов.

На рисунке 19.15, в приведена схема фотореле с использованием фоторезистора R_F . При увеличении освещенности сопротивление резистора резко падает и возрастает ток в цепи реле K . Диод VD служит для выпрямления тока (реле K — поляризованное, постоянного тока), а конденсатор C — для сглаживания пульсаций тока.

Чтобы повысить чувствительность фотореле, применяют усилители на полупроводниковых триодах. На рисунке 19.16 приведена схема автомата для включения освещения с фотореле типа ФР-2. Фоторезистор R_F (типа ФСК-1Г) устанавливают непосредственно на корпусе прибора или выносят на расстояние до 15 м. Катушка реле $K1$, контакты которого включают магнитный пускатель $KМ$, включена между коллектором и эмиттером триода $VT2$. Диодом VD осуществляется однополупериодное выпрямление переменного тока, а конденсатором C сглаживается пульсация выпрямленного тока.

При освещенности более, например, 10 лк с делителя, составленного из фоторезистора R_F и резисторов $R5$ и $R6$, на базу триода $VT1$ подается отрицательный потенциал относительно эмиттера. Триод $VT1$ открыт, и через $R3$ и $R4$ протекает ток. База триода $VT2$ получает потенциал с $R3$ такого значения, что $VT2$ проводит ток и шунтирует катушку реле $K1$. Катушка $KМ$ разомкнута, и освещение отключено.

При снижении освещенности сопротивление фоторезистора R_F увеличивается и происходит перераспределение напряжения на делителе, состоящем из R_F , $R5$ и $R6$. Потенциал на базе триода $VT1$

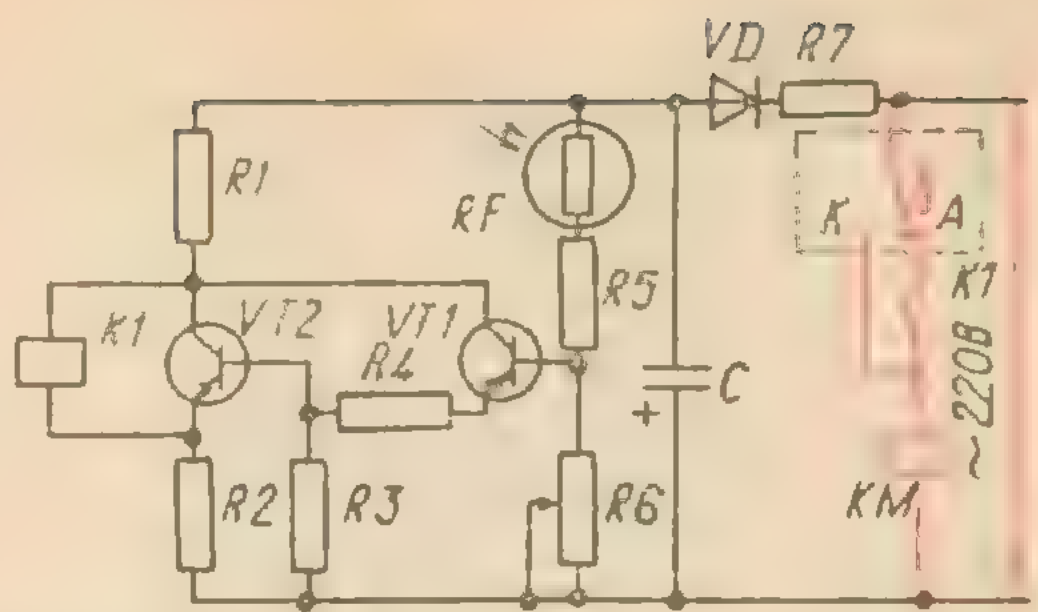


Рис. 19.16. Схема фотореле с усилителем на триодах.

снижается, и он закрывается. Обесточивается цепь, состоящая из $R3$ и $R4$. База $VT2$ оказывается под положительным потенциалом, он закрывается, и обмотка $K1$ получает питание, замыкается контакт $K1$, и магнитный пускатель $KМ$ включает освещение. Резистор $R6$ служит для тонкой регулировки порога срабатывания реле в зависимости от освещенности.

Температурная защита. Для электродвигателей, используемых в сельскохозяйственных электроустановках, разработано устройство встраиваемой температурной защиты, в котором применены терморезисторы типа ММТ с отрицательным температурным коэффициентом.

На рисунке 19.17 приведена схема такого устройства. Ее составляют следующие элементы: 1) блок питания, который включает в себя понижающий трансформатор $T1$, диодный мост $V1...V4$, стабилитрон $V5$ с нагрузкой $R1$; 2) термочувствительный элемент, состоящий из двух параллельно включенных терморезисторов ММТ-1 (R_T), встроенных в статорные обмотки электродвигателя и включенных последовательно с туннельным диодом $V6$; 3) транзисторные усиленные каскады, транзисторы $V10$, $V11$, $V12$; 4) реле защиты $K1$.

В схеме использован релейный эффект туннельного диода при его последовательном включении с переменным сопротивлением (в данном случае с терморезисторами). При релейном эффекте на туннельном диоде скачкообразно увеличивается напряжение. Этот скачок напряжения через диод $V7$ подается на базу транзистора $V10$, который при нормальной работе закрыт, а транзисторы $V11$ и $V12$ открыты и реле $K1$ включено. Скачок напряжения открывает транзистор $V10$, вследствие этого закрываются $V11$ и $V12$, реле $K1$ обесточивается и отключает магнитный пускатель.

Применяемый туннельный диод типа АИ-101Б совместно с двумя терморезисторами, включенными параллельно, сопротивление которых при 20°C равно 13 кОм , дает релейный эффект при температурах $90...120^{\circ}\text{C}$ (в зависимости от сопротивления регулировочного резистора $R2$).

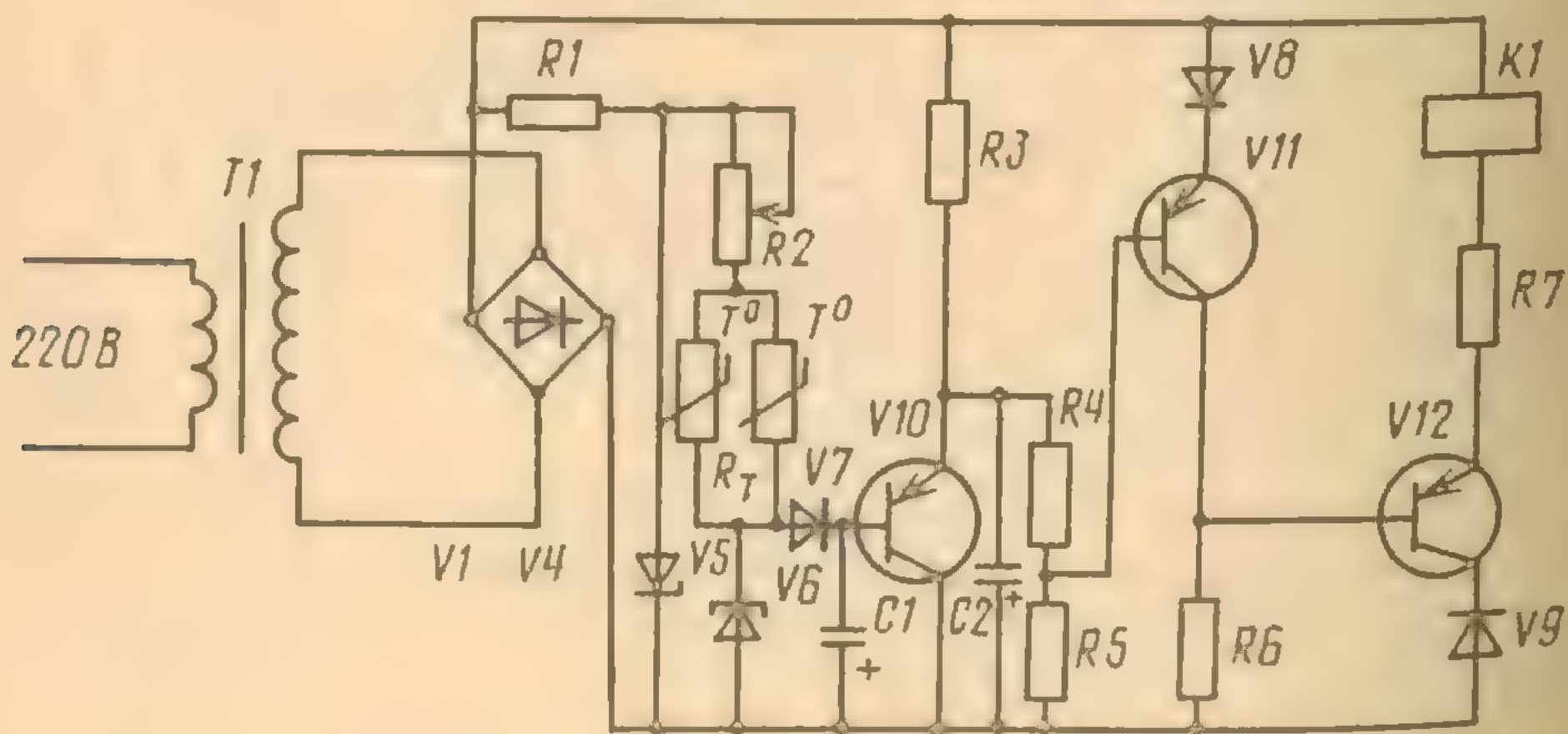


Рис. 19.17. Схема встроенной температурной защиты электродвигателей с терморезисторами типа ММТ-1.

С элементами полупроводниковой техники выполнены и устройства фазочувствительной защиты, которые описаны в главе 27.

Контрольные вопросы и задания к главе 19. 1. Объясните принцип действия вакуумного диода. 2. Нарисуйте схему двухполупериодного выпрямителя и опишите процесс выпрямления тока. 3. Расскажите о принципе действия полупроводниковых диодов. 4. Объясните работу выпрямителей на диодах, выполненных по мостовой схеме для однофазного и трехфазного выпрямления. 5. Расскажите об устройстве тиристоров и управляемых выпрямителей. 6. Как устроен вакуумный триод? 7. Как работает транзистор — полупроводниковый триод? 8. Какая принципиальная разница между усилителями напряжения, тока и мощности? 9. Объясните работу схемы фотореле (по плакату). 10. Что вы знаете об индикаторных приборах для микроэлектронных схем?

Глава 20. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ЭЛЕКТРОПРИВОДУ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УСТАНОВКАХ

20.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ. МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИВОДОВ

Совокупность двигателя, передаточного механизма и рабочей машины называют *производственным агрегатом* или *машинным устройством*.

Электропривод — это электромеханическое устройство, при помощи которого приводятся в движение рабочие органы производственного агрегата. Понятие «электропривод», таким образом, объединяет электродвигатель, аппаратуру управления двигателем и передаточный механизм к рабочей машине.

Электропривод по числу машин, приходящихся на электродвигатель, принято подразделять на групповой, одиночный и многодвигательный.

Групповым электроприводом называют привод, при котором от одного электродвигателя приводится в действие несколько машин при помощи одной или нескольких трансмиссий.

Одиночный привод может быть простым одиночным или индивидуальным. В простом одиночном электроприводе двигатель связан с машиной через какую-либо передачу. Примером такого привода может служить электропривод вакуум-насоса доильного агрегата. В индивидуальном электроприводе электродвигатель органически входит в конструкцию рабочей машины, так что отдельные части электродвигателя одновременно являются частями рабочей машины. Иллюстрацией этому могут служить электрическая дрель, электрический вентилятор.

Многодвигательный электропривод применяют в сложных машинах, где отдельные рабочие органы приводятся в действие отдельными двигателями. Широко распространен многодвигательный привод в сложных металлообрабатывающих станках, прокатных станах, в машинах для приготовления комбикормов, инкубаторах и т. д.

По способу управления электроприводы могут быть разделены на следующие группы:

- 1) *неавтоматизированный*, то есть управляемый вручную;
- 2) *полуавтоматизированный*, когда одна часть операций выполняется автоматически, а другая — вручную (например, включают двигатель вручную, а выключается он автоматически);
- 3) *полностью автоматизированный*, то есть управляемый на всех режимах без непосредственного участия человека (например, двигатели, реагирующие на изменение температуры в инкубаторах и хранилищах, уровня воды в водонапорных башнях и т. п.).

При выборе электродвигателей для привода необходимо знать и уметь анализировать механические характеристики производственных механизмов (рабочих машин) и механические характеристики электродвигателей.

Механической характеристикой производственного механизма называют зависимость между частотой вращения n и моментом сопротивления M_c на его валу:

$$n = f(M_c). \quad (20.1)$$

Механической характеристикой электрического двигателя называют зависимость его частоты вращения n от момента вращения $M_{\text{в}}$:

$$n = j(M_{\text{в}}). \quad (20.2)$$

При выборе двигателя для привода машины стремятся к тому, чтобы механические характеристики электродвигателя и рабочей машины соответствовали друг другу. Кроме того, двигатель должен удовлетворять ряду других требований производственного механизма: иметь достаточные пусковые и перегрузочные усилия и т. д.

Механические характеристики производственных механизмов (рис. 20.1, а) разделяют на ряд категорий.

1. *Не зависящая от частоты вращения* механическая характеристика (прямая 1) означает, что момент сопротивления M_c остается постоянным при изменениях частоты вращения. Такие характеристики имеют подъемные краны, лебедки, транспортеры с постоянной массой передвигаемого материала и т. п.

2. *Прямолинейно возрастающая* механическая характеристика (прямая 2) свидетельствует о линейной зависимости между моментом M_c и частотой вращения n . Подобная характеристика присуща, например, генератору с независимым возбуждением, который работает на постоянное сопротивление во внешней цепи.

3. *Параболическая* механическая характеристика (кривая 3) означает, что между моментом M и частотой вращения n существует квадратичная зависимость. Такая характеристика свойственна центробежным насосам, вентиляторам и др.

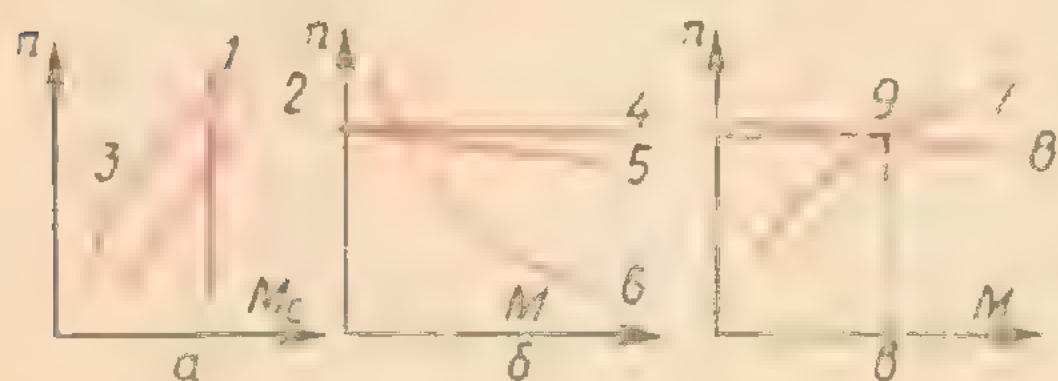


Рис. 20.1. Основные механические характеристики производственных механизмов (а), электрических двигателей (б) и определение рабочей точки системы двигатель-механизм (в): 1 — характеристика, не зависящая от частоты вращения; 2 — прямолинейно возрастающая; 3 — параболическая; 4 — абсолютно жесткая; 5 — жесткая; 6 — мягкая; 7 — машины; 8 — двигатели; 9 — рабочая точка.

Механические характеристики электрических двигателей (рис. 20.1, б) разделяют на следующие категории.

1. *Абсолютно жесткая* механическая характеристика, при которой частота вращения двигателя совершенно не зависит от изменения момента на его валу (прямая 4), отличает синхронные электродвигатели.

2. *Жесткая* механическая характеристика, при которой частота вращения электродвигателя незначительно зависит от изменения момента на его валу (прямая 5), присуща электродвигателям постоянного тока с параллельным возбуждением и асинхронным электродвигателям (в пределах рабочей части их механической характеристики).

3. *Мягкая* механическая характеристика, при которой частота вращения электродвигателя существенно зависит от момента на его валу (кривая 6), свойственна, например, электродвигателям постоянного тока с последовательным возбуждением.

В установившемся режиме работы агрегата двигатель — рабочая машина момент сопротивления машины равен вращающему моменту электродвигателя при вполне определенной частоте вращения (рис. 20.1, в). Если момент сопротивления на валу рабочей машины изменится, то автоматически изменятся вращающий момент и частота вращения электродвигателя, агрегат будет продолжать работать на новой частоте вращения, с новым значением момента.

При проектировании электропривода механическая характеристика производственного механизма обычно известна. Для получения устойчивой работы агрегата в нормальном режиме при определенных частотах вращения и моментах сопротивления производственного механизма необходимо подобрать двигатель с соответствующей механической характеристикой.

Различают также естественные и искусственные механические характеристики электродвигателей.

Естественная механическая характеристика представляет собой зависимость частоты вращения от момента в номинальном режиме.

При наличии дополнительного сопротивления в цепи якоря или ротора электродвигателя, сниженном напряжении на обмотках зависимость частоты вращения от момента называют *искусственной* механической характеристикой.

20.2. ТЕПЛОВОЙ РЕЖИМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ВЫБОР ЕГО МОЩНОСТИ

Нагрев электродвигателей и их тепловой режим — важнейшие факторы, определяющие предельную нагрузку на электродвигатель. Нагрев двигателя обуславливается потерями в обмотках, в железе статора и ротора, механическими потерями на трение.

При включении двигателя в работу его температура повышается до тех пор, пока не наступит тепловое равновесие, при котором вся выделяющаяся в двигателе теплота передается окружающей среде, и температура двигателя достигает установившегося значения.

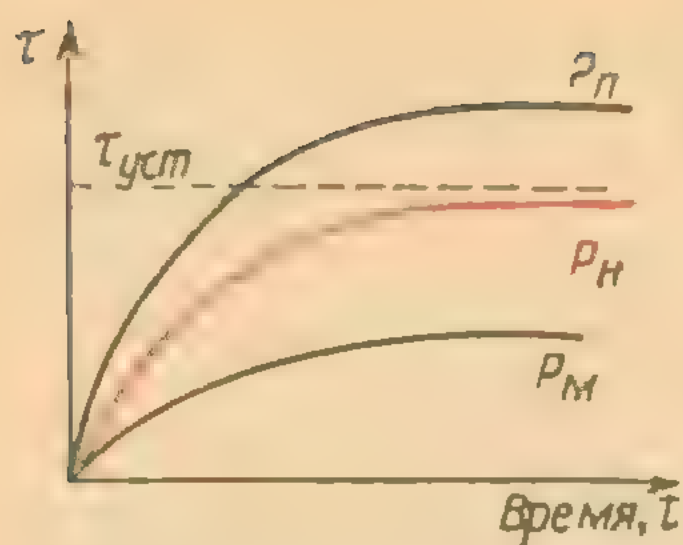


Рис. 20.2. Характер нагрева электродвигателя в зависимости от нагрузки:
 P_M — двигатель недогружен; P_N — номинальная нагрузка; P_P — двигатель перегружен.

На рисунке 20.2 характер нагрева двигателя (зависимость температуры двигателя от продолжительности работы) представлен графически.

Допустимый нагрев электрических машин определяется в основном теплостойкостью изоляции.

В таблице 20.1 приведена классификация изоляционных материалов по теплостойкости и дана краткая их характеристика.

В зависимости от нагрузки электродвигателя его установившаяся температура может меняться в широких пределах. При номинальной нагрузке температура обмоток двигателя будет достигать максимально допустимого значения, установленного для данного класса изоля-

20.1. Допускаемые температуры в наиболее нагретых точках проводников, аппаратов и электрических машин при длительной работе

Класс нагревостойкости	Температура, характеризующая дан- ный класс нагрево- стойкости, °С	Краткая характеристика основных групп электроизоляционных материалов, соответствующих данному классу нагревостойкости
У	90	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка и натурального шелка, не погруженные в жидкий электроизоляционный материал и не пропитанные им
А	105	Волокнистые материалы из целлюлозы, хлопка или натурального, искусственного и синтетического шелка, в рабочем состоянии пропитанные или погруженные в жидкий электроизоляционный материал
Е	120	Синтетические органические материалы (пленки, волокна, смолы, компаунды и др.)
В	130	Материалы на основе слюды (в том числе на органических подложках), асбеста и стекловолокна, применяемые с органическими связующими и пропитывающими составами*
F	155	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с синтетическими связующими и пропитывающими составами, соответствующими данному классу нагревостойкости
Н	180	Материалы на основе слюды, асбеста и стекловолокна, применяемые в сочетании с кремнийорганическими связующими и пропитывающими составами, кремнийорганические эластомеры
С	Свыше 180	Слюда, керамические материалы, стекло, кварц или их комбинации, применяемые без связующих или с неорганическими и элементоорганическими составами

* Слюдяные пропитанные ленты (ЛСЭП, ЛСК, ЛС, ЛСЭК), гибкий электроизоляционный материал — композиция из слюдяниновой бумаги, сложенной с двух сторон подложками и пропитанной электроизоляционными лаками или компаундами, применяются в электрических машинах и аппаратах в качестве электроизоляционного материала.

ции (кривая P_n). В случае перегрузки температура двигателя значительно превзойдет допустимую (кривая P_n). При недогрузках температура двигателя будет меньше допустимой (кривая P_m). Длительная перегрузка недопустима по той причине, что изоляция может обуглиться и двигатель выйдет из строя.

Практически не представляется возможным замерить действительную температуру нагрева, поэтому введено понятие наибольшей наблюдаемой температуры, которая принимается на 10° ниже соответствующих максимально допустимых температур класса изоляции.

Режимы нагрузки. На практике двигатель для рабочей машины можно подбирать по справочным данным или по рекомендациям завода — изготовителя машины. Эти рекомендации разработаны на основании проведенных технических расчетов и опытов и приведены в технической документации.

При выборе мощности электродвигателя для машины прежде всего учитывают характер нагрузки, которую будет нести электродвигатель. В зависимости от продолжительности и характера нагрузки принята следующая классификация режимов работы электродвигателя.

Продолжительным номинальным режимом (режим S1) работы (рис. 20.3, а и б) называют такой режим, при котором неизменная нагрузка продолжается столько времени, что превышение температуры всех частей электродвигателя достигает практически установившегося значения. В подобном режиме работают двигатели привода насосов, вентиляторов, транспортеров.

Кратковременный номинальный режим (S2) работы (рис. 20.3, в) — это такой режим, при котором периоды работы чередуются с периодами отключения (пауза), причем за рабочий период температура электродвигателя не успевает достигнуть установившегося значения, а за период паузы она снижается до окружающей температуры. Аналогичен характер работы, например, двигателей для привода задвижек или щитов на оросительных каналах или трубах.

Промышленность выпускает электродвигатели, рассчитанные на кратковременный режим с продолжительностью рабочих периодов 10, 30, 60, 90 мин.

Повторно-кратковременным номинальным режимом (S3) работы (рис. 20.3, г) называют такой режим, в котором двигатель ни в одном



Рис. 20.3. Характер нагрузки и нагрева двигателя при длительном (а) и (б), кратковременном (в) и повторно-кратковременном (г) режимах работы.

из рабочих периодов не нагревается до установившегося значения температуры, а во время пауз не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Подобный режим работы характерен для некоторых станков, прессов, молотов и др. Электродвигатели этого режима рассчитаны на продолжительность включения (ПВ) 15, 25, 40, 60%, а продолжительность цикла принимают равной 10 мин.

Переключающийся номинальный режим (S6) работы — это такой режим, при котором кратковременные периоды неизменной номинальной нагрузки (рабочие периоды) чередуются с периодами холостого хода (паузами).

S4, S5 — это режимы с установленным числом включений в час, S7 — режим с установленным числом реверсов в час, S8 — режим с заданным числом циклов в час.

При выборе двигателя должен быть обязательно учтен режим, в котором ему предстоит работать. Так, специфику работы в повторно-кратковременном режиме (рис. 20.3, г) отражает коэффициент, называемый относительной продолжительностью включения:

$$\text{ПВ} = \frac{t_n}{t_p + t_n} 100\% . \quad (20.3)$$

где t_p — продолжительность работы; t_n — продолжительность паузы.

Поскольку двигатели, предназначенные для этого режима, рассчитаны на продолжительность цикла $t_{\text{ц}} = t_p + t_n \leq 10$ мин, их нельзя включать на длительное время при той мощности, которая указана в паспорте.

Если двигатель работает не с той продолжительностью включения, на которую рассчитан, его мощность отличается от номинальной. Так, номинальная мощность двигателя АОС2-52-2 для ПВ = 25% составляет 13 кВт. При работе с ПВ = 15% он может быть загружен до 15 кВт; при ПВ = 40% — до 11,1 кВт, при ПВ = 60% — до 10,1 кВт, а если ПВ = 100%, то всего до 9,1 кВт.

Выбор мощности двигателя по нагрузочным характеристикам. Для машин, которые необходимо перевести на электропривод, двигатель можно подобрать по нагрузочным диаграммам. Диаграммы снимают каким-либо регистрирующим прибором (ваггметром, амперметром). Чтобы получить диаграмму для машины, вначале рекомендуется взять электродвигатель заведомо большей мощности и записать значения мощностей при холостом ходе и при полной нагрузке машины. Разница между этими значениями дает приближенное значение мощности, потребляемой машиной. Целесообразная мощность двигателя для данной машины составляет 1,1...1,25 полученной в опыте.

Если характер нагрузки такой, как показано на рисунке 20.3, б, то потребную мощность двигателя можно подсчитать по формуле:

$$P_{\text{дв}} = (1,1...1,25) P_{\text{экв}} = (1,1...1,25) \sqrt{\frac{P_{11} t_1 + P_{22} t_2 + P_{33} t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}} . \quad (20.4)$$

Мощность (кВт) двигателя для привода насоса подсчитывают по формуле:

$$P_{\text{дв}} = \frac{QH\gamma}{102\eta_{\text{нас}}\eta_{\text{пер}}}; \quad (20.5)$$

где Q — подача насоса, м³/с; H — общая расчетная высота подачи насоса, м; γ — плотность жидкости (для воды $\gamma = 1000$ кг/м³); $\eta_{\text{нас}}$, $\eta_{\text{пер}}$ — соответственно КПД насоса и КПД передачи.

20.3. МЕХАНИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА ОТ ДВИГАТЕЛЯ К РАБОЧЕЙ МАШИНЕ

В сельскохозяйственных установках используются следующие виды передач: ременная, зубчатая, фрикционная, червячная, цепная, гибкий вал, жесткая муфта и т. д. Все передачи характеризуются передаточным числом i , показывающим, во сколько раз изменяется частота вращения.

Ременная передача передает вращение при помощи бесконечного ремня (плоского, клиновидного, круглого). Ее преимущества — простота, возможность передавать движение на значительные расстояния, воспринимать колебания нарузки. Недостатки — низкий КПД, небольшой срок службы.

При ременной передаче

$$\frac{D_{\text{дв}}}{D_{\text{м}}} = \frac{n_{\text{м}}}{n_{\text{дв}}k}, \quad (20.6)$$

где $D_{\text{дв}}$ — диаметр шкива двигателя; $D_{\text{м}}$ — диаметр шкива машины; $n_{\text{м}}$ — частота вращения шкива машины; $n_{\text{дв}}$ — частота вращения шкива электродвигателя; k — коэффициент проскальзывания ремня (обычно принимают равным 0.98).

Передаточное число ременной передачи может зависеть от взаимного расположения ведущего и ведомого шкивов. На рисунке 20.4, а изображены открытые передачи, ремень которых находится в одной плоскости, а шкивы вращаются в одном направлении. Для каждой передачи указано максимальное целесообразное отношение диаметров шкивов двигателя и машины. На рисунке 20.4, б показана передача, при которой ведущая и ведомая ветви ремня перекрещиваются и ведомый шкив вращается в направлении, обратном ведущему. Рекомендуемое отношение диаметров шкивов в данном случае от 1 : 6 до 6 : 1. На рисунке 20.4, в изображена полуперекрестная передача, при которой оси валов расположены под углом, а шкивы вращаются в одном направлении. В этом случае отношение диаметров шкивов должно быть равно от 1 : 3 до 3 : 1.

При использовании натяжных роликов (рис. 20.4, г), которые увеличивают угол обхвата, отношение диаметров шкивов можно довести до 1 : 10 (или 10 : 1).

Расстояние между шкивами может достигать 8 м в зависимости от ширины ремня и диаметров шкивов.

Плоские ременные передачи находят применение для транспортирования мощностей от 1 до 40 кВт при скорости ремня от 5 до 25 м/с.

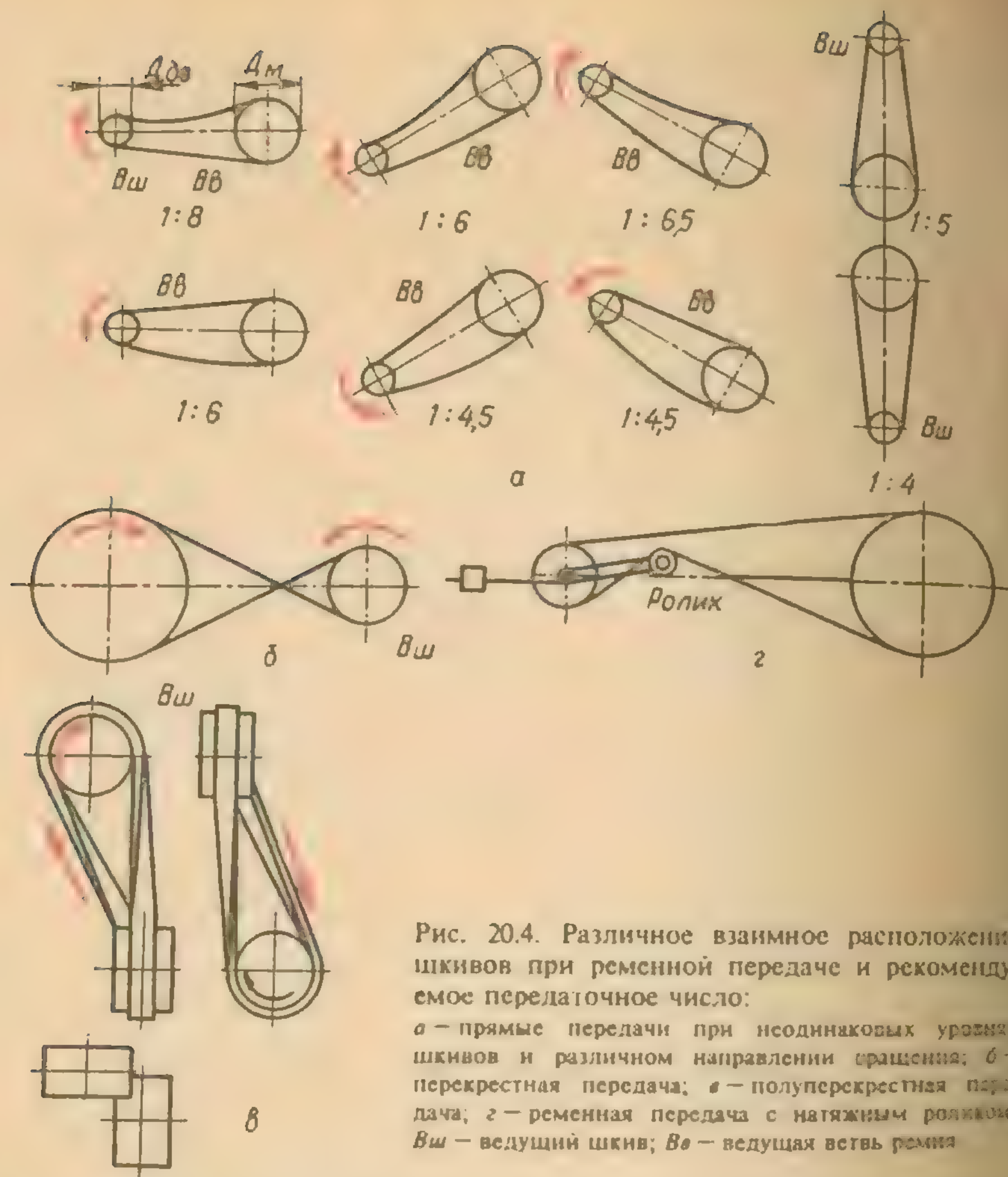


Рис. 20.4. Различное взаимное расположение шкивов при ременной передаче и рекомендуемое передаточное число:

а — прямые передачи при неодинаковых уровнях шкивов и различном направлении вращения; *б* — перекрестная передача; *в* — полуперекрестная передача; *г* — ременная передача с натяжным роликом. *Вш* — ведущий шкив; *Вв* — ведущая ветвь ремня

Большое значение имеет правильное соединение концов ремня. Кожаные и прорезиненные ремни лучше всего склеивать (первые — косой склейкой, а вторые — ступенчатой, как показано на рисунке 20.5, *а* и *б*).

На рисунке 20.5 показаны металлические соединения концов ремня: шарнирное на проволочных крючках (*в*) и «гребешком» (*г*) — при помощи закругленных угольников и болтиков. Сшивают ремни сыромятными ремнями и жильными нитями.

Следует следить за тем, чтобы ремень был правильно натянут, так как от этого зависит нагрузка двигателя и передаваемая мощность.

Клиноременная передача обладает относительно высоким КПД и применяется для передачи мощностей до нескольких сотен киловатт. Клиновые ремни выполняют только стандартной длины и площади сечения, из прорезиненной ткани. Недостатки клиноременной передачи — меньший срок службы ремней и сравнительно большая стоимость шкивов.

В **зубчатых передачах**, которые составляют из пар цилиндрических или конических шестерен, передаточное число редко бывает более 11,5.

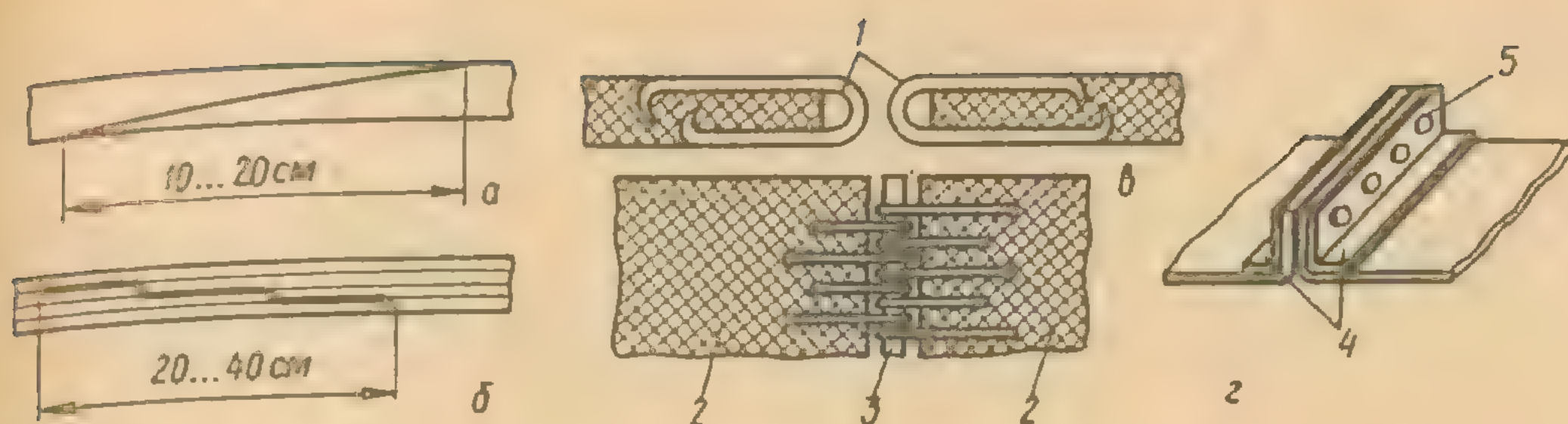


Рис. 20.5. Склейка кожаного (а) и прорезиненного (б) ремней и механическое соединение ремней проволочными крючками (в) и гребешком (г):
1 — крючки; 2 — концы ремня; 3 — стальная ось; 4 — закругленные угольники; 5 — болтики с гайками.

Фрикционная передача предназначена для передачи вращательного движения с постоянным или переменным отношением угловых скоростей при помощи сил трения. По виду соприкасающихся звеньев различают цилиндрические, конические, сферические передачи. Применяют их в специальных устройствах, где требуется плавная регулировка частоты вращения.

Червячная передача позволяет передавать вращение под углом 90° . Передаточное число может доходить до 80, а в малонагруженных — до 300 и несколько более. Основной недостаток — низкий КПД.

Цепная передача состоит из закрепленных на валах звездочек, через которые перекинута бесконечная цепь. Эта передача обеспечивает точное постоянство передаточного числа при значительном расстоянии между валами (до 8 м).

В ряде случаев целесообразно применять двигатели с пристроенными редукторами (двигатель-редуктор). Для сельскохозяйственных потребителей разработаны двигатели-редукторы мощностью от 0,6 до 4,5 кВт с частотой вращения на выходном валу от 45 до 550 мин⁻¹.

20.4. ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К УСТАНОВКЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Электродвигатели устанавливают с учетом того, чтобы доступ к ним для осмотра и ремонта был удобен. Шкивы, муфты и передачи ограждают. Корпуса электродвигателей в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных заземляют. Вибрация оборудования, фундаментов и частей зданий не должна превышать допустимых значений.

Проходы между фундаментами или корпусами электродвигателей, между электродвигателями и частями здания или оборудования принимаются равными не менее 1 м в свету. Допустимы местные сужения проходов между выступающими частями электродвигателей и оборудования или строительными конструкциями до 0,6 м.

Машины малой мощности (до 10 кВт) напряжением до 1000 В разрешается устанавливать при сужении проходов в свету до 0,6 м, но расстояние от корпуса машины до токоведущих частей щита при этом должно быть не менее 1 м.

Расстояние в свету между машиной и стеной здания или между параллельно установленными машинами при наличии прохода с другой стороны не менее 0,3 м.

Электродвигатели и аппараты, за исключением закрытых, а сопротивления и реостаты всех исполнений размещают на расстоянии не менее 1,5 м от сгораемых конструкций зданий.

Кабельную муфту или трубу с проложенными в ней проводами нужно подводить непосредственно к коробке контактных зажимов электродвигателя; в противном случае провода, кабели на незащищенном участке дополнительно изолируют и защищают от механических повреждений (гибкие металлические рукава, резиновые трубы и т. п.).

Провода или кабели типов АНРГ и АВРГ, прокладываемые на высоте, доступной для прикосновения, рекомендуется помещать в металлические трубы. Размеры труб выбирают в зависимости от числа и площади поперечного сечения проводов, а также от сложности прокладки.

В стальных гонкостенных водогазопроводных (газовых) трубах с условным проходом 15 мм или в стальных электросварных трубах с наружным диаметром 20 мм рекомендуется прокладывать до пяти одножильных проводов марок АПВ, АПРТО и АПР, до четырех проводов с площадью сечения 4 мм² и до трех проводов с площадью сечения 6 мм² при длине труб 20 м и более. В этой же трубе можно проложить два кабеля марок АНРГ и АВРГ с площадью сечения жилы 4 мм² и три кабеля с площадью сечения жилы 2,5 мм².

В газовых трубах с условным проходом 20 мм или в стальных электросварных с наружным диаметром 26 мм число прокладываемых одножильных проводов тех же марок в 2 раза больше; в них же можно прокладывать три провода с площадью сечения 10 мм² или четыре кабеля с площадью сечения жилы до 6 мм². В таблице 20.2

20.2. Выбор проводов и труб для их прокладки к электродвигателям

Габарит электро-двигателя	Мощность электро-двигателя, кВт	Площадь сечения провода марки АПВ, мм ²	Условный проход стальных труб, мм		Примечание
			выбран-ных по расчету	выбран-ных по штуцеру	
1...3	От 0,4 до 4,0	4 × 2,5	15	20	Штуцер с внутренней и внешней резьбой
4	2,2; 4,0	4 × 2,5	15	25	
5	4,0; 5,5; 7,5; 10	3 × 4 + 1 × 2,5	15	20	
5	13	3 × 6 + 1 × 4	20	25	
6	7,5; 10	3 × 4 + 1 × 2,5	15	32	
6	13	3 × 6 + 1 × 4	20	32	
6	17	3 × 10 + 1 × 6	25	32	Штуцер с внешней резьбой
7	15	3 × 6 + 1 × 4	20	32	
7	17	3 × 10 + 1 × 6	25	32	
7	22; 30	3 × 16 + 1 × 10	25	32	
8	22; 30	3 × 16 + 1 × 10	25	50	
8	40	3 × 25 + 1 × 16	32	50	

даны некоторые рекомендации по выбору проводов и труб для них в зависимости от мощности электродвигателя.

20.5. СПОСОБЫ УСТАНОВКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

В зависимости от мощности электродвигателя и от назначения электросилового устройства двигатель может быть установлен на фундаменте, на раме, на корпусе машины, на кронштейне (рис. 20.6, а) или на консолях (рис. 20.6, б) в стене или потолке.

Двигатель мощностью от 10 кВт и выше устанавливают на фундаментах. Ориентировочно принимают, что при равномерной нагрузке (насосы, вентиляторы, многие машины с вращательным движением) масса фундамента должна быть равна 10-кратной массе двигателя. В случае более тяжелых режимов (частые реверсирования, колебания нагрузки и т. п.) массу фундамента выбирают не менее чем в 20 раз превышающей массу двигателя.

Площадь опорной поверхности определяется массой фундамента и электродвигателя или всего агрегата и допустимым давлением на грунт: на глину и суглинок — 25 Н/см², на мелкий песок — 20, на крупный песок — 35, а на гравий и гальку — 50 Н/см².

Кирпичные фундамента выполняют на растворе из цемента и песка (1:3), который затвердевает в течение 5...7 дней, а бетонные — на составе из цемента, речного песка и мытого гравия (1:3:5) при выдержке 10 дней. Отверстия под фундаментные болты делают при помощи деревянных конических пробок, которые вынимают через 15...20 ч после окончания кладки бетона.

На готовом фундаменте размещают салазки с болтами, выверяют установку ватерпасом, заливают болты раствором, состоящим из одной части цемента и одной части песка, и выдерживают в течение 6...7 дней. После этого устанавливают и выверяют электродвигатель.

При устройстве фундамента для агрегата (насосного, компрессорного и т. п.), имеющего общее основание — раму или плиту, делают шаблон из досок или толстой фанеры с отверстиями под фундаментные болты. Для этой цели шаблон подкладывают под раму или плиту и размечают отверстия для болтов.

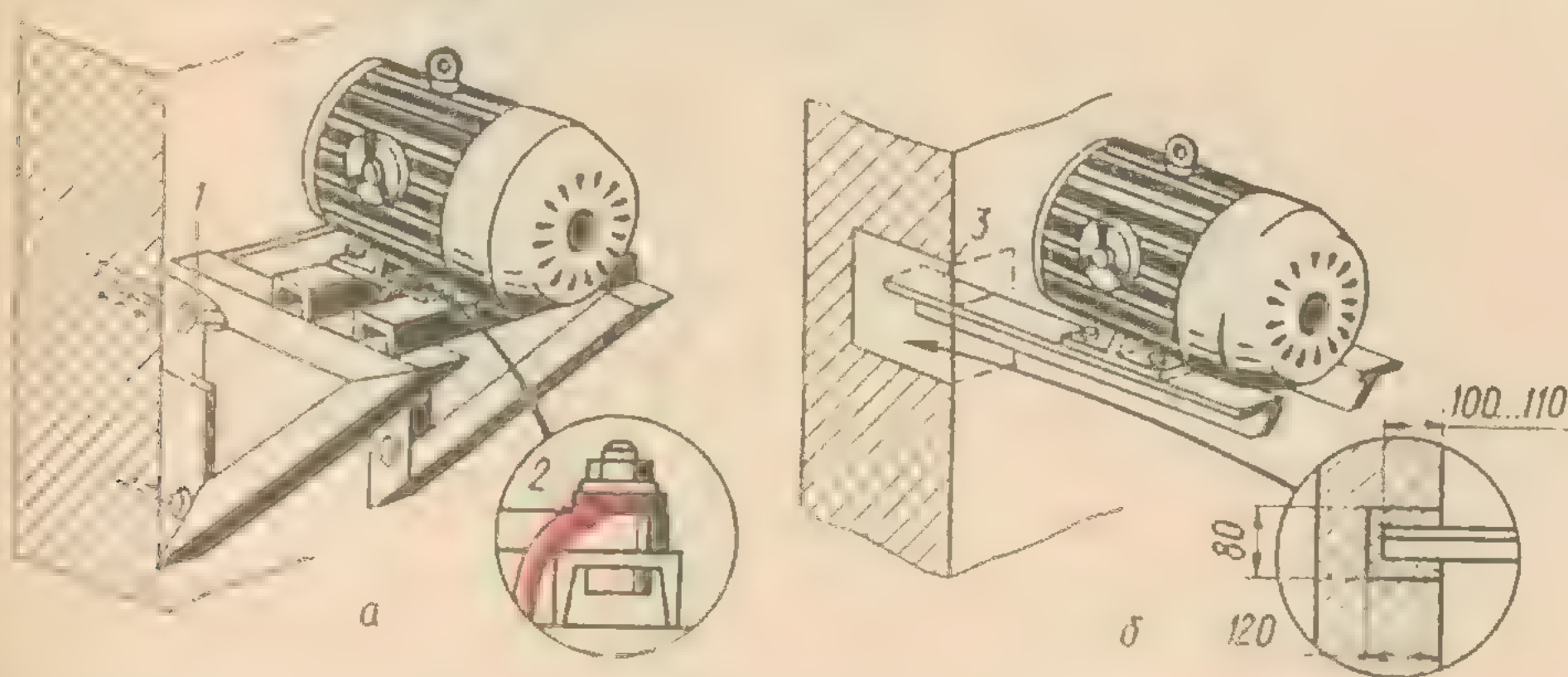


Рис. 20.6. Установка электродвигателя на кронштейне (а) и на консолях (б):
1 — люлька с распорной гайкой; 2 — заземляющий проводник; 3 — цементный раствор.

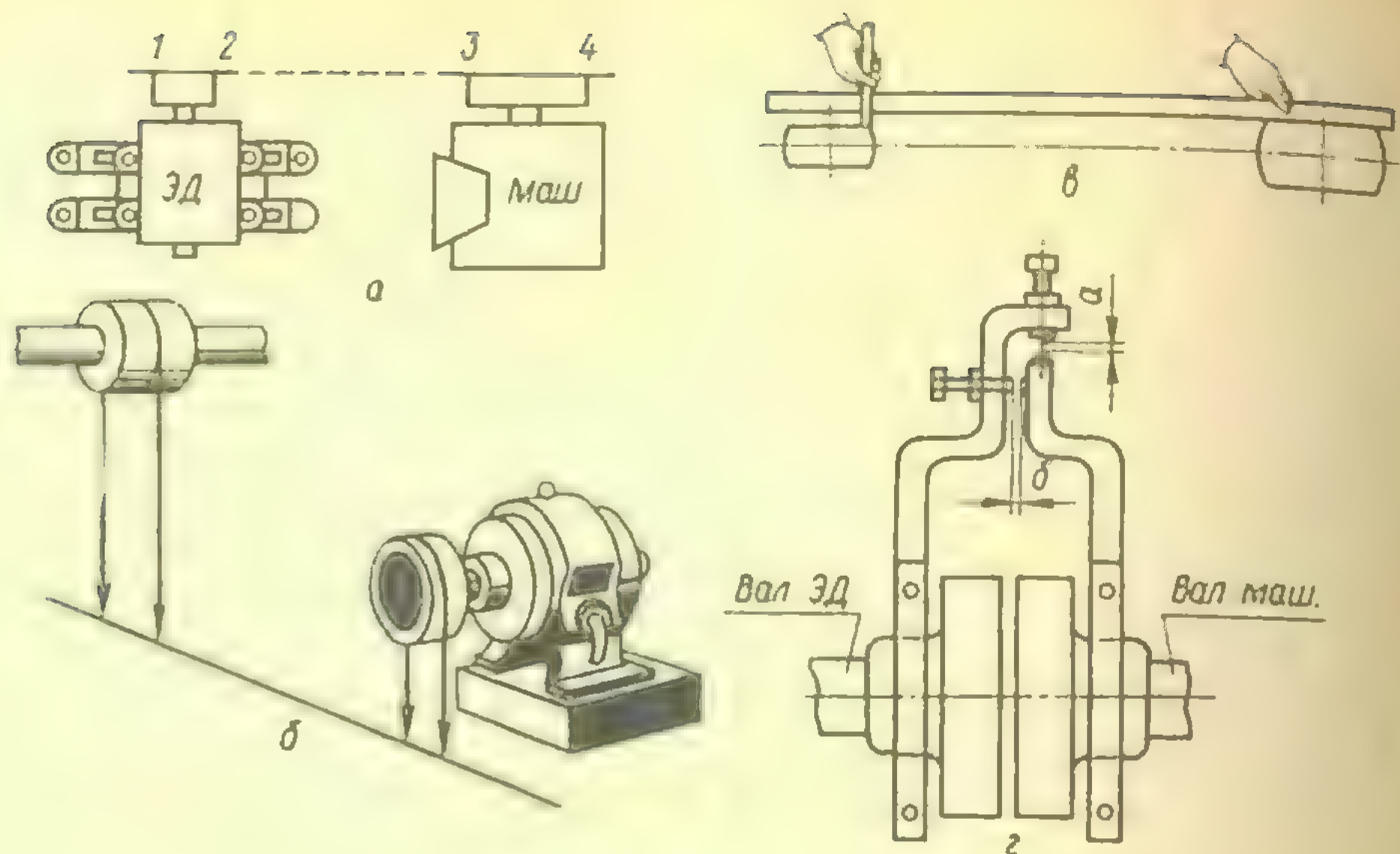


Рис. 20.7. Выверка правильности взаимного расположения шкивов электродвигателя и рабочей машины:

а — при одинаковой ширине ведущего и ведомого шкивов; б — при разном уровне расположения шкивов; в — при разной ширине шкивов; г — выверка валов двигателя и машины, соединяемых муфтой, при помощи центровочных скоб.

Салазки выравнивают по ватерпасу в продольном и поперечном направлениях, подкладывая железные клинья и пластины. Затем затягивают болты, поверхность фундамента заливают слоем (до 1 см) цементного раствора, заделывают все неровности и просветы между фундаментом и салазками.

После укрепления салазок приступают к выверке валов двигателя и рабочей машины. Валы должны быть параллельны друг другу, а середины шкивов находиться в одной плоскости. Для этого (рис. 20.7,а) концы шнура прикрепляют к краю шкива рабочей машины так, чтобы шнур касался края обода, и прикладывают к краю шкива двигателя. Если валы параллельны, то шнур при натягивании и постепенном подведении его к шкиву двигателя должен касаться одновременно четырех точек (1...4).

При различной ширине шкивов находят их середины и мелом проводят среднюю линию на обоих шкивах. По этим линиям и выверяют параллельность расположения вала при помощи шнура или так, как это показано на рисунке 20.7,б. Когда расстояние между электродвигателем и рабочей машиной небольшое, для этой цели используют линейку (рис. 20.7,в). Закрепляют двигатель, предварительно надев ремень на его шкив.

При выверке валов электродвигателя и машины, соединяемых муфтами напрямую, применяют вспомогательные скобы (рис. 20.7,г), которые закрепляют на валах двигателя и машины. Проворачивая валы двигателя и машины в одном направлении и пользуясь прокладками из жести и полосового железа, добиваются, чтобы расстояния а и б между скобами оставались одинаковыми в любом положении валов.

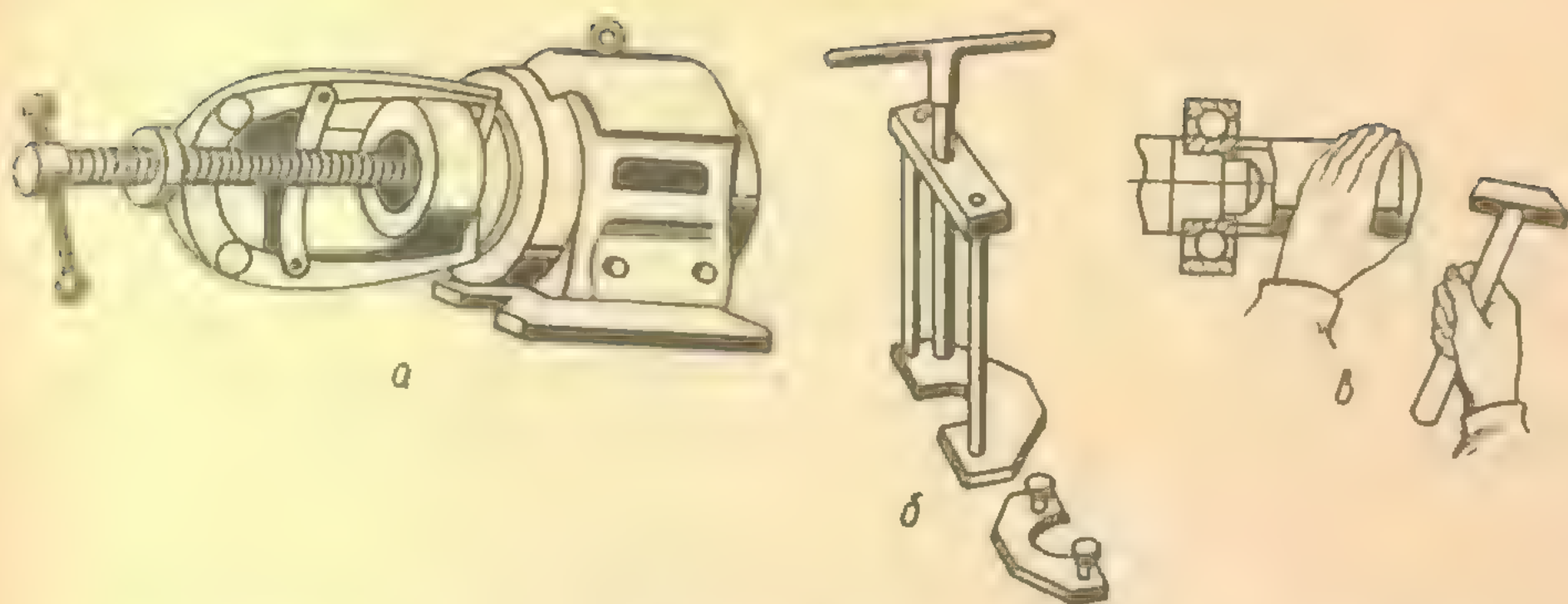


Рис. 20.8. Приспособления для снятия шкива и подшипника с вала электродвигателя и установки подшипника:

а — снятие шкива с вала двигателя при помощи универсального съемника; б — съемник для подшипников; в — посадка подшипников на вал.

Шкив и подшипники снимают при помощи специальных приспособлений (рис 20.8, а и б). На рисунке 20.8, в показано, как правильно надевать подшипники на вал.

20.6. УСТАНОВКА ПУСКОЗАЩИТНОЙ АППАРАТУРЫ

В соответствии с «Правилами устройства электроустановок» аппараты управления и защиты рекомендуется располагать по возможности ближе к электродвигателю, в местах, удобных для обслуживания.

В установках с постоянным обслуживающим персоналом и расположением аппаратов управления в месте, не обзриваемом оттуда, где размещен механизм, необходимо кнопки пуска и остановки электродвигателя располагать непосредственно у механизма, предусмотреть

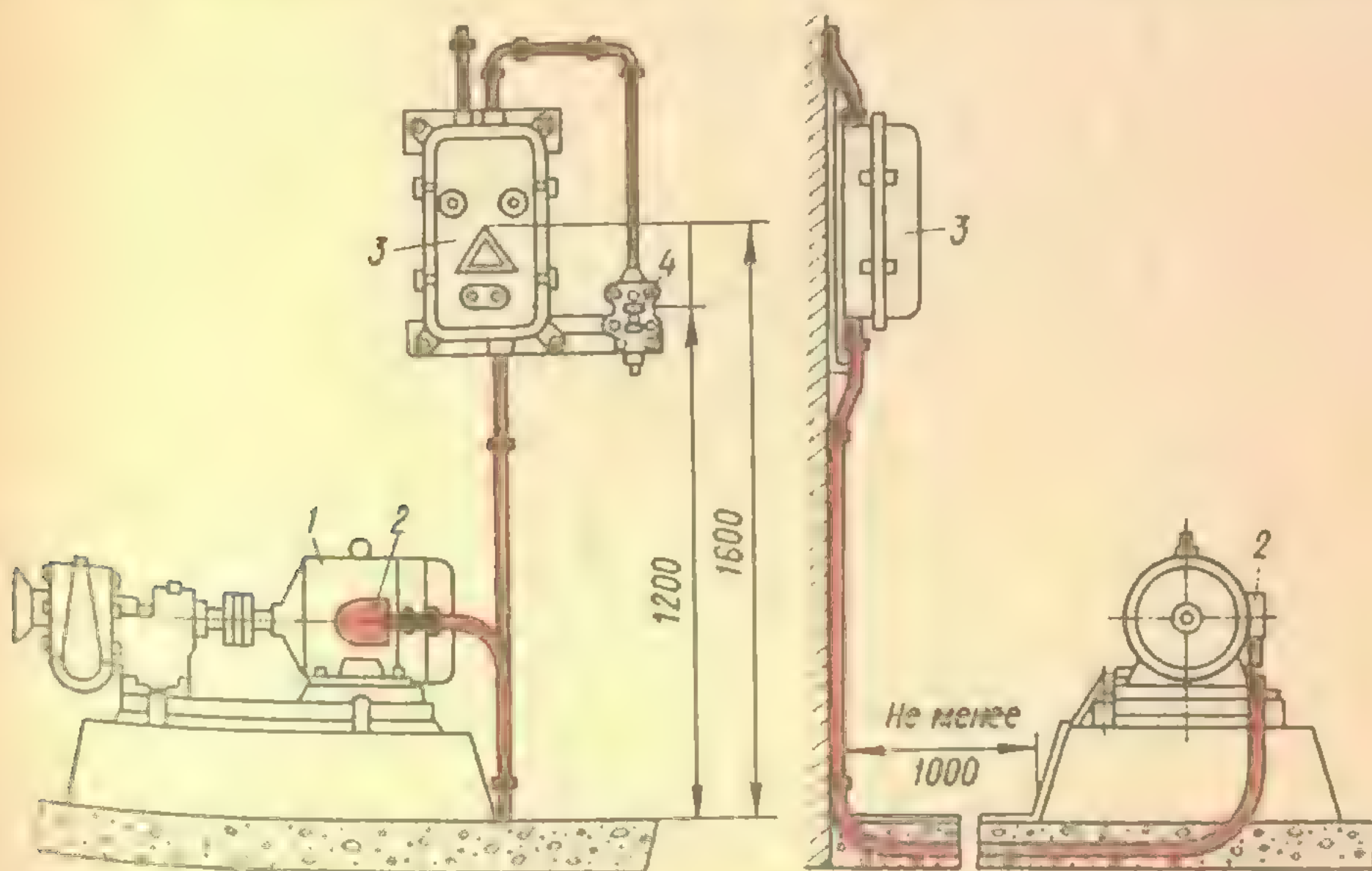


Рис. 20.9. Выполнение подвода от пускателя к электродвигателю: 1 — электродвигатель; 2 — коробка выводов; 3 — магнитный пускатель; 4 — кнопочная станция.

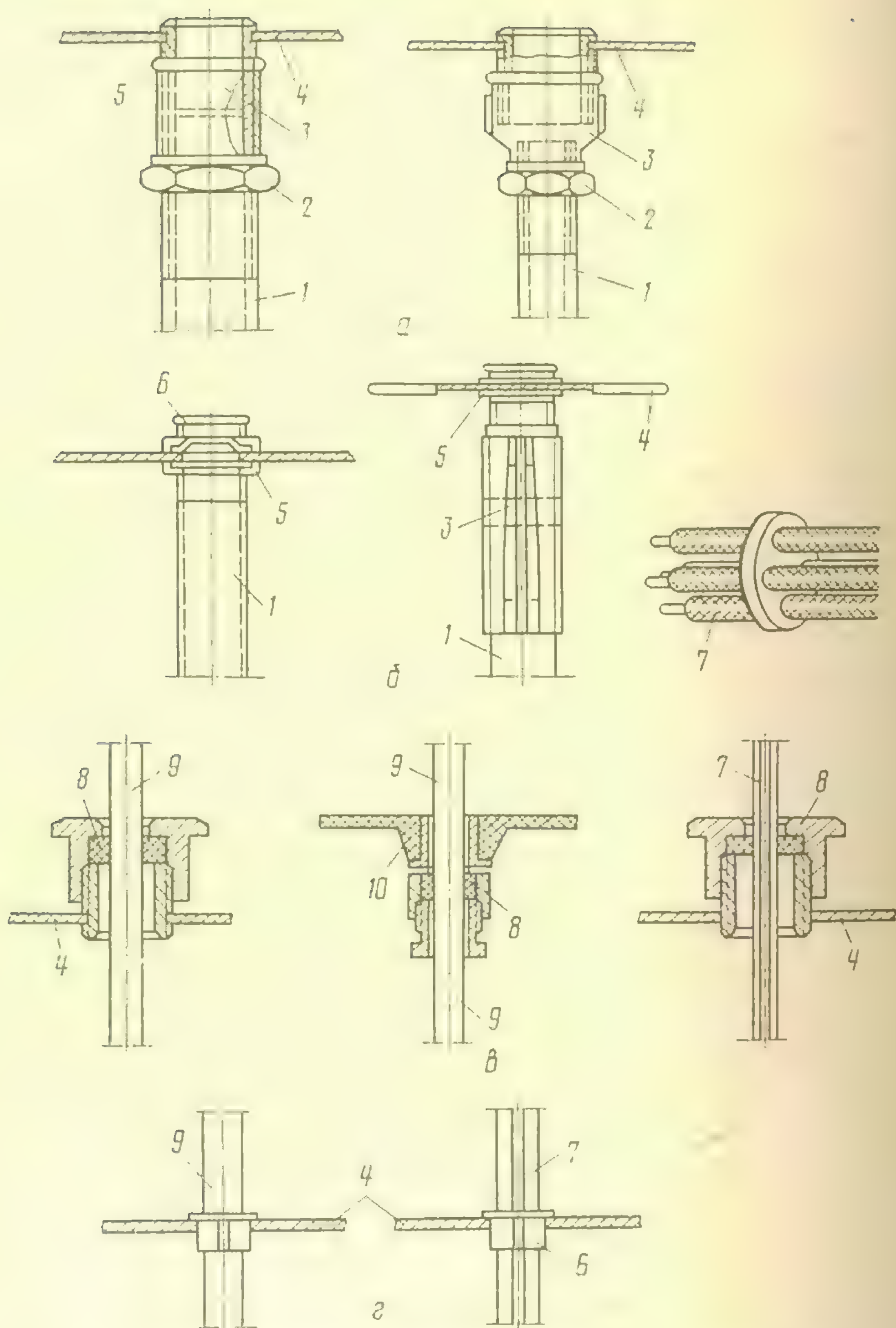


Рис. 20.10. Способы заделки проводов и кабелей при вводе в пускатели и кнопки:

а — соединение стальной трубы с пускателем пылеводонепроницаемого исполнения; *б* — то же, защищенного исполнения; *в* — ввод в пускатель и кнопку пылеводонепроницаемого исполнения; *г* — то же, защищенного исполнения; 1 — труба; 2 — контргайка; 3 — муфта прямая или переходная; 4 — корпус пускателя; 5 — гайка установочная; 6 — втулка полистиленовая; 7 — провода; 8 — шайба резиновая уплотняющая (сальник); 9 — кабель; 10 — корпус кнопки.

сигнализацию или звуковое оповещение о предстоящем пуске, установленные вблизи электродвигателя и приводного механизма аппарата для аварийного отключения электродвигателя, исключающий возможность дистанционного пуска.

На корпусах аппаратов управления и разъединяющих аппаратов должны быть нанесены четкие знаки, позволяющие легко распознавать включенное или отключенное положение рукоятки аппарата.

На каждом аппарате защиты должна быть надпись, указывающая номинальный ток аппарата, токи уставки расцепителя или нагревательного элемента в тепловом реле магнитного пускателя, номинальный ток плавкой вставки. Эта надпись может быть нанесена на схеме, которую вывешивают вблизи места установки защитных аппаратов.

На рисунке 20.9 показано выполнение проводки от пускателя к электродвигателю. Магнитный пускатель и кнопочная станция укреплены на скобах Z-образного перфорированного профиля или на скобах из стальной ленты шириной 40 и толщиной 2 мм. Скобы крепят на стенах дюбель-гвоздями или дюбель-винтами. При монтаже пускателя укрепляют на трубе, к нему присоединяют скобы и на стене (основании) размечают центры крепежных отверстий. Затем скобы и пускатель снимают, высверливают гнезда для дюбелей, укрепляют скобы и устанавливают пускатель. После этого к гнезду сальника подводят трубу и, сгоняя с нее муфту, скрепляют трубу с пускателем. Муфту закрепляют контргайкой.

Аналогичным образом на скобах, выполняемых из полос 25 × 2 мм, устанавливают кнопочные станции, пакетные выключатели и т. п. Во всех случаях расстояние от аппарата до стены (основания), то есть длина боковых стоек скобы, должно быть 60 мм.

Особенно тщательно следует заделывать провода и кабели при вводе их в пускатели и кнопки. При сгоне муфты с закрепленной подводящей трубы на гнездо сальника пускателя на резьбу необходимо наложить паклю, пропитанную суриком.

При соединении корпуса пускателя защищенного исполнения с трубой на нее сначала наворачивают заземляющую гайку (зубцами вверх), а затем устанавливают пускатель и закрепляют второй гайкой.

Кабель или провода в пускатель (и кнопки) защищенного исполнения вводят через полиэтиленовую шайбу, а пускатель и кнопки пылеводонепроницаемого исполнения — через сальник с уплотняющей резиновой шайбой (рис. 20.10).

Установку автоматов и вводы в них выполняют так же, как и для магнитных пускателей.

20.7. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПО КОНСТРУКТИВНОМУ ИСПОЛНЕНИЮ

Электродвигатели, устанавливаемые в помещениях с нормальной средой, как правило, должны иметь исполнение IP00 и IP20 (табл. 20.3). При установке на открытом воздухе должно быть исполнение не менее IP44, или специальное, соответствующее условиям работы. Если в помещении возможно оседание пыли или других веществ на обмотки,

20.3. Рекомендуемые типы электродвигателей в зависимости от категории помещений

Категория помещения по условиям окружающей среды	Примерный перечень помещений	Степень защиты по ПУЭ	Рекомендуемые двигатели
Сухое (относительная влажность не превышает 60%, температура 30°C)	Отопливаемые склады, инкубатории, помещения для обслуживающего персонала ферм, подсобные помещения в ремонтно-механических мастерских и пр.	IP00...IP20	Однофазные с пусковым сопротивлением типа АОЛБ 0...3 габаритов; трехфазные основного исполнения типа 4А АОЛ2 1...3 габаритов, типа АО2 3...9 габаритов; трехфазные с повышенным скольжением типа АОЛС2 1...3 габаритов, типа АОС2 3...9 габаритов; трехфазные с повышенным пусковым моментом типа АОЛ2 4...9 габаритов
Влажное (пары конденсирующаяся влага возникает временно, в небольших количествах, относительная влажность более 60%, но не превышает 75%, температура не выше 30°C)	Неотопливаемые склады, залы столовых, отопливаемые подвалы и т. д.	IP20...IP22	Трехфазные сельскохозяйственного исполнения типа 4А, АО2-СХ 3...7 габаритов серии Д
Сырое (относительная влажность постоянно превышает 75%, температура не выше 30°C)	Овощехранилища, доильные залы, молочные, коровники, птичники, свинарники и т. д.	IP33	То же
Особо сырое (относительная влажность воздуха близка к 100%; потолок, стены и другие предметы в помещении покрыты влагой)	Моечные кормоцехов и другие подсобные помещения. Наружные установки Саран, навесы и неотопливаемые помещения с температурой, влажностью и составом воздуха, не отличающимися от наружных условий	Не менее IP43	Трехфазные серии 4А, АО2 во влагомозостойком исполнении 3...9 габаритов. Сельскохозяйственного исполнения типа 4А, АО2-СХ, серии Д
На открытом воздухе	—	Не менее IP44	То же

что будет приводить к нарушению охлаждения электродвигателя, то его исполнение должно быть не менее IP44, или продуваемое с подводом чистого воздуха. В сырых и особо сырых местах нужно использовать электродвигатели, имеющие исполнение не менее IP43 и изоляцию, рассчитанную на противодействие сырости и пыли (со специальной обмазкой, влагостойкую и т. д.). Для помещений с химически активными парами или газами исполнение двигателя должно быть не менее IP44, или продуваемое с подводом чистого воздуха. Допускается применять двигатели с исполнением не менее IP33, но с химически стойкой изоляцией и с закрытием голых токоведущих частей колпаками или другими защитными средствами.

Если в обмотки двигателя заложены температурные индикаторы, то выводы от них должны быть расположены на специальных шпиках, обеспечивающих удобство проверки и измерений.

Следует особо следить за условиями охлаждения электродвигателей. Нельзя при работе электродвигателя закрывать его чехлами или коробами от пыли и брызг, поскольку из-за этого сильно ухудшаются условия его вентиляции.

Контрольные вопросы и задания к главе 20. 1. Какие виды электроприводов встречаются в сельскохозяйственных установках? Приведите примеры. 2. Как различают механические характеристики производственных механизмов и электрических двигателей? 3. Какой критерий определяет предельную нагрузку на двигатель? Поясните на кривой нагрева. 4. Дайте определение режимам работы электродвигателя S1, S2, S3, S6. 5. Как рассчитать мощность двигателя по нагрузочной диаграмме рабочей машины? 6. Что вы знаете о видах передачи от двигателя к рабочей машине? 7. Перечислите основные требования к установке электродвигателей. 8. Как устанавливают двигатель на рабочем месте? 9. Какие требования предъявляются к установке пускозащитной аппаратуры? 10. Как выбирают двигатель по конструктивному исполнению?

Глава 21. СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

21.1. ВИДЫ СХЕМ АВТОМАТИКИ И УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НА СХЕМАХ

Электрические схемы соединений электроприводов можно разделить на два основных вида: принципиальные и монтажные.

Принципиальная схема показывает взаимную электрическую связь между элементами схемы; по ней можно выяснить последовательность срабатывания отдельных элементов. Территориальное (взаимное) расположение отдельных элементов в схеме, размеры, тип и площадь поперечного сечения проводов на принципиальных схемах не показывают. В свою очередь, различают *свернутые* и *развернутые* принципиальные схемы. Свернутая схема приведена на рисунке 21.5. На ней все элементы, принадлежащие магнитному пускателью, изображены обобщенно. Та же схема в развернутом виде приведена на рисунке 21.6. Здесь элементы магнитного пускателя разобраны и помещены в той цепи, к которой они относятся по действию схемы. На этой схеме отдельно показаны главная (силовая) цепь двигателя и цепь

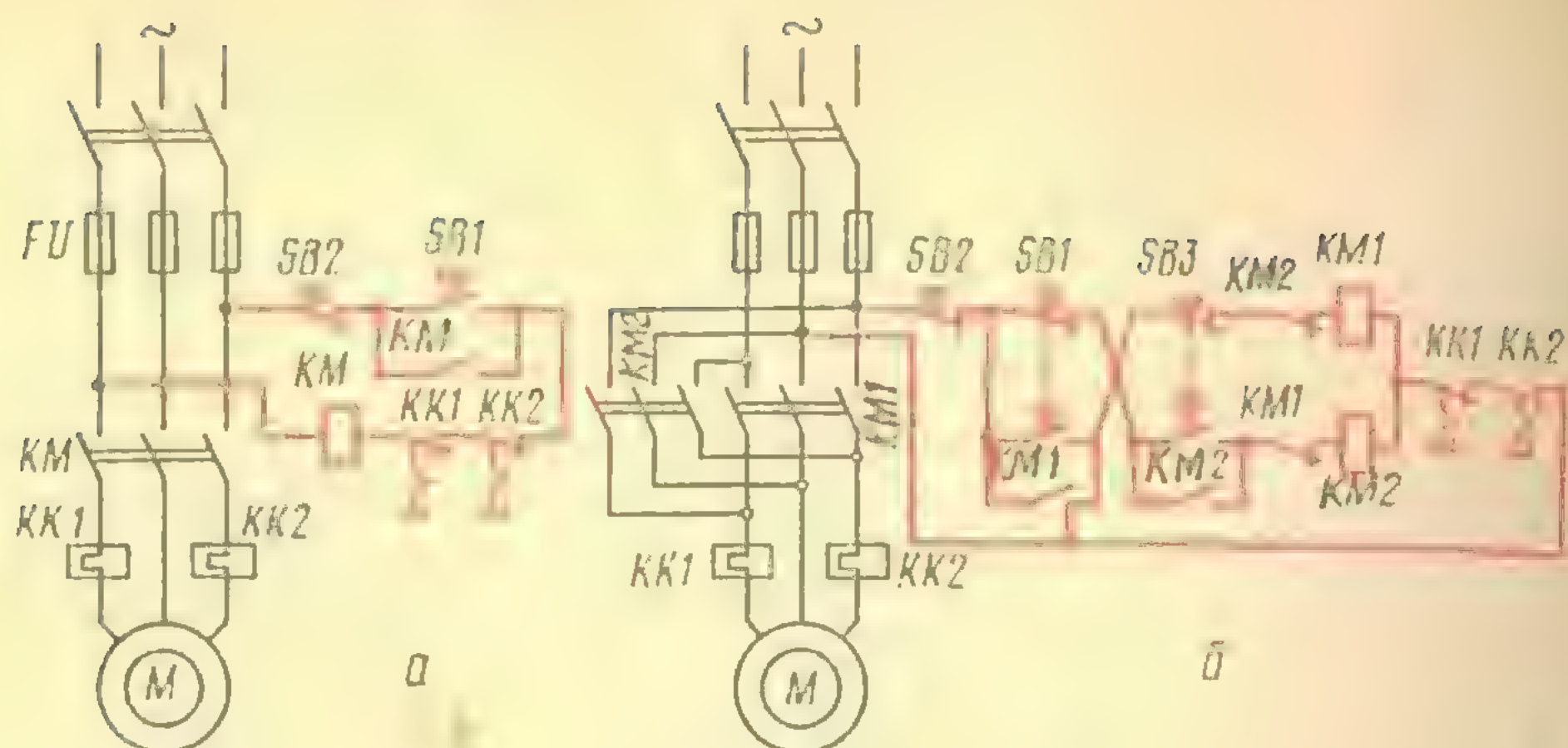


Рис. 21.1. Принципиальные развернутые электрические схемы управления электродвигателем при помощи неперевёрсивного (а) и реверсивного (б) магнитных пускателей.

управления (вспомогательная). Главную цепь обычно изображают жирными линиями, а вспомогательную — более тонкими.

Принадлежность элементов схемы к отдельным аппаратам устанавливают по общему условному обозначению. Условные буквенные обозначения стандартизованы (ГОСТ 2.710—81, общий для стран СЭВ—СТ СЭВ 2182—80). Элементы схем обозначают латинскими буквами.

Если в схеме управления используются контроллеры, то к ней прилагается таблица, в которой указано, какие контакты аппарата включены при данном положении контроллера.

На принципиальных схемах все контакты аппаратов показывают в нормальном положении, то есть при отсутствии электрического или механического воздействия на элементы аппарата.

Монтажная схема предназначена для использования при монтаже, поэтому она является рабочим чертежом схемы. Аппараты и приборы на этой схеме располагают соответственно их размещению в электроустановке. Их обозначают полными символами. Соблюдать масштаб не обязательно. Для проводов указывают их число, марку и площадь сечения. Монтажные схемы электроприводов называют также схемами внешних соединений.

В зависимости от аппаратуры, которая применяется для автоматизации электропривода, различают релейно-контактную автоматику (контакты, реле, командо-аппараты), электромашинную автоматику (основной элемент — электромашины усилители), электронную автоматику (электронные и ионные аппараты).

21.2. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ КОРОТКОЗАМКНУТЫМ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ

На рисунке 21.1,а приведена принципиальная развернутая схема пуска и остановки электродвигателя с короткозамкнутым ротором при помощи неперевёрсивного магнитного пускателя. Двигатель включается линейным контактором KM, главные контакты которого находятся в

силовой цепи электродвигателя. При нажатии кнопки *SB1* катушка контактора *KM* оживляется током и замыкает контакты в силовой цепи. Одновременно замыкается блокировочный контакт *KM* и шунтирует кнопку *SB1*. Поэтому при отпускании кнопки *SB1* двигатель не отключается, а продолжает работать.

При нажатии кнопки *SB2* разрывается цепь питания катушки, и двигатель останавливается. В случае перегрузки электродвигателя разомкнутся контакты тепловых реле *KK*. Электродвигатель будет отключен также, если напряжение в сети (а следовательно, и на катушке *KM*) снизится до значения менее $0,85 U_n$. От коротких замыканий двигатель защищен предохранителями *FU*. Сведения о настройке тепловых реле приведены в главе 27.

На рисунке 21.1,б приведена схема пуска, остановки и изменения направления вращения короткозамкнутого электродвигателя при помощи реверсивного магнитного пускателя. При нажатии кнопки *SB1* образуется цепь питания катушки контактора *KM1*, которая притягивает его магнитную систему, в результате чего замыкаются контакты *KM1* в силовой цепи электродвигателя; двигатель включен. Одновременно замыкается блокировочный контакт *KM1*, блокирующий кнопку *SB1*, и замыкается контакт *KM1* в цепи катушки *KM2*. Этот контакт также является блокировочным. Он, как и размыкающий контакт *KM2* предотвращает одновременное включение обоих контакторов, ибо в противном случае произойдет короткое замыкание в силовой цепи. При нажатии кнопки *SB3* размыкается цепь катушки *KM1* и контактор *KM1* отключает двигатель. Возвращается в нормальное замкнутое состояние контакт *KM1* в цепи катушки *KM2*. Следовательно, образуется цепь питания катушки контактора *KM2*, замыкаются силовые контакты *KM2*; двигатель резко тормозится и затем начинает вращаться в обратную сторону. В случае перегрузки двигателя цепь катушек *KM1* и *KM2* будет разомкнута контактами тепловых реле *KK*. Останавливают двигатель нажатием кнопки *SB2*.

Некоторые реверсивные магнитные пускатели снабжаются только механической блокировкой, которая предотвращает их одновременное включение.

При реверсировании двигателей с большими маховыми моментами следует сначала остановить двигатель нажатием кнопки *SB2*, а затем включить его на обратное направление вращения.

При пуске асинхронных короткозамкнутых двигателей большой мощности для снижения пусковых токов применяют схемы пуска при пониженном напряжении. На рисунке 21.2 приведена схема пуска короткозамкнутого двигателя с пусковым сопротивлением *R*. При нажатии кнопки *SB1* включается цепь тока катушки контактора *K*. Главные контакты этого контактора включают статорную обмотку двигателя в сеть через пусковые сопротивления *R*, осуществляя пуск при пониженном напряжении. Одновременно приводится в действие маятниковое реле времени *K'*, которое через некоторое время замыкает свои контакты в цепи питания катушки контактора *KM*: главные контакты *KM* шунтируют пусковое сопротивление *R* и двигатель оказывается включенным на полное напряжение сети.

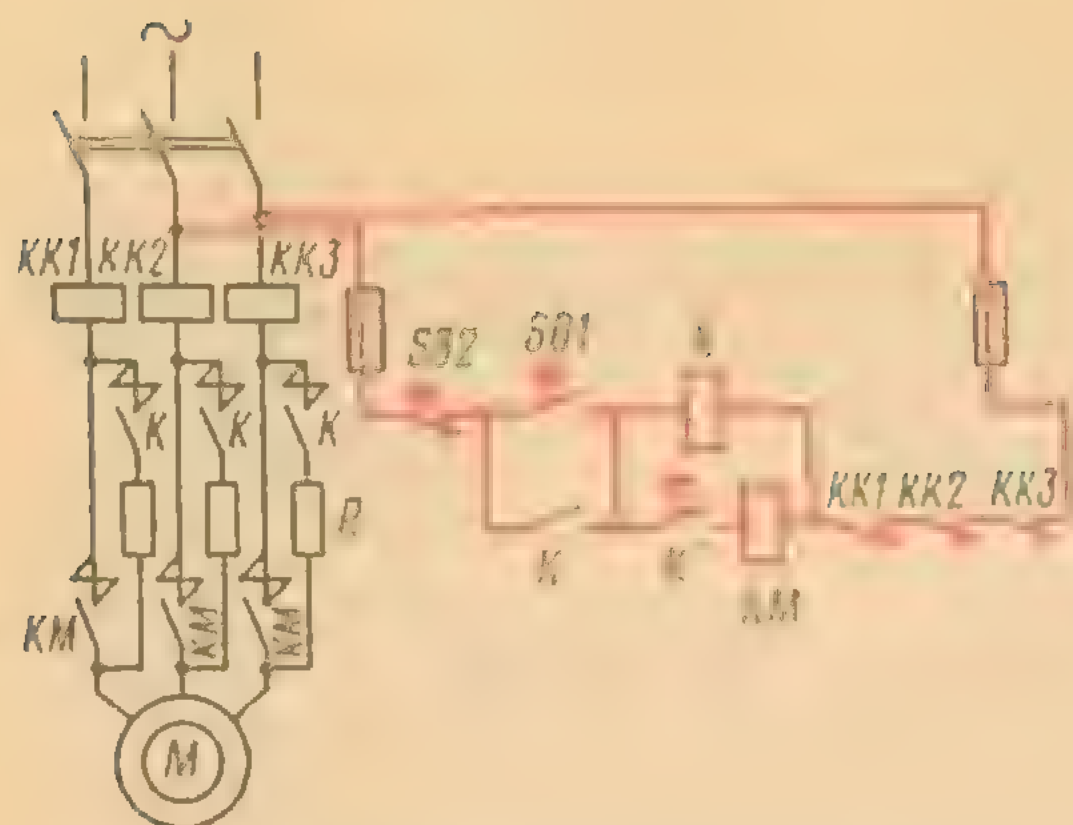


Рис. 21.2. Схема пуска короткозамкнутого электродвигателя с пусковым сопротивлением R .

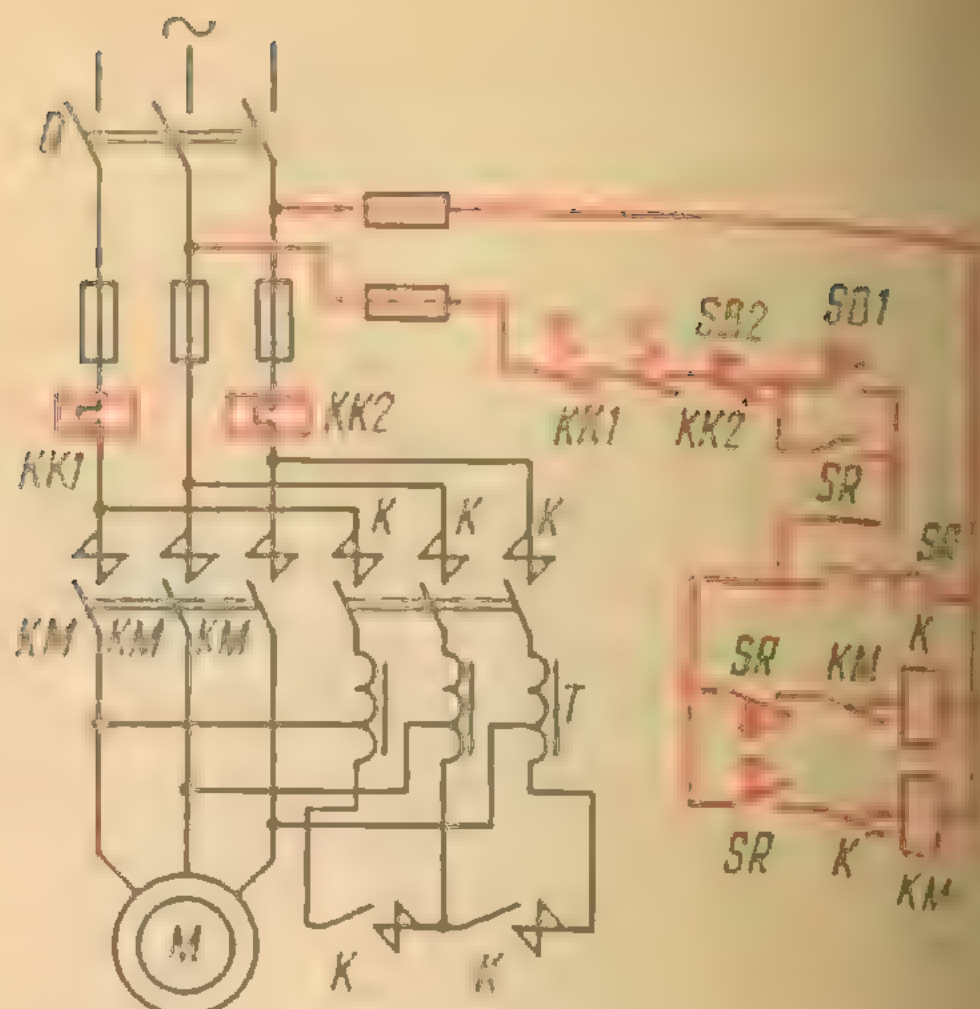


Рис. 21.3. Схема автотрансформаторного пуска короткозамкнутого электродвигателя.

Для снижения пускового тока применяется и схема автотрансформаторного пуска короткозамкнутых двигателей большой мощности (рис. 21.3). При нажатии кнопки $SB1$ оказываются под током катушка контактора K и катушка реле управления SR . Главные контакты контактора K включают автотрансформатор T . Двигатель разгоняется при пониженном напряжении. Спустя некоторое время размыкающие контакты реле SR размыкаются, а замыкающие — замыкаются. При этом обесточивается катушка контактора K (отключается автотрансформатор T) и подается питание на катушку контактора KM . Двигатель продолжает работать при полном напряжении сети.

21.3. ТИПОВЫЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕМ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

В схемах управления двигателем с фазным ротором включают или выключают секции сопротивления пускового реостата в соответствии с заданными условиями. Например, секции реостата нужно шунтировать через определенные промежутки времени (управление в функции времени), а также при снижении пускового тока до определенного значения (управление в функции тока), при достижении заданной частоты вращения в зависимости от пути перемещения груза и т. д.

Рассмотрим некоторые из схем управления электродвигателем с фазным ротором.

На рисунке 21.4 показана схема управления двигателем с фазным ротором в функции времени. При нажатии кнопки $SB1$ возникает цепь питания катушки контактора KM . Силовые контакты KM включают статорную обмотку двигателя в сеть. Одновременно начинает работать магнитное реле времени KM' , пристроенное к контактору. Через заданный промежуток времени реле замыкает свой контакт и включает катушку контактора $K1$. Силовые контакты $K1$ шунтируют первую ступень

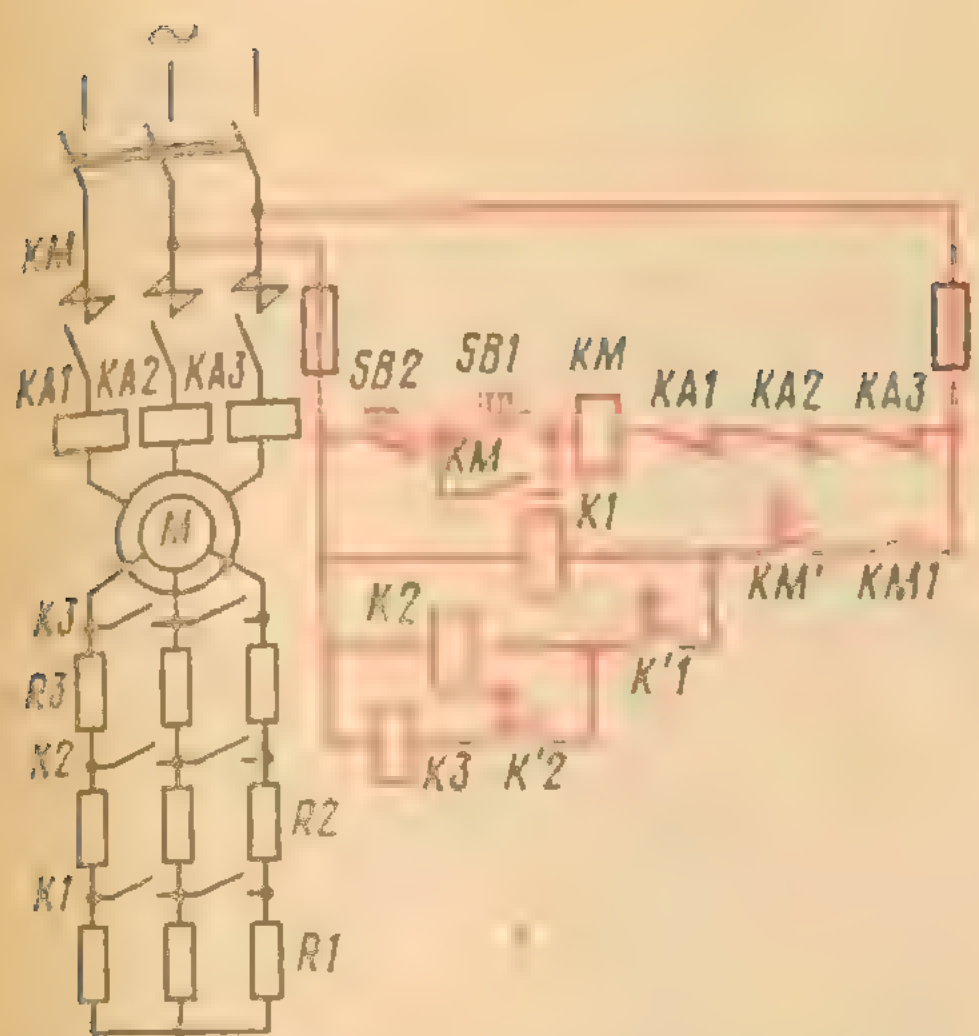


Рис. 21.4. Схема управления электродвигателем с фазным ротором в функции времени.

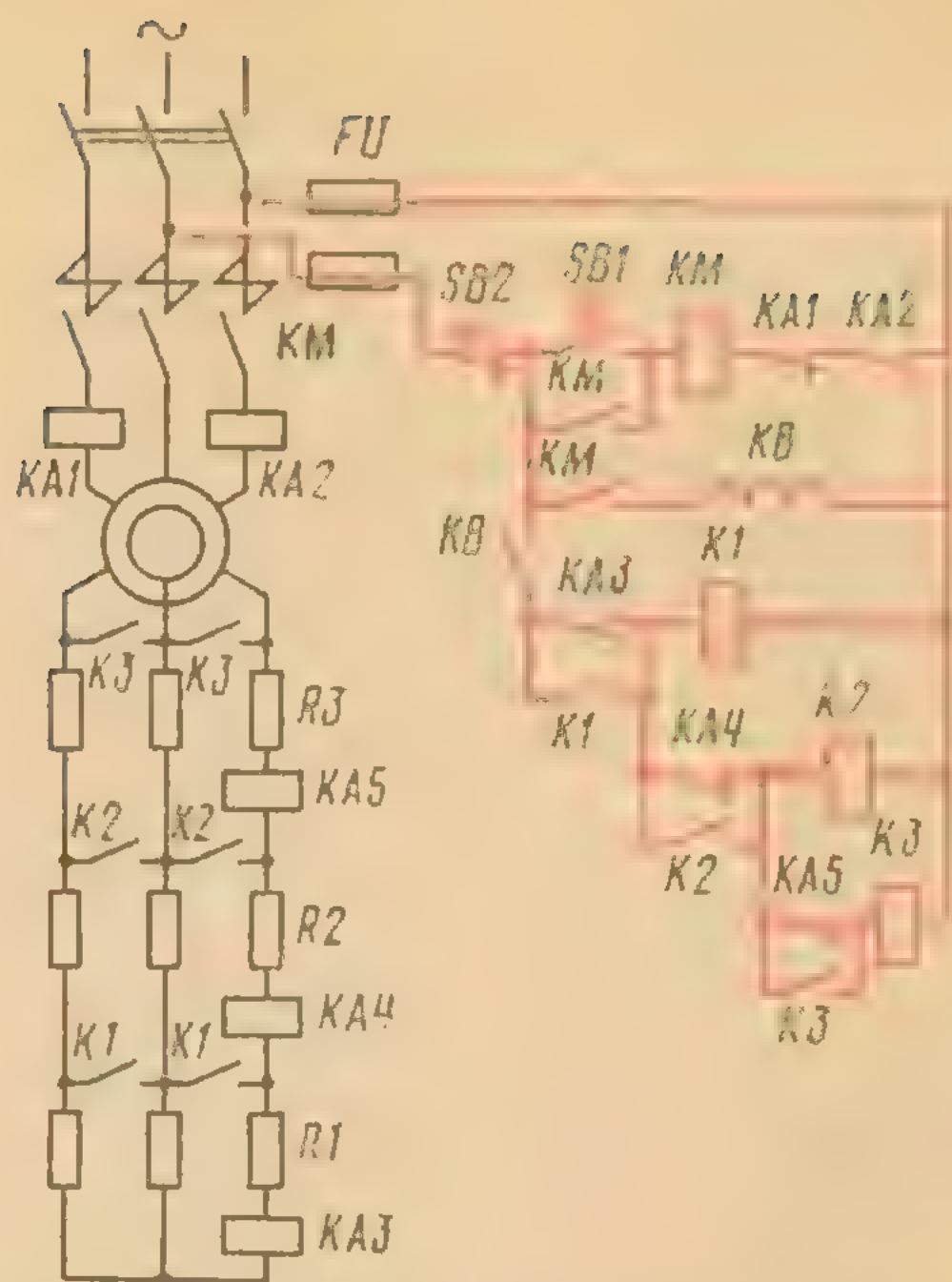


Рис. 21.5. Схема управления двигателем с фазным ротором в функции тока.

реостата $R1$. Одновременно начинает работать пристроенное к контактору $K1$ маятниковое реле времени $K'1$, которое через некоторое время замыкает цепь катушки контактора $K2$. При этом шунтируется вторая ступень реостата $R2$ и включается реле времени $K2$ и т. д.

На рисунке 21.5 приведена схема управления электродвигателем с фазным ротором в функции тока. Токовые реле ускорения $KA3$, $KA4$, $KA5$, катушки которых включены в цепь ротора, настроены таким образом, чтобы токи, при которых реле срабатывают, удовлетворяли неравенству

$$I_{KA3} > I_{KA4} > I_{KA5}.$$

При нажатии кнопки $SB1$ оказывается под током катушка контактора KM , замыкаются главные контакты контактора KM и два блокировочных контакта KM в цепи управления. Один из них шунтирует кнопку $SB1$, а другой включает катушку реле KB . Двигатель разгоняется, а реле KB замыкает свой замыкающий контакт KB и присоединяет к сети цепь катушек контакторов ускорения. В первый момент пуска, когда ток в цепи ротора, а следовательно, и в цепи катушки реле ускорения $KA3$ велик, реле $KA3$ удерживает размыкающий контакт $KA3$ в разомкнутом состоянии, и катушка контактора ускорения $K1$ не оживлена током. При снижении пускового тока до установленного значения отключения реле $KA3$ его размыкающий контакт возвращается в замкнутое положение и замыкает катушку контактора ускорения $K1$. Силовые контакты этого контактора шунтируют первую ступень пускового сопротивления $R1$. Двигатель продолжает разгоняться при двух ступенях пускового реостата до тех пор, пока не снизится ток

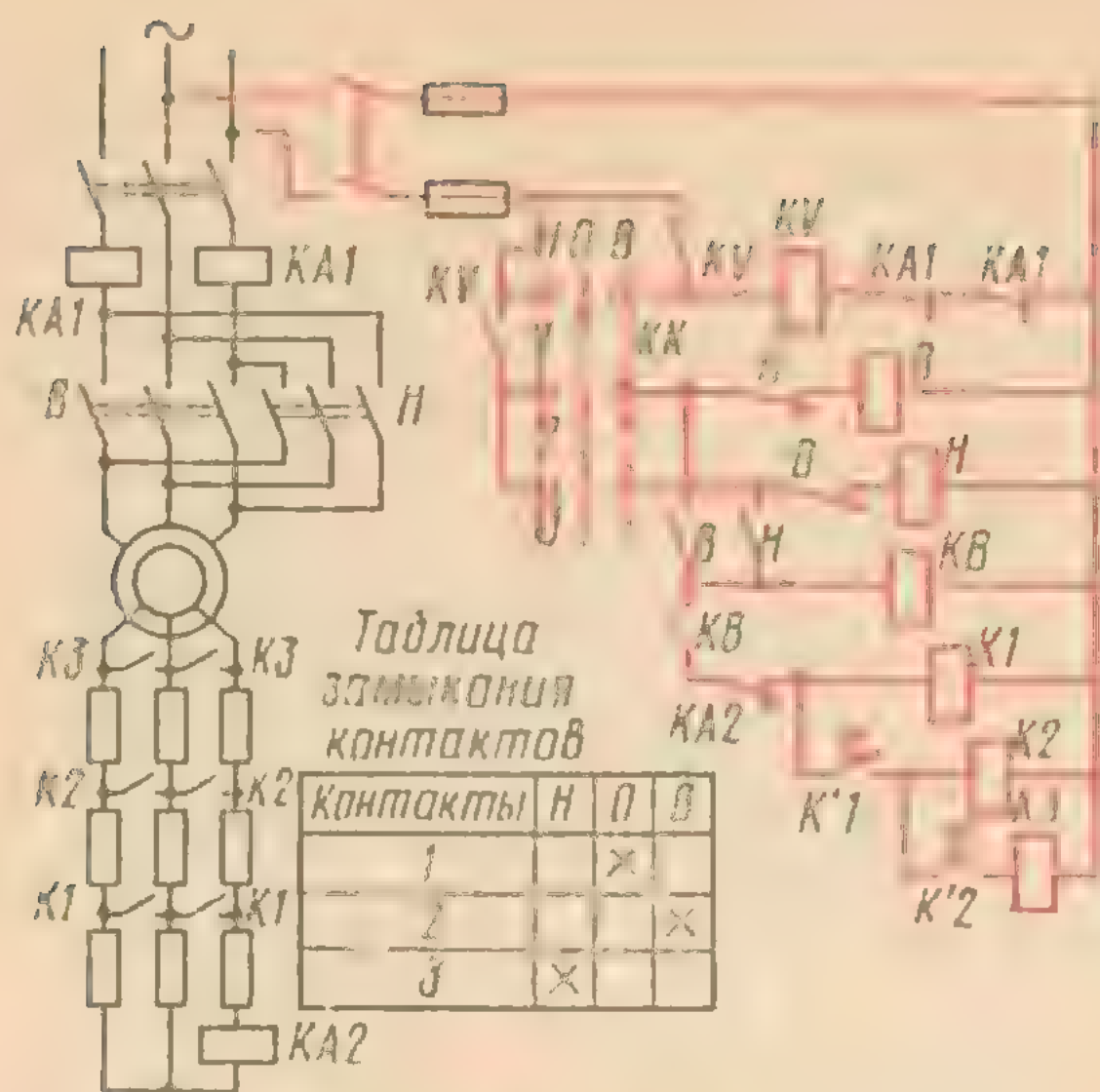


Рис. 21.6. Схема управления двигателем с фазным ротором в функции времени с торможением противовключением. Таблица замыкания контактов.

в обмотке реле K_{A4} до значения, при котором реле не удержит более в разомкнутом состоянии размыкающий контакт K_{A4} . При его замыкании происходит включение катушки контактора и шунтирование второй ступени пускового реостата R_2 и т. д. Замыкающие блок-контакты K_1 , K_2 , K_3 исключают вибрирование, а следовательно, подгорание контактов K_{A3} , K_{A4} и K_{A5} при токах в катушках реле ускорения близких к токам уставок.

Защиту двигателя выполняют два реле максимального тока K_{A1} и K_{A2} . Цепь управления защищена предохранителями FU .

На рисунке 21.6 приведена схема управления электродвигателем с фазным ротором в функции времени с торможением противовключением при помощи командоконтроллера KK . В нейтральном положении командоконтроллера замкнуты контакты 1. Катушка реле напряжения KV введена в цепь тока и при переключении командоконтроллера на другие положения остается включенной через цепь самоподпитки с нормально открытым контактом KV . Назначение этого реле — защита двигателя от снижения напряжения и самопроизвольного дальнейшего пуска (при положении контроллера *Вперед* или *Назад*).

При переводе командоконтроллера из нейтрального положения в положение *Вперед* включаются контактор B и блокировочное реле KB . Реле KB вводит в цепь тока катушку контактора противовключения $K1$. Замыкаются силовые контакты B и контакты $K1$ в цепи пускового сопротивления, и двигатель разгоняется при двух ступенях пускового сопротивления. Катушка реле противовключения K_{A2} настроена таким образом, что реле возбуждается и срабатывает при токе, большем, чем пусковой ток в цепи ротора. Следовательно, размыкающие контакты K_{A2} остаются замкнутыми при пуске. Вместе с подачей напряжения на катушку контактора $K1$ начинает работать пристроенное реле времени $K'1$, которое через некоторое время замыкает свои контакты в цепи катушки контактора ускорения $K2$. Силовые контакты этого контактора шунтируют одну ступень пускового реостата. Одновременно с оживлением тока катушки $K2$ начинает работать маятниковое реле времени $K'2$, и через некоторое время срабатывает контактор $K3$, силовые контакты которого шунтируют вторую ступень пускового реостата.

При установке командоконтроллера в положение *Назад* включается контактор H и электродвигатель тормозится противовключением. Так как в режиме противовключения ток в цепи ротора будет примерно в 2 раза больше, чем при пуске, то катушка реле K_{A2} возбуждается

и открывает свой размыкающий контакт $K12$. При этом размыкается цепь контакторов ускорения $K2$ и $K3$ и противовключения $K1$. В цепи ротора ток ограничивается всеми ступенями сопротивлений.

Выдержка времени срабатывания блокировочного реле $KВ$ больше, чем время срабатывания реле $K12$. Поэтому в самый момент противовключения катушка контактора $K1$ не получает питания, так как до момента срабатывания реле $KВ$ успевают разомкнуться размыкающие контакты $K12$.

На рисунке 21.6 приведена также диаграмма командоконтроллера, которая показывает, какие контакты замкнуты при различных положениях рукоятки командоконтроллера.

21.4. УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ В ЗАДАННОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ

Запуск двигателей в заданной последовательности обеспечивается системой электрической блокировки. Определенная последовательность в пуске, остановке, реверсировании и изменении частоты вращения электродвигателей и рабочих механизмов необходима в установках, связанных между собой общим технологическим процессом, для того, чтобы соблюсти непрерывность действия технологического потока и предупредить аварию. В сельском хозяйстве к таким технологическим процессам могут быть отнесены зерноочистка, сортировка, кормоприготовление и др.

На рисунке 21.7, а приведена схема блокировки двух электродвигателей, обеспечивающая заданную последовательность пуска и остановки. Схема исключает возможность пуска электродвигателя $M2$, прежде чем запущен двигатель $M1$. Для этой цели в цепи управления $M2$ включены замыкающие контакты $KМ1$, связанные с контактором электродвигателя $M1$. Если $M1$ остановится, то автоматически остановится и $M2$. Такая последовательность включения необходима, например, при транспортировке зерна на зерноочистительном пункте. Для предотвращения завала зерна запускают двигатель $M1$ привода горизонтального транспортера, а затем включают двигатель $M2$ привода вертикального транспортера, по которому зерно поступает на горизонтальный транспортер и далее в бункер. Для самостоятельного включения $M2$ следует замкнуть рубильник S .

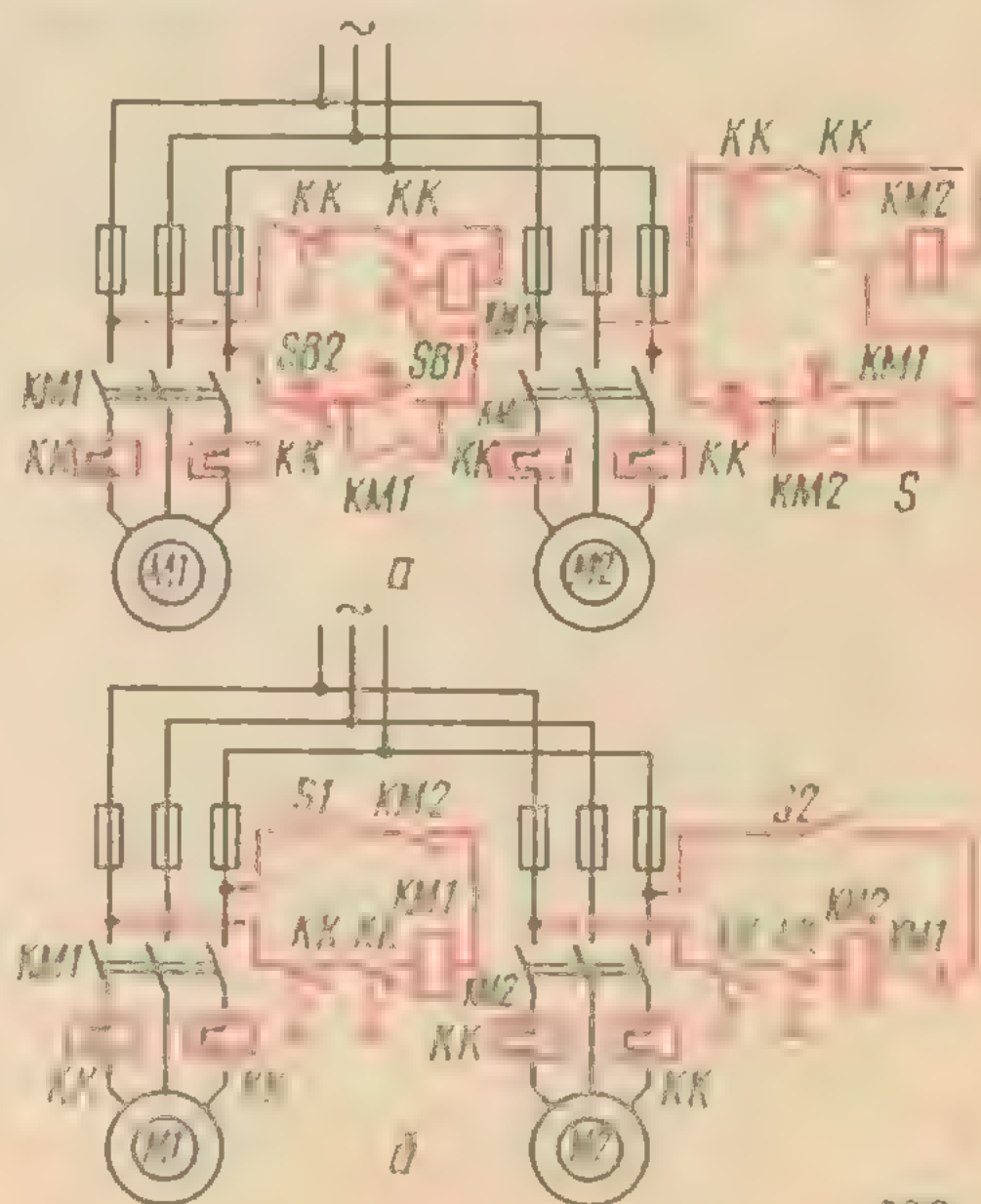


Рис. 21.7. Схемы блокировки двух электродвигателей при обеспечении заданной последовательности включения (а) и блокировки рабочего и резервного электродвигателей (б).

На рисунке 21.7,б приведена схема блокировки рабочего и резервного электродвигателей. Один из двигателей (рабочий или резервный) включают рубильником $S1$ или $S2$. Однако если один из двигателей включен, второй включиться не может, так как в цепи управления каждого из двигателей установлен нормально замкнутый контакт контактора другого двигателя. Когда требуется ввести в работу двигатель, следует выключить рубильник у действующего двигателя и включить у другого. По аналогичной схеме включаются агрегаты (рабочий и аварийный) насосных станций.

21.5. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ И ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫМИ УСТАНОВКАМИ

В схемах автоматического управления электрифицированными технологическими процессами в сельскохозяйственном производстве применяют технологические датчики для включения и выключения магнитного пускателя, контактора или другого типа электромагнитного выключателя.

Функции элементов схемы. Полностью автоматизированную электроустановку составляют из ряда элементов, выполняющих определенные функции. *Рабочими элементами* в электрических схемах являются электродвигатель, нагревательный прибор, источник света и т. д. Рабочий элемент схемы включается и выключается *исполнительным элементом*, в качестве которого используются магнитный пускатель, контактор или другой аппарат. В цепи управления исполнительного элемента в полностью автоматизированных схемах устанавливают контакты *технологического датчика*, который следит за ходом технологического процесса и в определенное время замыкает или размыкает цепь управления исполнительным элементом. В некоторых случаях при недостаточной мощности контактов датчика между датчиком и исполнительным элементом включают *промежуточное реле*.

В зависимости от характера автоматизируемой установки датчики следят за уровнем жидкости (например, при автоматизации процессов, связанных с перекачкой жидкости), окружающей температурой и влажностью (при автоматизации процессов нагрева, охлаждения и увлажнения), промежутком времени или расписанием включения и выключения электроустановки, массой и местоположением груза, степенью заполнения бункера и т. д.

Датчик воспринимает изменение контролируемого параметра и преобразует его в электрический импульс. Ниже приведены некоторые принципиальные схемы устройства датчиков и схем автоматического управления.

Автоматизация водокачек. При автоматизации водокачек используют различные датчики уровня, простейший из которых — поплавковое реле (рис. 21.8,а). Поплавок сопровождает уровень воды в водонапорном баке и при достижении нижнего заданного уровня включает насосный агрегат, нажимая кнопку $SB1$, а при достижении верхнего уровня отключает насосный агрегат, нажимая кнопку $SB2$.

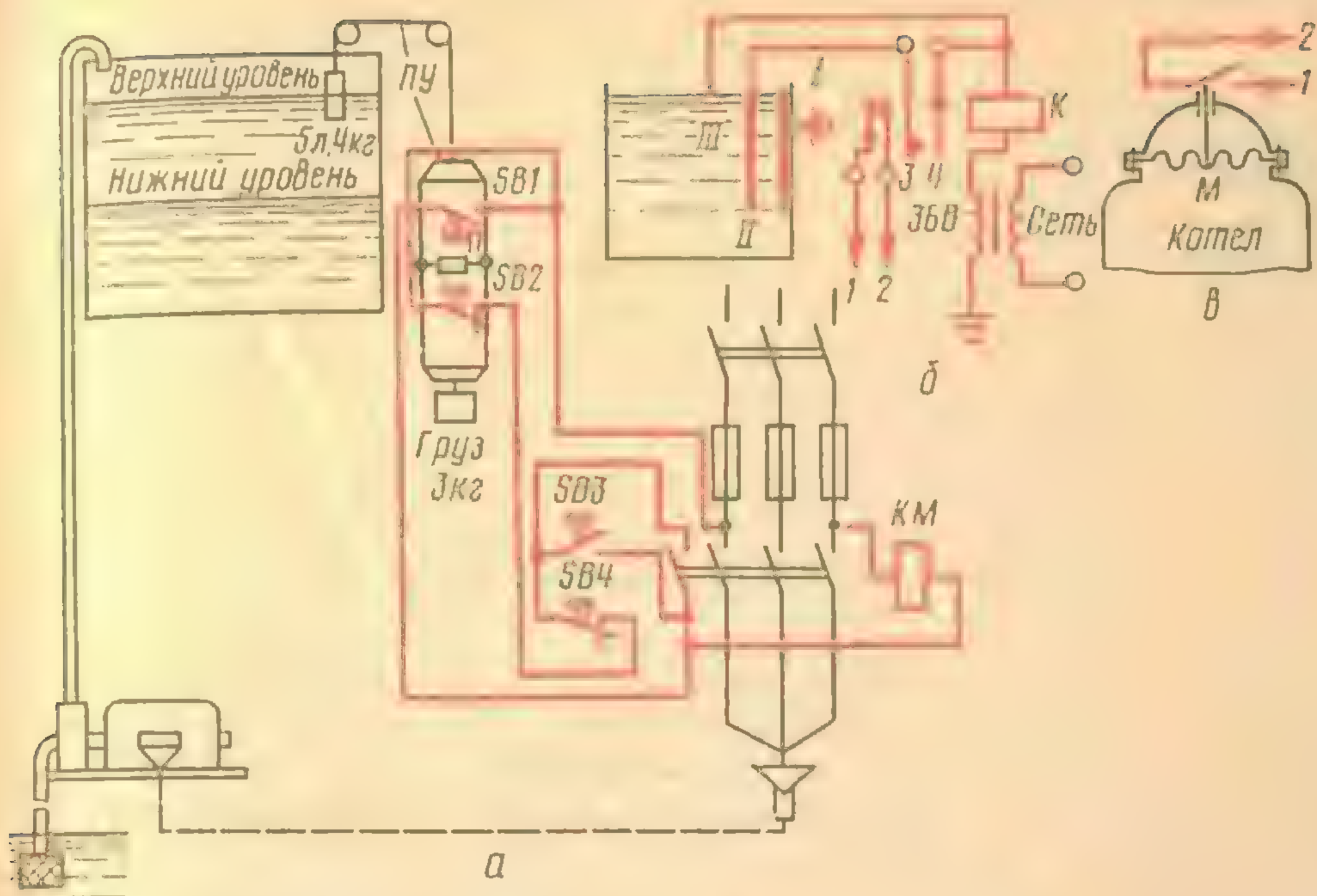


Рис. 21.8. Автоматические схемы управления водокачками:

а — при помощи поплавкового устройства ПУ и переключки II; *б* — при помощи датчиков из электродов I, II, III и реле К; *в* — при помощи реле давления с мембраной М.

На рисунке 21.8,б приведены электродный датчик уровня и схема его включения. В целях безопасности напряжение на датчике 36 В. Контакты 1 и 2 промежуточного реле включают и отключают катушку магнитного пускателя насосного агрегата. Когда бак заполнен водой до уровня электрода III, размыкающие контакты 1 и 2 поддерживают рабочий режим насосного агрегата. При погружении электрода III в воду замыкается цепь тока с электродом I и катушкой реле К, размыкаются контакты 1 и 2 и замыкаются контакты 3 и 4 подпитки промежуточного реле через электрод II нижнего заданного уровня воды.

Промежуточное реле будет включено до тех пор, пока уровень воды не станет ниже уровня электрода II, то есть пока не прекратится питание катушки промежуточного реле К и размыкающие контакты этого реле 1 и 2 снова не включают насосный агрегат.

В безбашенных водокачках с воздушно-водяным котлом в качестве датчика используется реле давления (рис. 21.8,в). При снижении уровня воды в котле уменьшается давление воздуха на мембрану М реле, контакты реле 1 и 2 замыкаются, электронасосный агрегат включается. При наполнении котла давление в нем растет и контакты размыкаются.

Безбашенная автоматическая водокачка (рис. 21.9) с напорным котлом обладает тем преимуществом перед водокачкой с напорным баком, что не требуется сооружать напорную башню, поэтому автоматическая водокачка с напорным котлом значительно дешевле башенной.

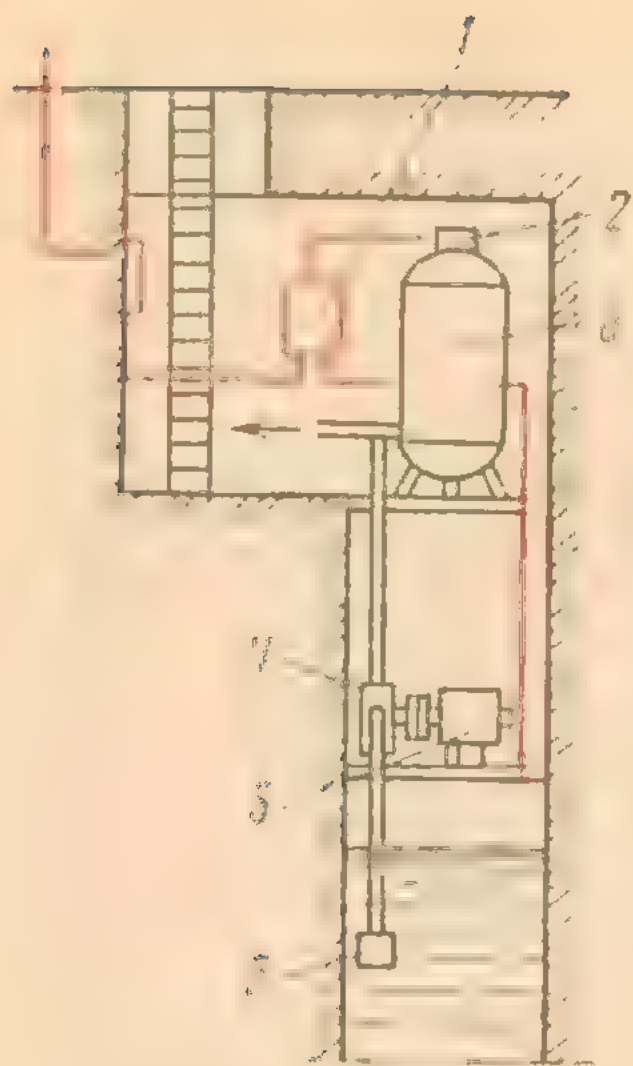


Рис. 21.9. Общий вид установки безбакиной докачки (схема управления приведена на рис. 27.9):

1 — станция управления; 2 — реле давления; 3 — котел; 4 — насос; 5 — электродвигатель; 6 — всасывающий клапан.

Водокачка этого типа состоит из следующих основных элементов: воздушно-водяного котла 3, вихревого насоса 4, электродвигателя 5 и реле давления 2.

В комплект водокачки также входит приемный клапан 6, всасывающий и нагнетающий трубопроводы, станция управления 1.

Водокачка работает следующим образом. Вода сначала подается к потребителю под давлением в воздушно-водяном котле. По мере расхода воды из котла давление в нем падает до тех пор, пока контакты манометрического реле давления *KSP* (см. рис. 27.9) не замкнут цепь катушки магнитного пускателя. Включается электродвигатель насосного агрегата, вода подается непосредственно потребителю, а излишки воды поступают в котел. По мере наполнения котла водой в нем снова повышается давление до известного предела, при котором размыкаются контакты *KSP* и выключается электронасос.

Для двигателей, приводящих в действие насосы, а также для вентиляторов необходимо обеспечить защиту от возможной потери одной из фаз сети.

В схеме управления водокачкой для защиты от перегрузки используются тепловые реле *КК*, настроенные на размыкание цепи катушки магнитного пускателя при увеличении тока на 10...20%. Нагревательные элементы реле *КК* включены на фазный ток. Поэтому при включении двигателя по схеме «треугольник» концы обмоток следует присоединять к соответствующим зажимам станции управления. Напряжение на схему управления подают, поворачивая ручку пакетного выключателя *Q*. Затем кнопкой *SBI* включают реле возврата *КТ*. Если при этом был замкнут контакт *KSP* в реле давления, то включится магнитный пускатель *КМ*, и насос начнет подавать воду. При заполнении бака водой и увеличении давления воздушной подушки в котле реле давления разомкнет контакт *KSP* и магнитный пускатель выключится. При перегрузке двигателя и срабатывании теплового реле отключится реле возврата *КТ* и, следовательно, магнитный пускатель *КМ*. Все металлические части водокачки должны быть надежно заземлены.

Автоматизация электронагревательных установок. В качестве датчиков в схемах автоматического управления электронагревательными установками применяют контактные термометры, терморегуляторы

манометрического принципа действия, терморегуляторы биметаллические и т. д.

Контактные ртутные термометры используют совместно с промежуточными реле, которые служат для усиления мощности контактов. Ртутный столбик в капилляре термометра может выдержать ток 10...20 мА. Поэтому его нельзя включать непосредственно в цепь управления магнитного пускателя, которая потребляет ток в несколько сотен миллиампер.

На рисунке 21.10, а показана схема управления установкой для поддержания режима температуры на заданном уровне. Термометр T° при замыкании контакта (верхний уровень регулируемой температуры) включает промежуточное реле $K1$, а оно, в свою очередь, катушку магнитного пускателя KM привода вентилятора. При снижении температуры сначала размыкается контакт T° и выключается вентилятор, а затем контакт в термометре $T^{\circ}2$. Теряет питание катушка реле $K2$, а его замыкающий контакт включает нагревательный прибор E через исполнительный элемент KL .

Для регулирования влажности используются увлажненные контактные термометры.

Подвижный проволочный контакт 2 контактного термометра (рис. 21.10, б) можно устанавливать на любом делении термометра, вращая магнит 8. Магнитное реле увлекает за собой сердечник 7, который вращает винт 4. Муфта 3, поднимаясь или опускаясь по винту, перемещает контакт 2.

Вместо контактного термометра в схемах регулирования температуры могут быть использованы термоэлектросигнализаторы, например, типа ТС-100 (до 100°C). Термоэлектросигнализатор (рис. 21.10, в) работает на манометрическом принципе. Термобаллон 9 заполнен жидкостью, имеющей большой коэффициент объемного расширения (например, дигерон). При изменении окружающей температуры давление внутри баллона изменяется, манометрическое устройство поворачивает стрелку 10, устанавливая ее на делении шкалы, соответствующем значению температуры окружающей среды. Стрелка снабжена электрическим контак-

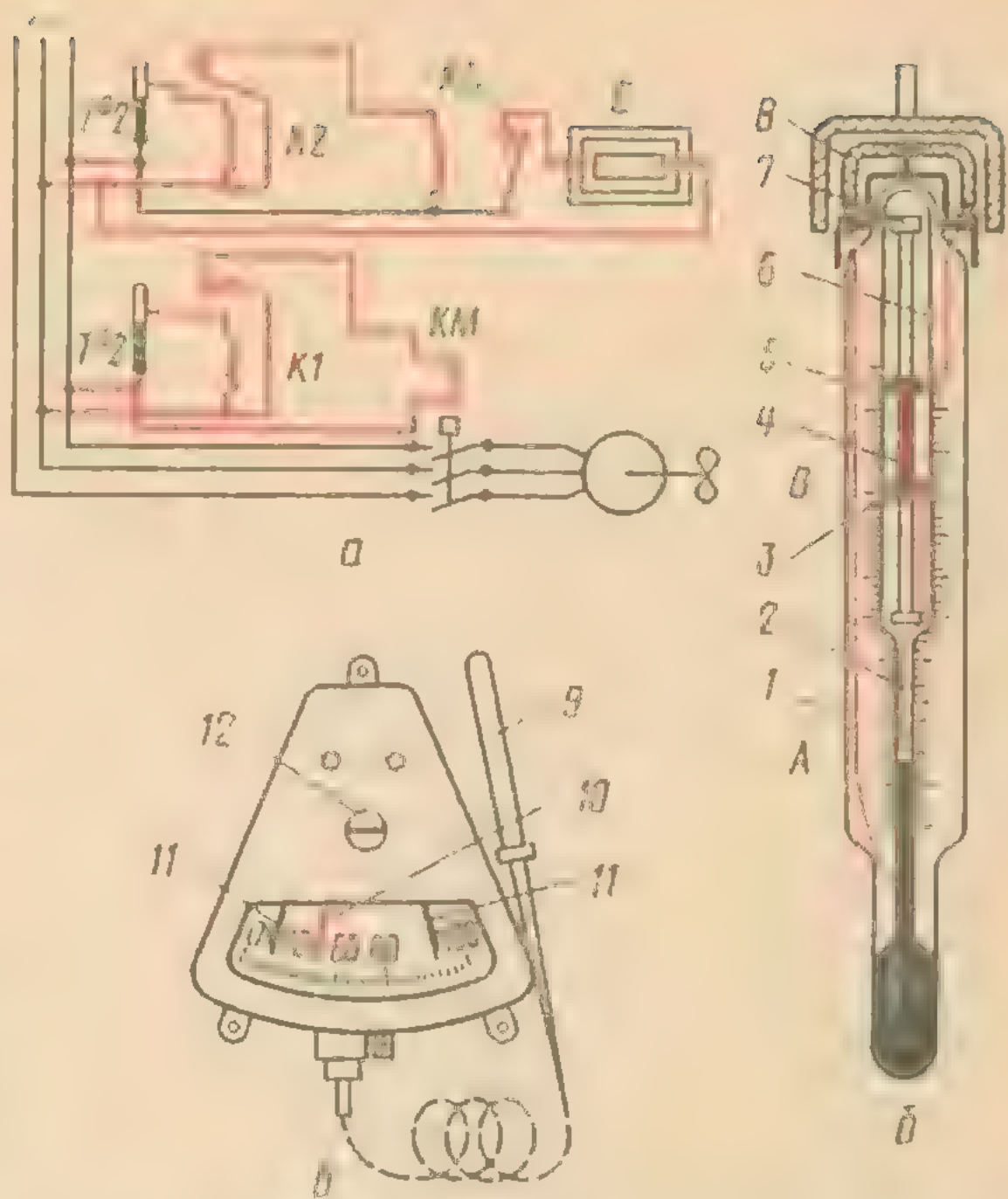


Рис. 21.10. Схема автоматического поддержания заданной температуры (а), контактный термометр (б) с подвижным контактом и термосигнализатор ТС (в):

1 — неподвижный контакт; 2 — проволочный подвижный контакт; 3 — передвижная муфта; 4 — ходовой винт; 5 — стеклянная трубка; 6 — спаянная проволока; 7 — стальной сердечник; 8 — полковообразный магнит; 9 — термобаллон; 10 — стрелка реле; 11 — установочные контакты; 12 — зажимы для подключения прибора к внешней цепи; А — измерительная шкала; Б — настроечная шкала.

том, который замыкает или размыкает зафиксированные контакты, устанавливаемые на требуемом уровне температур, и включает или выключает цепи управления или сигнализации.

Биметаллический терморегулятор обычно рассчитан на температуру до 250°C . Чувствительным элементом является биметаллическая пластина, закрепленная в держателе. При изменении окружающей температуры конец спирали или пластины поворачивается и замыкает (размыкает) контакты в цепи управления.

Температурные реле с биметаллическими чувствительными элементами используют в схемах автоматического управления электроводонагревателями типа ВЭТ. Ртутные контакты температурного реле устанавливают в цепи катушки магнитного пускателя.

Широкие возможности для автоматизации многих процессов сельского хозяйства открываются в связи с применением различных полупроводниковых материалов. Так, нашли практическое применение термоэлектрорегуляторы на основе тиристоров и симисторов (двунаправленные тиристоры). На рисунке 21.11 приведены схемы регулирования температуры с тиристором, в цепи управления которого установлен герметизированный контактный термометр — чувствительный и весьма надежный датчик температуры.

В схеме, изображенной на рисунке 21.11, а, при замыкании контакта термометра (по достижении необходимой температуры) через ртутный капилляр проходит ток, ограниченный сопротивлением R и равный долям миллиампера. Тиристор в этом случае заперт, поскольку управляющий электрод $У$ замкнут на катод $К$ и нагревательное устройство отключено. Со снижением температуры контакт в термометре размыкается, на конденсаторе C появляется напряжение, тиристор открывается и пропускает ток к нагревателю. Мост из диодов $VD1...VD4$ используется для того, чтобы ток через нагреватель проходил в оба полупериода (тиристор пропускает ток только в одном направлении). Если мостовую схему убрать, а нагреватель подключить, как показано пунктиром, то теплота в нагревателе будет выделяться только с одной полуволны тока.

Применяя каскадные схемы включения тиристоров, можно управлять работой мощных нагревателей.

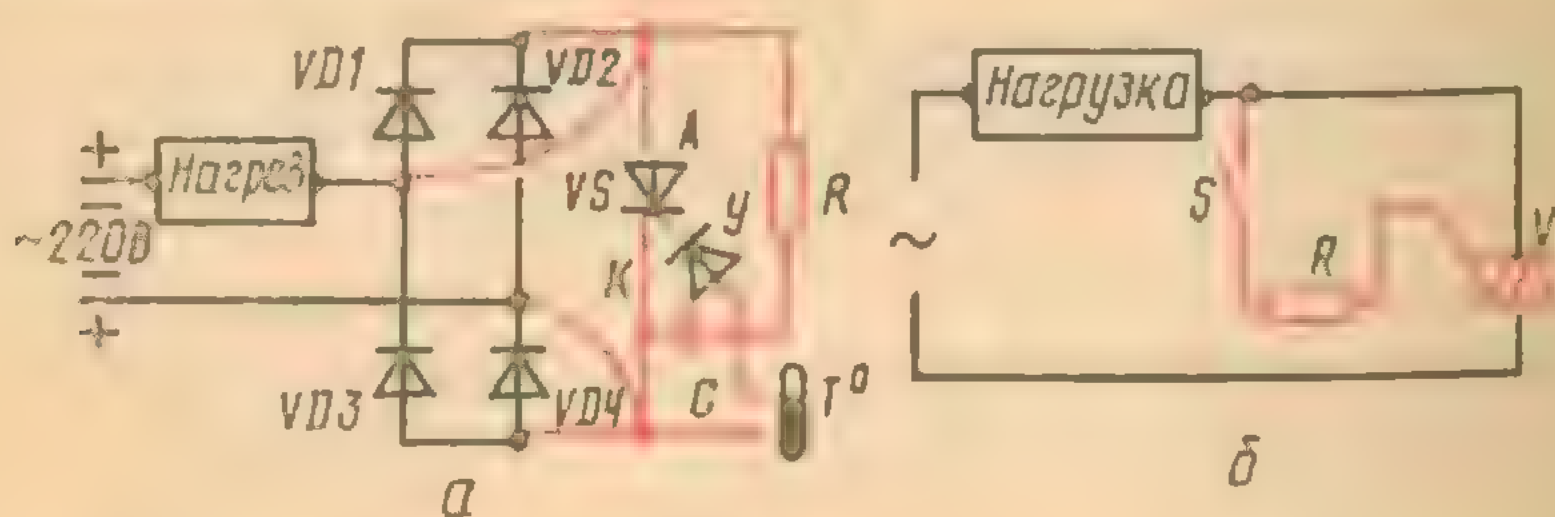


Рис. 21.11. Схемы автоматического управления нагревательными установками на тиристорах:

а — с однонаправленным тиристором; б — с двунаправленным тиристором (симистором); VS — тиристор; T° — контактный термометр; $VD1...VD4$ — выпрямительный мост на диодах; A, K, Y — анод, катод и управляющий электрод тиристора; V — симистор; S — ключ управления симистором.

Двухнаправленные тиристоры-симисторы, пропускающие обе полуволны тока (два его направления), применяются для регулирования напряжения и других целей. На рисунке 21.11,б показана схема на симисторе, работающая в режиме ключа, то есть на включение и выключение, от контактов датчика; по своим возможностям схема равнозначна приведенной на рисунке 21.11,а.

В схемах регулирования температуры применяются полупроводниковые терморегуляторы типов ПТР-2 (двухпозиционные), ПТР-3 (трехпозиционные), ПТР-II (пропорциональные) и др. Чувствительным элементом у них является полупроводниковый термистор (терморезистор) типа ММТ, который включают в одно из плеч измерительного моста. В другом плече при этом включено переменное сопротивление со шкалой в градусах температуры. В одной из диагоналей моста включен источник переменного тока, а в другой — один или два (у трехпозиционного) фазочувствительных усилителя, на выходе которых включено исполнительное электромагнитное реле.

Для двухпозиционного регулирования предназначены также dilatометрические регуляторы температуры серии ТУДЭ, принцип действия которых основан на использовании разности коэффициентов расширения двух металлов. Трубка чувствительного элемента выполнена из металла с большим коэффициентом расширения, а вставленный в нее стержень — из металла с меньшим коэффициентом. Со стержнем соединена контактная система. При повышении температуры стержень втягивается в трубку и вызывает изменение положения контактов (замыкает их или размыкает). Диапазоны температур: у ТУДЭ-1 от -30 до $+40^{\circ}\text{C}$, у ТУДЭ-2 от 0 до $+100^{\circ}\text{C}$, у ТУДЭ-3 от $+30$ до $+100^{\circ}\text{C}$ и т. д. Размыкаемый контактами ток 10 А при 220 В .

Для регулирования температуры в помещениях предназначены также датчики ДТКБ с биметаллическим чувствительным элементом, выполненным в виде спирали. Один конец ее закреплен в держателе, а другой соединен с подвижным контактом. Данные терморегуляторы выпускаются в 16 модификациях, которые перекрывают диапазон регулирования температур от -30 до $+35^{\circ}\text{C}$. Разрывной ток контактов $0,25\text{ А}$ при 220 В .

У манометрических двухпозиционных терморегуляторов серии ТР чувствительный элемент и сильфон заполнены термочувствительной жидкостью. При увеличении температуры давление жидкости внутри сильфона увеличивается, его свободный конец воздействует на контактную пару.

Для регулирования давления применяются датчики серий РД, РКС и другие.

Для получения регулируемых выдержек времени предназначено программное реле времени серии ВС-10. Оно приводится в действие от собственного синхронного электродвигателя: при помощи редуктора частота вращения двигателя снижается и с определенной угловой скоростью в зависимости от выбранного исполнения редуктор вращает валик с дисками (их 3 или 6).

Каждый диск имеет шкалу для установки выдержки времени и упор для замыкания или размыкания контактной пары.

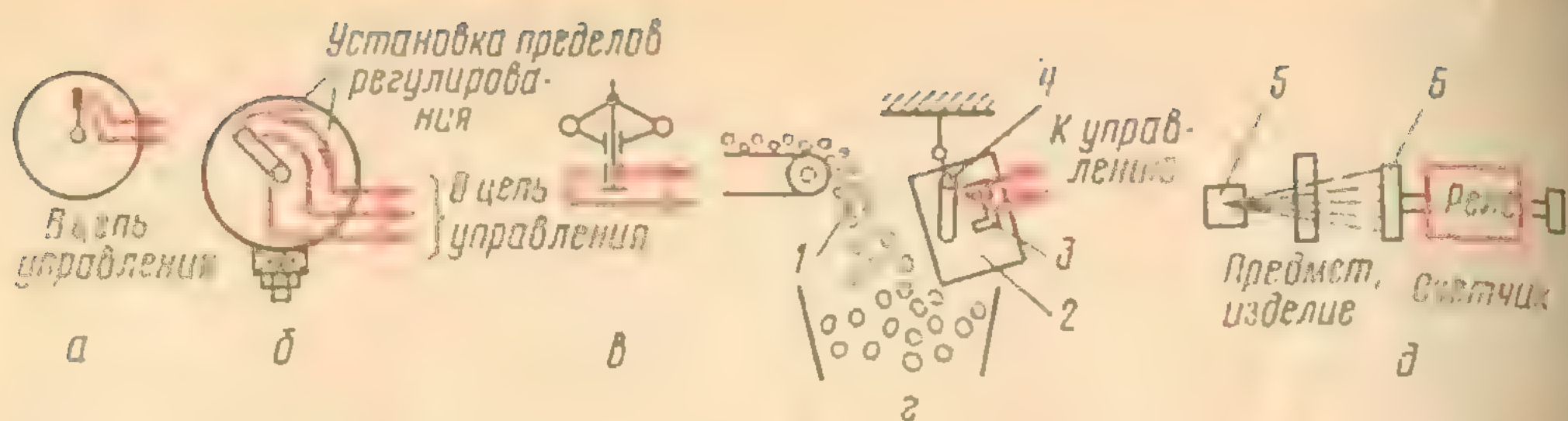


Рис. 21.12. Технологические датчики для схем управления:

а — контактные часы; б — контактный манометр; в — реле скорости; г — датчик сыпучих материалов; д — радиоактивный датчик; 1 — поток материала; 2 — поворотный кожух; 3 — электромагнит; 4 — неподвижный стальной сердечник; замыкающий магнитную цепь электромагнита 3 при отсутствии потока материала; 5 — источник ионизирующих излучений; 6 — счетчик ионизирующих излучений.

Для привода регулирующих устройств, устанавливаемых, например, на трубопроводах с водой или заслонках на воздушных каналах, применяются электрические исполнительные механизмы типа МЭО. В обозначении типа также указываются крутящий момент на выходном валу (от 40 до 100 Н·м), номинальное время полного хода в секундах, угол поворота в долях оборота. Так, у МЭО-10/25-0,25 крутящий момент 100 Н·м, за 25 с вал поворачивается на 0,25 оборота.

На рисунке 21.12 показаны схемы датчиков различных типов. В зависимости от характера технологического процесса этими датчиками могут быть контактные часы (а), электроконтактный манометр (б), центробежное реле скорости (в), датчик уровня сыпучих материалов (г), радиоактивный датчик (д) и др.

При автоматизации отдельных сельскохозяйственных процессов, например счета продукции, регулировки заполнения резервуаров сыпучими или жидкими материалами и т. д., известное применение получают радиоактивные изотопы. Радиоактивный датчик (рис. 21.12, д) работает следующим образом. От источника бета- или гамма-излучений 5 лучи попадают на ионизационный счетчик 6, включенный в схему реле. Если между источниками излучения и счетчиком радиоактивных частиц проходит какое-либо тело, которое задерживает лучи, то схема срабатывает и счетчик регистрирует предмет (например, схема счета продукции).

Контрольные вопросы и задания к главе 21. 1. В чем разница между принципиальной и монтажной электрическими схемами управления установкой? 2. Объясните по рисунку действие схемы пуска короткозамкнутого асинхронного электродвигателя с использованием пусковых сопротивлений. 3. Как работает схема авто-трансформаторного пуска? 4. Как работает схема управления электродвигателем с фазным ротором в функции времени? 5. Расскажите о действии схемы управления двигателем с фазным ротором в функции тока. 6. Как включаются двигатели в заданной последовательности (один за другим)? 7. Перечислите известные вам технологические датчики и поясните их использование на схеме включения насосного агрегата, тепловой установки.

22.1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Роль электрического освещения. Электрическое освещение в сельском хозяйстве — широко распространенный вид использования электроэнергии. Рациональное освещение повышает производительность труда, улучшает качество продукции и увеличивает безопасность работы обслуживающего персонала. Правильное освещение уменьшает зрительное и общее утомление работника, способствует поддержанию чистоты и порядка в помещениях. Электрическое освещение приобретает все большее значение не только как производственный фактор (например, для дополнительного освещения в теплицах, увеличения продолжительности светового дня в птичнике и т.п.), но и как мощный фактор улучшения культурно-бытовых условий жизни населения. Электрическое освещение наряду с ультрафиолетовым и инфракрасным облучением находит все более широкое применение в животноводстве, растениеводстве и других отраслях сельскохозяйственного производства.

Спектр излучения. Видимые излучения, как и инфракрасные, ультрафиолетовые и др., являются разновидностью энергии электромагнитных колебаний. В общем спектре электромагнитных колебаний на долю видимых и примыкающих к ним инфракрасных и ультрафиолетовых излучений приходится весьма малый участок с длиной волны от десятых долей миллиметра до 5 нм (1 нанометр = 10^{-9} м). Солнце щедро снабжает нашу планету излучениями этого диапазона, которые оказывают огромное влияние на жизнедеятельность растений и животных.

Электромагнитные колебания распространяются со скоростью $c = 300\,000$ км/с. Скорость видимых излучений c (см/с), частоту колебаний f и длину волны λ связывает между собой следующая формула:

$$c = f\lambda = 3 \cdot 10^{10}, \quad (22.1)$$

откуда

$$\lambda = c/f = 3 \cdot 10^{10}/f. \quad (22.2)$$

В таблице 22.1 приведена общая характеристика спектра излучений от инфракрасных до рентгеновских. Видимость излучений с длиной волны 550 нм, наилучшим образом воспринимаемых глазом человека, считают равной единице. Красные и фиолетовые излучения плохо воспринимаются зрением человека, а инфракрасные и ультрафиолетовые невидимы. Инфракрасные излучения обнаруживаются по тепловому действию, а ультрафиолетовые — по люминесценции (свечению) различных материалов, по воздействию на биологические объекты и т.д.

В светотехнике используют следующие основные понятия: световой поток, сила света, яркость, освещенность, светимость, а также ряд второстепенных.

Световой поток F представляет собой меру мощности светового излучения, то есть количественную оценку светового ощущения,

22.1. Спектр излучений от инфракрасных до рентгеновских

Общее название излучений	Название отдельных участков излучений	Длина волны, нм
Инфракрасные	Декамикронные	$(100...10) \cdot 10^3$
	Микронные	10 000...760
Видимые	Красные	760...620
	Оранжевые	620...590
	Желтые	590...560
	Зеленые	560...500
	Голубые	500...480
	Синие	480...450
	Фиолетовые	450...380
Ультрафиолетовые	УФЛ области А	380...320
	УФЛ области В	320...275
	УФЛ области С	275...10
Рентгеновские	Граничные, мягкие, жесткие	$10...10^{-6}$

которое испытывает глаз человека. За единицу светового потока принят люмен (лм). 1 люмен = 1/683 Вт при однородном излучении с длиной волны, равной 550 нм. При другой волне 1 люмен не будет равно велич мощности 1,683 Вт. Существует и другое определение: люмен — это поток, излучаемый абсолютно черным телом с площадью 0,5305 м² при температуре затвердевания платины (2042 К). Упрощенно абсолютно черным считается тело, которое испускает излучения равномерно и в одном направлении, все же приходящие излучения поглощает, то есть оно не обладает отражательной способностью.

Представление о значении люмена могут дать следующие примеры. Световой поток, падающий на 1 м² поверхности земли летом при ясном небе, достигает 100 000 лм; световой поток лампы накаливания 100 Вт напряжением 220 В составляет 1000 лм; световой поток лампы карманного фонаря равен ~6 лм.

Сила света I — пространственная плотность светового потока, то есть отношение светового потока F к значению телесного (пространственного) угла ω , в котором он равномерно распределяется:

$$I = F / \omega. \quad (22.3)$$

Единица силы видимых излучений — кандела* (кд): 1 кд = 1 лм / ср. Стерadian (ср) — это телесный угол, который имеет вершину в центре сферы и опирается на участок сферы с площадью, равной квадрату радиуса сферы.

Другое определение: кандела — это 1/60 силы света, испускаемого 1 см² абсолютно черного тела при температуре затвердевания платины.

Яркость B — поверхностная плотность силы света в заданном направлении, равная отношению силы света I к площади проекции светящейся поверхности на плоскость, перпендикулярную к тому же направлению:

* Кандела в переводе на русский язык — свеча.

$$B = \frac{I}{S \cos \alpha}, \quad (22.4)$$

где S — площадь светящейся поверхности, α — угол между светящейся поверхностью и заданным направлением.

Единица яркости — кандела на квадратный метр (кд/м²).

Освещенность E — поверхностная плотность светового потока, то есть отношение светового потока F к площади S_0 , на которую он равномерно падает:

$$E = F/S_0. \quad (22.5)$$

Единица освещенности — люкс (лк): 1 лк = 1 лм/м².

Светимость R — поверхностная плотность светового потока, испускаемого поверхностью, равная отношению светового потока F к площади светящейся поверхности S_n :

$$R = F/S_n. \quad (22.6)$$

Единица светимости — люмен на квадратный метр (лм/м²).

Яркость и светимость зависят от коэффициентов отражения освещаемых поверхностей. Освещенность не зависит от коэффициента отражения. Яркость связана с определенным направлением, а освещенность и светимость не связаны с направлением. Физическое представление о значениях величин могут дать следующие примеры: освещенность в хирургической операционной должна быть равна 3000 лк, при чтении книги — 50 лк; освещенность в летний полдень на широте Москвы 80...100 тыс. лк; светимость чистого снега в солнечный полдень достигает 80 000 лм/м²; светимость вольфрамовой нити лампы накаливания 100 Вт, 220 В, при $T = 2700\text{K}$ равна $17 \cdot 10^6$ лм/м².

Яркость солнца, находящегося в зените, составляет $150 \cdot 10^7$ кд/м², яркость белой бумаги при освещенности в 50 лк равна 0,05 кд/м².

Световая энергия представляет собой произведение светового потока на продолжительность его действия и измеряется в люмен-секундах (лм·с).

Световая отдача — это отношение светового потока источника света к мощности, потребляемой источником. Она измеряется в люменах на ватт (лм/Вт).

Световые свойства материалов. Световой поток, который падает на поверхность, в общем случае частично отражается, частично пропускается и частично поглощается. Если на поверхность падает световой поток F , то в зависимости от свойств материала поверхности этот поток разделяется на три составляющие: отраженный поток $F_r = \rho F$, пропущенный поток $F_t = \tau F$ и поглощенный поток $F_a = \alpha F$. В сумме

$$F = \rho F + \tau F + \alpha F. \quad (22.7)$$

Из формулы (22.7) следует, что сумма коэффициентов отражения ρ , пропускания τ и поглощения α равна единице:

$$\rho + \tau + \alpha = 1. \quad (22.8)$$

Проблема здесь в том, что если отражаясь от него, свет в той или иной форме рассеивается. При отсутствии рассеивания отражение или

пропускание называют направленным (зеркало, оконное стекло). Отражение или пропускание, при котором свет рассеивается настолько, что поверхность приобретает яркость, одинаковую по всем направлениям, называют диффузным. Диффузное отражение характерно для мела, гипса и др. Матовые поверхности дерева, бумаги, ткани близки к диффузным. Диффузно пропускает свет молочное стекло. Лучшей отражательной способностью обладает барий сернокислый (95% падающего на него потока), которым покрывают киноэкраны. Белила свинцовые отражают 90% падающего потока, зеркало — 35, снег — 80...100 грава — 7, кожа черная — 1,5%.

22.2. ЛАМПЫ НАКАЛИВАНИЯ

Устройство ламп. Лампы накаливания представляют собой источники света, работающие по принципу температурного излучения.

Лампы накаливания пока являются наиболее распространенными источниками света. На рисунке 22.1 приведены некоторые типы ламп накаливания. В качестве нити накала в современных лампах используют спираль из тугоплавкого металла — чаще всего из вольфрама. Нить накала может быть односпиральной и многоспиральной. Некоторые лампы наполняют нейтральным газом (азотом, аргоном, криптоном). Температура накала нити достигает 2600...3000 К. Спектр ламп накаливания отличается от спектра дневного света преобладанием желтых и красных лучей. Обычно диапазон излучения источника света весьма широк — от инфракрасных до ультрафиолетовых лучей.

Световым КПД источника света называют отношение мощности, которая превращается в видимые и воспринимаемые глазом лучи, к мощности, расходуемой на полный диапазон излучения. Световой КПД ламп накаливания не превышает 3...3,5%.

Маркировка ламп. Промышленность выпускает различные типы ламп, отличающиеся номинальными значениями мощности и напряжения, размерами, формой колб, материалом цоколей и т. д.

В обозначении ламп накаливания буквы означают: В — вакуумная, Г — газонаполненная, Б — биспиральная, БК — биспиральная криптоновая, ДБ — диффузная (с матовым отражательным слоем внутри колбы)

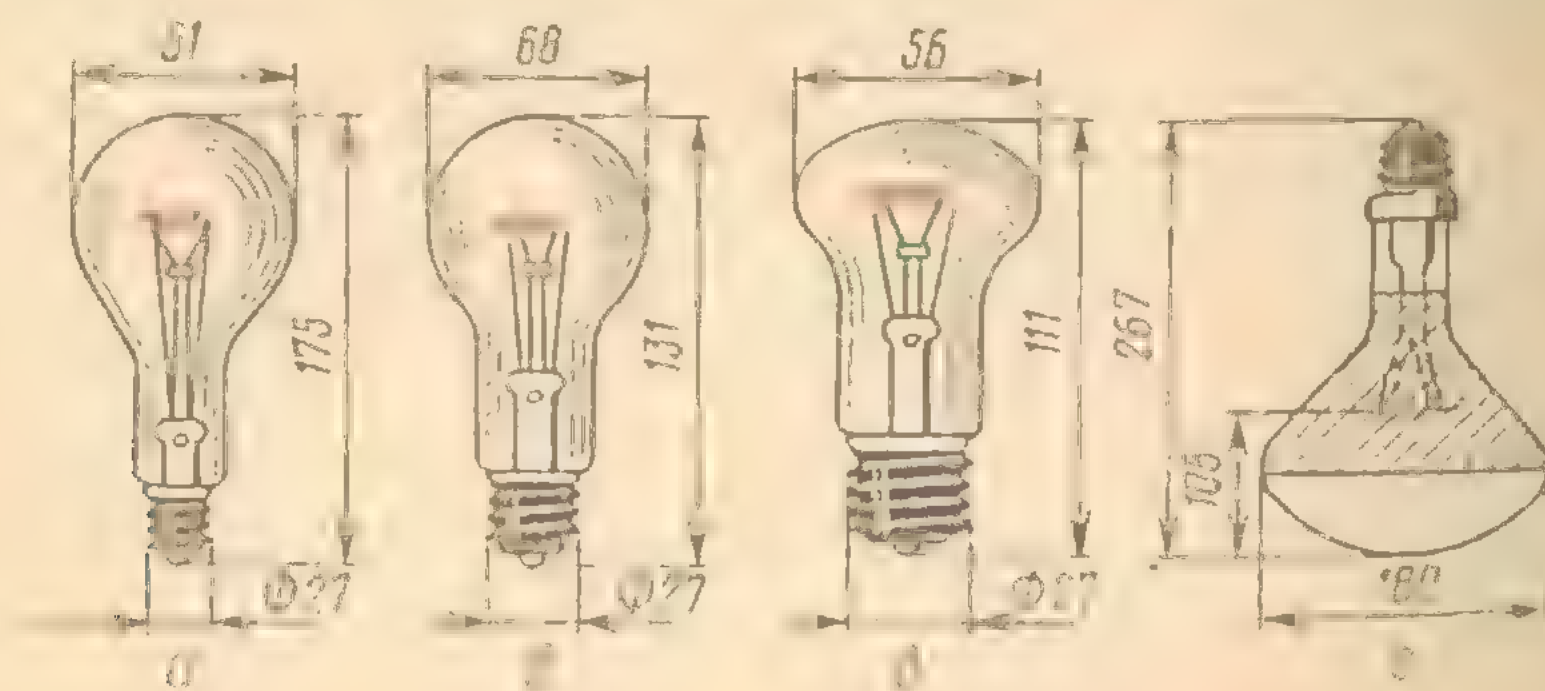


Рис. 22.1. Некоторые типы ламп накаливания:

а — газонаполненная; б — биспиральная; в — биспиральная криптоновая; г — зеркальная

МО — местного освещения, МОД — местного освещения диффузная, МОЗ — зеркальным слоем и т. д. Следующая за буквой цифра означает напряжение питания, а вторая — мощность лампы в ваттах.

Зеркальные лампы выпускаются концентрированного светораспределения (ЗК), среднего (ЗС), широкого (ЗШ), зеркальные из ниодимового стекла концентрированного или широкого светораспределения (ЗКШ, ЗШШ). Зеркальные лампы предназначены для освещения высоких помещений и открытых пространств, декоративного освещения. Ниодимовые лампы используются там, где необходимо высокое качество цветопередачи.

Декоративные специальные лампы (Д) могут излучать белые (БЛ), желтые (Ж), зеленые (З), красные (К), опаловые (О) лучи.

Лампы накаливания с зеркальным отражателем — термонизлучатели, например, НКЗК-127-500, расшифровываются так: инфракрасная зеркальная красная на 127 В, 500 Вт. Обозначение КГ расшифровывается следующим образом: лампа кварцевая галогенная.

Выпускается также целый ряд ламп специального назначения: железнодорожные (Ж), судовые (С), автомобильные (А), самолетные (СМ), для транспортных машин (ТМ), сигнальные (СГ), лампы-фары (ЛФ), кинопржекторные (КПЖ), миниатюрные (МН), сверхминиатюрные (СМН), рудничные (Р), портативные для швейных машин (ПШ), различного назначения (РН), медицинские синие (МДС) и др.

Основные параметры лампы накаливания: номинальное напряжение, номинальная мощность, которую лампа потребляет из сети, световой поток, световая отдача и средний срок службы. Ниже охарактеризованы некоторые из них.

Номинальное напряжение — это напряжение, на которое рассчитана лампа и при котором она потребляет из сети расчетную номинальную мощность.

Срок службы, или нормированная продолжительность горения лампы накаливания, — это расчетное время горения лампы накаливания при заданном напряжении до выхода ее из строя. Так как температура нити зависит от фактически подводимого напряжения, то с изменением напряжения резко меняются все характеристики лампы. Срок службы лампы накаливания существенно сокращается при использовании ее на напряжении, большем номинального. Снижение же напряжения приводит к резкому уменьшению светового потока. Нормированная продолжительность горения нормальной лампы накаливания равна 1000 ч.

Номинальная световая отдача — величина, которая характеризует экономичность лампы: она в значительной мере зависит от значения подводимого к лампе напряжения.

В таблице 22.2 приведены ориентировочные зависимости основных характеристик нормальных ламп накаливания от значения подводимого напряжения.

Световая отдача ламп одинаковой мощности, но выполненных на разные номинальные напряжения, изменяется в сторону увеличения для ламп с меньшим номинальным напряжением. Лампы на 127 В имеют световую отдачу примерно на 15% выше, чем лампы на 220 В такой же мощности. Это обусловлено тем, что у ламп накаливания

22.2. Зависимость основных характеристик нормальных ламп накаливания от коэффициента напряжения (в процентах от номинальных значений)

Напряжение	Ток	Мощность	Сопротивле- ние	Световой поток	Световая отдача	Срок службы
85	92	78	93	55	72	1000
90	95	85	95	70	82	500
94	97	91	97	81	89	260
98	99	97	99	93	96	130
100	100	100	100	100	100	100
102	101	103	101	107	104	75
106	103	107	102	122	111	40
110	106	110	103	137	117	30

одинаковой мощности нить накала имеет тем большую площадь поверхности излучения, чем меньше напряжение (нить накала толще при меньшем напряжении).

Энергетический баланс ламп накаливания приведен в таблице 22.3.

22.3. Примерный энергетический баланс ламп накаливания

Лампы накаливания	Распределение энергии, % (всего 100%)		
	видимые излучения	невидимые излучения	потери тепло- передачей и конвекцией
Вакуумные	7	86	7
Газонаполненные с аргоном	10	68	22
Биспиральные с аргоном	12	74	14
С криптоно-ксеноновым заполнением	13	76	11

Лампы накаливания с криптоновым заполнением имеют наибольший КПД, так как криптон лучше защищает нить накала от испарения вольфрама и позволяет увеличить температуру ее накала.

В таблице 22.4 приведены сравнительные технические характеристики различных ламп одинаковой мощности, но разного напряжения.

22.4. Лампы накаливания 127 220 В общего назначения (из ГОСТ 2239-79)

Тип лампы	Мощность, Вт	Световой поток, лм	Светоотдача, лм/Вт
В 125-135 / 215-225	15	135 / 105	9 / 7
В 125-135 / 215-225	25	260 / 220	10,4 / 8,8
Б 125-135 / 215-225	40	485 / 415	12,1 / 10,4
БК 125-135 / 215-225	40	520 / 460	13 / 11,5
Б 125-135 / 215-225	60	810 / 715	13,5 / 11,9
БК 125-135 / 215-225	60	875 / 790	14,6 / 13,2
Б 125-135 / 215-225	100	1560 / 1350	15,4 / 13,5
БК 125-135 / 215-225	100	1630 / 1450	16,3 / 14,5
Г 125-135 / 215-225	150	2280 / 2090	15,2 / 13,9
Г 125-135 / 215-225	200	3200 / 2920	16,0 / 14,6
Г 125-135 / 215-225	300	4900 / 4600	16,3 / 15,4
Г 125-135 / 215-225	500	8700 / 8300	17,4 / 16,6
Г 125-135 / 215-225	1000	19100 / 18600	19,1 / 18,6

Цоколи и патроны. Электрический контакт и механическая связь лампы с патроном осуществляются через цоколь. Обычно для ламп используют резьбовые и штырьковые или штифтовые цоколи. Последние не допускают самоотвинчивание при вибрациях. В зависимости от размеров лампы и те и другие могут иметь различные размеры.

В обозначении цоколя буквы означают: Р — резьбовой, Ш — штифтовой, СФ — софитный, Ц — цилиндрический. Далее следует цифра, показывающая диаметр цоколя в миллиметрах.

Металлические части цоколей выполняют из латуни или стали с антикоррозийным цинковым покрытием.

Патроны для электрических ламп накаливания подразделяются на две основные группы: резьбовые и штифтовые. Патроны резьбовые выполняют с резьбовыми гильзами Е-14, Е-27, Е-40, где цифра означает диаметр (мм). Их изготавливают из цветных металлов, стали, фарфора и пластических масс. По форме исполнения патроны подразделяют на патроны для навинчивания на ниппель, патроны с фланцем и патроны для подвеса.

В обозначении патрона для лампы накаливания может быть приведен ряд буквенных символов. Они означают: Н — патрон без резьбы в ниппеле, Н10...Н16 — патрон с ниппелем с резьбой М10...М16, У — патрон с ушком для подвешивания, Фн — настенный патрон с фланцем, Фп — потолочный патрон с фланцем, Р — патрон с прижимом для абажура, П — корпус патрона пластмассовый, К — корпус патрона из фарфора или других керамических материалов, М — корпус патрона металлический, А — корпус из氨基пласта, Пв или Кв — вкладыш патрона пластмассовый или керамический, В — патрон с выключателем.

Штифтовые патроны изготовляют с одним (1Ш) или двумя (2Ш) подвижными контактами, с внутренним диаметром корпуса 15 или 22 мм. Крепление — за резьбовую ниппельную шейку (н), за фланец (ф), за корпус (к).

Лампы с йодным циклом. В лампах накаливания при испарении вольфрама на внутренней поверхности колбы образуется темный налет, который снижает световой поток, а следовательно, и экономичность лампы. Налет вольфрама удаляют со стекла при помощи йода в так называемых галогенных лампах с йодным циклом. Йод с вольфрамом образует газообразное соединение, которое разлагается при температуре выше 1250°C . Йодид вольфрама со стенок переносится на спираль. Вблизи раскаленной спирали йодид разлагается на вольфрам, который осаждается на спираль, и свободный йод, который вновь принимает участие в цикле. В лампах применяется тугоплавкое кварцевое стекло. Чем меньше расстояние между спиралью и стенками колбы, тем эффективнее йодный цикл.

Лампы этого типа (КГ) предназначены для освещения высоких производственных помещений и открытых пространств. Их изготавливают на мощность 1; 1,5; 2 и 5 кВт, на 220 В. Светоотдача — 22 лм/Вт, средний срок службы 2000 ч. Лампы могут

работать на напряжении до 380 В, но при этом срок службы резко снижается. Их можно использовать и для целей инфракрасного обогрева.

22.3. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЕ ЛАМПЫ

Принцип действия. Электрическая энергия может превращаться в световую непосредственно, независимо от теплового состояния вещества, излучающего свет, за счет люминесценции. Существует большое число газосветных ламп, работающих на основе электролюминесценции — свечения газа в трубке лампы под действием электрического тока.

Принцип действия этих ламп в упрощенном представлении сводится к следующему. Если к электродам, вваренным в концы стеклянной трубки, которая заполнена инертным газом или парами металла, приложить напряжение из расчета не менее 500...2000 В на 1 м длины трубки, то свободные электроны начинают летать в сторону электрода с положительным знаком. Когда к электродам приложено переменное напряжение, направление их движения изменяется с частотой тока. В своем движении электроны встречаются с нейтральными атомами газа — заполнителя трубки и ионизируют их, выбивая электрон с верхней орбиты атома в пространство или с нижней орбиты на верхнюю. Возбужденные таким образом атомы, вновь сталкиваясь с электронами, снова превращаются в нейтральные атомы. Это обратное превращение сопровождается излучением. Каждому инертному газу и парам металла соответствует своя длина волны излучения. Так, трубки с гелием светятся светло-желтым или бледно-розовым светом, с неоном — красным светом, с аргоном — голубым и т. д. Смешивая инертные газы или нанося люминофоры на поверхность разрядной трубки, получают различные оттенки свечения.

Трубки (лампы), заполненные парами натрия, дают желтый свет, а трубки с парами ртути — фиолетовое и ультрафиолетовое излучение. Излучение, возникающее в парах ртути, используется в люминесцентных лампах дневного и белого света, а также в источниках ультрафиолетовых лучей (лампы типа ДРТ, ДБ, ЛЭ и др.).

Люминесцентные лампы дневного и белого света выполняют в виде прямой или дугообразной трубки из обычного стекла, не пропускающего коротковолновые ультрафиолетовые лучи. Electroды изготавливают из вольфрамовой проволоки. Трубка заполнена смесью аргона и паров ртути. Внутри трубка покрыта люминофором — специальным составом, который светится под воздействием ультрафиолетовых лучей, возникающих при электрическом разряде в парах ртути. Аргон способствует надежному горению разряда в трубке.

Для быстрого зажигания разряда электроды предварительно разогревают, а затем к ним подают напряжение: возникает разряд.

По существу в трубке лампы происходит электролюминесценция аргона и паров ртути и фосфоресценция люминофора.

В состав люминофоров входят вольфрамат кальция, силикат цинка, кадмий-борат и другие вещества. В зависимости от процентного содержания того или иного вещества получается различная цветность излучения. Лампы дневного и белого света рассчитаны соответственно на цветность излучения, подобную той, какая бывает при безоблачном небе или на прямом солнечном свету.

Обозначение. В обозначении типа ламп буквы расшифровываются следующим образом: ЛД — люминесцентная дневного света (цветовая температура 6500 К); ЛБ — белого света (цветовая температура 3500 К); ЛТБС — тепло-белого света (2700 К); ЛХБ — холодно-белого света (4850 К). Цифры после букв означают мощность лампы. U- и W-образные лампы имеют в обозначении соответствующую букву, например, ЛБУ40, ЛБЦW30 и др. Кольцевые имеют в обозначении букву К (ЛБК40) и т. д.

Кольцевые люминесцентные лампы ЛЕЦК и ЛТБЦЦК мощностью 22, 32, 40 и 60 Вт имеют естественную (Е) или тепло-белую (ТБ) цветность, улучшенную (Ц) или очень хорошую (ЦЦ) цветопередачу.

В таблице 22.5 приведены некоторые технические характеристики люминесцентных ламп типов ЛД и ЛБ. Из сравнения данных таблиц 22.4 и 22.5 следует, что лампа накаливания 60 Вт, 127 В имеет световой поток 810 лм, а лампа ЛБ-20, 20 Вт — световой поток 1200 лм. Световой поток лампы накаливания 150 Вт, 220 В — 2090 лм, а световой поток лампы ЛБ-40, 220 В — 3200 лм. Таким образом, на образование светового потока такого же, как

22.5. Технические данные некоторых люминесцентных ламп (из ГОСТ 6825-74)

Тип лампы	Напряжение на лампе, В	Расчетный световой поток, лм	Светоотдача, лм / Вт	Длина лампы со штырьками, мм
ЛД-15	54	700	46,7	451
ЛД-18	54	820	54,7	
ЛД-30	57	1000	50	
ЛБ-20	57	1200	60	604
ЛД-40	104	1800	60	
ЛБ-30	104	2180	72,7	908
ЛХБ-20	104	1940	61,7	
ЛТБС-40	103	2200	55	
ЛД-60	103	2500	62,5	
ЛХБ-40	103	3000	75	1213
ЛБ-40	103	3200	80	
ЛД-80	110	4000	61,5	
ЛБ-60	110	4800	73,3	1514
ЛХБ-60	110	4400	67,7	
ЛТБС-80	102	3800	47	
ЛД-80	102	4300	51,7	1514
ЛХБ-80	102	5040	63	
ЛТБС-100	102	5400	67,5	

и от лампы накаливания, люминесцентная лампа требует в 3-5 раз меньше мощности. В этом основное преимущество люминесцентных ламп. Другие их преимущества — более благоприятный спектр излучения, невысокая температура поверхности трубки, большой срок службы (более 5000 ч вместо 1000 ч у лампы накаливания). Недостатки этих ламп — необходимость в приборах для зажигания и ограничения тока, большие габаритные размеры, чувствительность к температуре окружающей среды — не могут, однако, идти в сравнение с очевидными преимуществами.

Для работы в условиях повышенной запыленности выпускают рефлекторные лампы типа ЛБР-40. Рефлекторный слой или диффузное отражающее покрытие, состоящее из порошка с высоким коэффициентом отражения, наносят на две трети окружности внутренней поверхности трубки. Затем всю внутреннюю поверхность трубки покрывают слоем люминофора. Благодаря рефлекторному слою через «выходное окно» (не покрытую рефлекторным слоем часть трубки) проходит световой поток, на 70...80% больший, чем через такую же часть трубки в обычной лампе.

Световой поток люминесцентных ламп колеблется в значительных пределах в зависимости от напряжения в сети и окружающей температуры. Оптимальная окружающая температура для них равна от 18 до 25°C. При температуре ниже +10°C зажигание ламп не гарантируется. К концу срока службы световой поток по нормам не должен быть ниже 54% начального значения.

Схемы включения. Существует большое число схем включения люминесцентных ламп. На рисунке 22.2 приведены три схемы: одной лампы со стартерным зажиганием (а), быстрого зажигания одной лампы мощностью 80 Вт (б) и быстрого зажигания двух ламп мощностью 2×80 Вт при помощи пускорегулирующей аппаратуры 2АБИ-80 (в).

Конденсатор $C1$ служит для снижения радиопомех, возникающих при зажигании лампы в стартере (искрение), а конденсатор $C2$ — для повышения коэффициента мощности схемы.

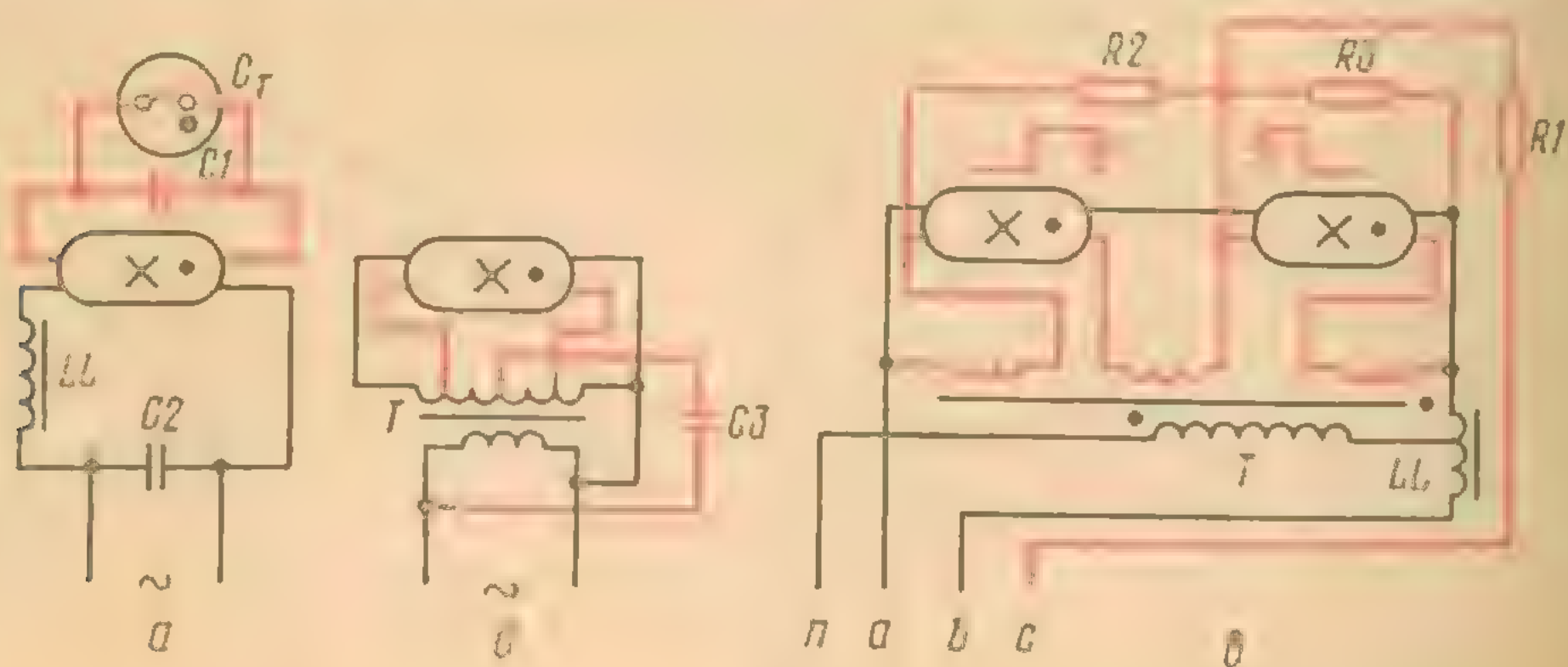


Рис. 22.2. Схемы включения люминесцентных ламп:

а — со стартером; б — быстрого зажигания одной лампы; в — быстрого зажигания двух ламп; Ст — стартер; LL — дроссель; $C1$, $C2$, $C3$ — конденсаторы; Т — трансформатор; $R1$, $R2$, $R3$ — резисторы.

Балластные устройства люминесцентных ламп рассчитаны на использование в производственных, административно-общественных и бытовых помещениях при температуре от 10 до 35°С и относительной влажности не более 75%. Промышленность выпускает балластные устройства нескольких типов: УБИ — устройства балластные индуктивные, УБК — то же, компенсированные, с повышенным коэффициентом мощности (близок к 1); УБЕ — то же, емкостные. В обозначение устройств между током и напряжением введены буквы. По конструктивному исполнению балластные устройства разделяют на встроенные (открытые) — для использования только в светильниках или в специальных кожухах (В) и независимые (закрытые) — в основном для установки отдельно от светильника (Н). Различают также устройства с нормальным уровнем шума и радиопомех (для промышленных помещений) и с пониженным (П) уровнем шума и радиопомех (для административных, служебных и бытовых помещений).

Для включения ламп мощностью 80 Вт используют трансформаторы типа БЛ-80. Стартер в этой схеме отсутствует. Электроды разогреваются током от накальных обмоток трансформатора (на каждый электрод включено по несколько витков). Зажигается лампа благодаря повышенному напряжению, возникающему на обмотке трансформатора в момент, когда нагрузка на нем отсутствует (лампа не зажжена). При зажигании лампы нагрузка на трансформатор увеличивается и напряжение между электродами лампы снижается до расчетного значения.

Стартеры, или зажигатели, представляют собой неоновые лампы тлеющего разряда, в которых один из электродов — биметаллический — автоматически замыкает и размыкает цепь электродов лампы. При включении схемы в сеть между электродами стартера возникает тлеющий разряд, который нагревает электроды. Биметаллический электрод изгибается и замыкает цепь. Электроды люминесцентной лампы при этом нагреваются до 800°С, и вокруг них образуются облака электронов в результате термоэлектронной эмиссии. В стартере, после того как электроды его замкнулись и тлеющий разряд прекратился, электроды остывают и размыкаются. Напряжение сети вместе с импульсом ЭДС, наведенной дросселем в момент размыкания цепи стартером, вызывает электрический разряд в трубке. Процесс зажигания лампы от момента ее включения длится 1...2 с.

Дроссель служит для ограничения тока через лампу. Если бы он отсутствовал, то ток лампы возрос бы практически мгновенно до большого значения, и электроды лампы перегорели бы. Дроссели изготавливают в открытом и закрытом исполнении. В последнем случае их помещают в металлический кожух и заливают изоляционной массой. Лампе каждого типа и определенной мощности предназначен свой дроссель.

Для монтажа прямых ламп и пускателей в осветительной арматуре выпускаются специальные патроны — стоечные, круглые

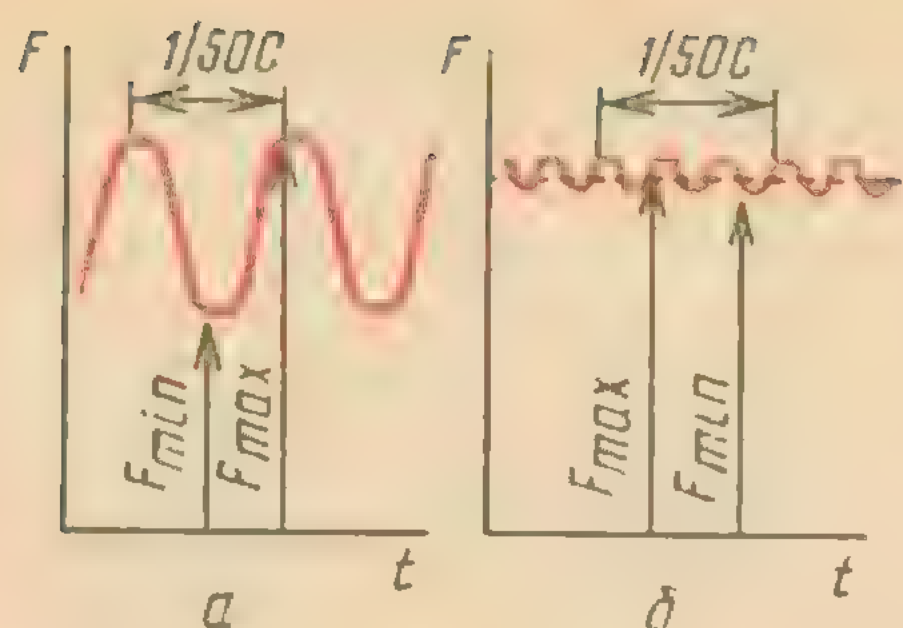


Рис. 22.3. Световой поток одной лампы (а) и трех ламп (б), включенных в три фазы. $F_{\max}$ — максимальное мгновенное значение светового потока; $F_{\min}$ — минимальное мгновенное значение светового потока.

без компенсации длины, круглые с компенсацией длины, для стартеров, для U-образных ламп.

Стробоскопический эффект. Поскольку люминесцентные лампы отличается большая глубина пульсации светового потока (рис. 22.3, а), при освещении движущихся предметов возникает стробоскопический эффект — зрительное впечатление множественности движущегося предмета и ложное представление неподвижности движущегося предмета, которое приводит к искажению впечатления от освещенного объекта, а также вызывает быструю усталость глаз. Чтобы избежать появления стробоскопического эффекта, люминесцентные лампы включают на различные фазы сети. На рисунке 22.3, б показан световой поток от трех ламп, включенных на три фазы сети. С этой же целью (исключить стробоскопический эффект и в то же время повысить коэффициент мощности) применяют различные схемы включения двух или трех ламп в однофазную сеть.

Люминесцентные лампы постоянно совершенствуются. В ряде стран появились компактные лампы с многократно изогнутыми люминесцентными трубками. Такие лампы могут быть помещены в стеклянную светорассеивающую оболочку. Для ламп разработаны миниатюрные электронные пускорегулирующие аппараты. В лампы, которые предназначены для использования в жилых помещениях, вместо ртути вводится амальгама ртути, чтобы избежать возможности заражения парами ртути помещения при разрушении лампы.

22.4. ГАЗОРАЗРЯДНЫЕ ЛАМПЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

К этим лампам относятся дуговые ртутные лампы типа ДРЛ, натриевые лампы высокого давления ДНаТ, металлогалогенные йодидные лампы ДРИ, ксеноновые дуговые ДКсТ и др.

Лампы ДРЛ предназначены главным образом для освещения улиц и объектов, где не требуется высокое качество цветопередачи. Устроена эта лампа следующим образом.

Прямая ртутно-кварцевая горелка (трубка), находящаяся внутри баллона лампы, заполнена аргоном под давлением, в который добавлена дозированная капелька ртути. Горелка создает интенсивное ультрафиолетовое невидимое и голубовато-зеленое видимое излучение. Ультрафиолетовое излучение поглощается люминофором, которым покрыта внутренняя стенка баллона лампы, и превращается в видимый свет, преимущественно в красной части спектра.

Цвет суммарного излучения близок к белому. Доля красного излучения 5...8%.

Натриевые лампы высокого давления предназначены в первую очередь для освещения улиц и объектов, где не требуется высокое качество цветопередачи.

Устроена натриевая лампа так же, как и лампа ДРЛ, но внешняя колба, выполненная из тугоплавкого стекла, более продолговатая и не покрывается люминофором изнутри. Внутренняя же газоразрядная трубка выполнена из светопропускающей (внешне матовой) поликристаллической окиси алюминия. В нее введены амальгама натрия и инертный газ при давлении в несколько десятков паскалей. При разряде — горении давление повышается до (2...5) 10^4 Па.

В натриевых лампах высокого давления типа ДНаТ нет ультрафиолетового излучения, характерного для разряда паров ртути. Они излучают преимущественно в желтой, оранжевой и красной зонах видимого спектра. Срок службы лучших образцов мощностью от 150 до 1000 Вт достигает 24 тыс. ч. Характеристики этих ламп постоянно улучшаются, светоотдача уже увеличена до 140 лм/Вт. Натриевые лампы мощностью 70, 100, 150, 400 Вт выпускаются в ряде стран в колбах, покрытых окисью алюминия, что уменьшает яркость лампы и позволяет использовать ее для внутреннего освещения и размещать на более низкой высоте.

Выпускаются также трубчатые натриевые лампы низкого давления, которые имеют светоотдачу от 130 до 183 лм/Вт, но основной световой поток у них приходится на участок желтых лучей с длиной волны 589...589,6 нм. В основном эти лампы применяются для освещения дорог, мостов, туннелей, железнодорожных пересечений, подземных переходов, автопарков.

Металлогалогенные лампы по принципу действия и конструкции подобны ртутным. Отличие их в том, что в разряде, кроме паров ртути, присутствуют галогениды различных металлов. Используя добавки йодидов различных металлов к ртути, можно получить металлогалогенные газоразрядные лампы высокого давления (ДРИ). Они выпускаются мощностью 250, 400, 700, 1000 и 2000 Вт. Их светоотдача составляет 80...95 лм/Вт. Они перспективны, как и натриевые лампы высокого давления, для щелевых световодов.

На базе ДРИ созданы лампы для облучения растений ДРФ1000 и ДРФ400. Эти лампы совершенствуются в направлении увеличения световой отдачи, улучшения цветопередачи, повышения полезного срока службы, облегчения зажигания. По мере совершенствования и увеличения выпуска лампы ДРИ будут заменять лампы накаливания и ДРЛ в общем и уличном освещении.

Дуговые ксеноновые трубчатые лампы ДКсТ выпускаются мощностью 5, 10, 20 и 50 кВт. Это самые мощные источники света. Их светоотдача составляет от 20 лм/Вт (у ламп 5...10 кВт) до 50 лм/Вт (у ламп 50 кВт). Они предназначены для освещения открытых пространств, и устанавливают их на высоких мачтах.

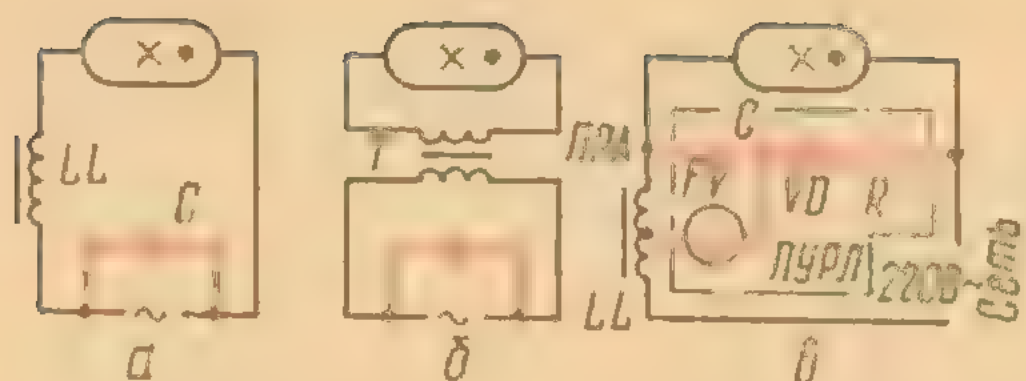


Рис. 22.4. Схемы включения четырехэлектродной лампы типа ДРЛ (а и б) и двухэлектродной лампы типа ДНаТ и ДРИ (в). LL — дроссель; T — трансформатор с большим рассеянием магнитного потока; $ПРА$ — пускорегулирующий аппарат; $ПУРЛ$ — поджигающее устройство; FV — разрядник.

Срок службы их около 3000 ч. Эти лампы обладают сплошным спектром, близким к спектру солнечного света. Лампы имеют сложную схему зажигания, но не нуждаются в балластном сопротивлении. Это объясняется особым свойством электрической дуги в ксеноне: ее сопротивление стабилизируется, в результате чего ток лампы ограничивается собственным сопротивлением дугового разряда.

Схемы включения ламп ДРЛ, ДНаТ и ДРИ приведены на рисунке 22.4. В ртутно-кварцевой горелке лампы ДРЛ имеется четыре электрода, которые способствуют зажиганию лампы при сетевом напряжении. Для зажигания ламп ДНаТ и ДРИ необходимо подать импульс высокого напряжения. При включении этих ламп происходит заряд конденсатора C через резистор R и выпрямитель VD . Когда напряжение на конденсаторе C достигает определенного значения, разрядник FV (неоновая лампа) зажигается. Конденсатор моментально разряжается на часть витков автотрансформатора. Возникает (трансформируется) импульс высокого напряжения, который вызывает разряд в ртутной лампе высокого давления. Процесс полного разгорания лампы длится 5...7 мин.

Пускорегулирующая аппаратура для четырехэлектродных ламп ДРЛ представляет собой обычные дроссели на магнитопроводе сборного стержневого типа с симметрированной обмоткой, рассчитанной на включение в сеть при 220, 230 и 240 В (отпайки).

22.5. АРМАТУРА ДЛЯ ЛАМП. ПРОЖЕКТОРЫ

Маркировка арматуры. Источник света и арматура образуют светильник. Арматура перераспределяет световой поток в нужном направлении, защищает источник света от пыли, влаги и пр.

По распределению светового потока между верхней и нижней полусферами различают светильники: а) прямого света, когда в нижнюю полусферу излучается не менее 90% всего потока; б) преимущественно прямого света (от 60 до 90%); в) рассеянного света, когда в каждой из полусфер излучается не более 60% светового потока; г) преимущественно отраженного света, когда в верхнюю полусферу излучается от 60 до 90% всего светового потока; д) отраженного света (более 90%).

По исполнению различают светильники: открытые, когда лампа не отделена от внешней среды; закрытые — лампа и патрон отделены от внешней среды оболочкой без уплотнений, влагозащищенные — корпус и патрон противостоят воздействию влаги, а конструкция обеспечивает надежную изоляцию вводных концов др.

друга и от металлических частей светильника; пыленепроницаемые; взрывозащищенные.

Для светильников также принята международная классификация по защите от воздействия пыли и воды IP (см. гл. 12). В технической литературе встречается и другая классификация этой защиты (см. табл. 22.6) — двузначное число, у которого первая цифра обозначает степень защиты светильника от пыли, а вторая — от воды. Открытые светильники по защите от пыли обозначаются цифрой 2, а перекрытые — 2', полностью пылезащищенные — 5, частично защищенные — 5', полностью пыленепроницаемые — 6, частично пыленепроницаемые — 6'. Степень защиты от воды: 0 — незащищенные, 2 — каплезащищенные, 3 — дождезащищенные, 4 — брызгозащищенные, 5 — струезащищенные.

Для маркировки светильников, как правило, используется единая система. Первая буква обозначения указывает используемый в светильнике источник света: Н — лампы накаливания общего применения, Р — ртутные лампы типа ДРЛ, Л — люминесцентные трубчатые, И — кварцевые галогенные, Г — ртутные типа ДРИ, Ж — натриевые лампы, К — ксеноновые. Вторая буква в шифре — способ установки светильника: С — подвесные, П — потолочные, Б — настенные, В — встраиваемые и т. д. Третья буква — назначение светильника: П — для промышленных предприятий, О — для общественных зданий, У — для наружного освещения улиц, Р — рудничный, Б — бытовой. Следующее далее двузначное число обозначает номер серии, а числа далее — число ламп в светильнике, мощность ламп в ваттах, номер модификации. Буква У в конце шифра или цифра 0 — для районов с умеренным климатом, Т или 4 — тропического исполнения и т. д. Некоторым светильникам присваиваются собственные имена («Астра» и др.), но они имеют и свой шифр.

Многие современные светильники рассчитаны на присоединение сетевых проводников как с медными, так и с алюминиевыми жилами с площадью поперечного сечения до 4 мм², которые присоединяются или к вводному устройству, или к зажимам на корпусе светильника.

В таблице 22.6 приведен перечень светильников, рекомендуемых для использования в производственных сельскохозяйственных помещениях и для освещения открытых пространств.

В общественных зданиях могут использоваться следующие светильники: с лампами накаливания — потолочные НПО, ПЛ, ПУ, подвесные ПО (шар), СК-300 и др., настенные НСП, НБО, БУН, с люминесцентными лампами Л2010, ЛП001, ЛП002, ЛП003, УСП, ЛСО и др.

Для местного освещения применяются светильники с люминесцентными лампами МЛ-2×40, МЛ-2×80, ЛНП01-2×20, ЛНП01-2×30 или с лампами накаливания типа НКС01×100 в различных модификациях, отличающихся главным образом длиной стойки (от 250 до 750 мм).

Прожекторы. Для освещения складов, заводских территорий, фасадов зданий и других целей используют прожекторы. Прожекторы

22.6. Светильники, рекомендуемые для применения в сельском хозяйстве

Характеристика производственных помещений	Минимальная степень защиты ¹	Тип светильника		
		с лампами накаливания	с люминесцентными лампами	с лампами ДРЛ
Сухие и влажные ²	Непыльные IP20, пыльные IP50	НСП01, НСО02, Гс-500М, С-200М, У-15 и др.	ЛД4, ЛСП01, ЛСП02, ЛОУ1П и др.	РСП01, РСП05, (ГРМ) РСП07, РСП08, СЗЗДРЛ и др.
Сырые, особо сырые с химически активной средой ³	IP43, IP53	НСП01, ПСХ-60 НСП03, ППД, ППР, ПНП, ГсУ, СУ и др.	ЛСП09, ПВЛП, ПВЛМ, УЛОСХ и др.	УНДДРЛ, УПСДРЛ и др.
Взрывоопасные	Специального исполнения	Н4ЕН-150, ВЗГ-200АМ, ВЗГ-100М, ВЗГ-60	НОГЛ-1×80 и 2×80, НОДЛ-1×40 и 2×40	—
На открытом воздухе	IP23, IP33	СПО-200, НКУ01-200, СВ-300/500	СКЗЛ-3, СПЗЛ-3	СППР-125, СКЗР-250, СКЗПР-400 и др.

¹ Относится не только к светильнику, но и ко всем элементам осветительных сетей (шнотам, соединительным коробкам и др.)

² В сухих, влажных, сырых и жарких помещениях допускается любое исполнение светильников. Но в сырых помещениях корпус патрона должен быть из прочных, влагостойких материалов. А в жарких все части светильника должны быть из материала необходимой термостойкости.

³ При выборе светильников для разных химически активных сред необходимо учитывать, что алюминий неустойчив к щелочам, тальк — к кислотам, пластмасса, стеклопластик, фарфор устойчивы к большинству химических сред и т. д.

⁴ Светильники типа модификации ЛДР, ЛДО, ЛДОР соответственно с решеткой, с отверстиями в отражателе без решетки, с отверстиями в отражателе с решеткой.

и ющего света типа ПЗС делают с металлическими (хромированными) или со стеклянными отражателями параболической формы. В качестве источников света применяют специальные прожекторные лампы. В прожекторах типа ПЗС-24 с диаметром стекла 24 см устанавливают лампы мощностью 150...200 Вт, в прожекторах ПЗС-35 с диаметром стекла 35 см — лампы 300...500 Вт, а в прожекторах ПЗС-45 — лампы 1000 Вт. Прожекторы ПСМ-40 и ПСМ-50 с лампами 500 и 1000 Вт также предназначены для освещения открытых пространств, архитектурного и иллюминационного освещения.

В специальных случаях применяют разные типы фасадных прожекторов серии ПФС.

Как правило, прожекторы размещают на мачтах или высоких зданиях сосредоточенными группами. Наименьшая высота мачт (за исключением случаев освещения стадионов) определяется из условия

$$\frac{\text{Осевая сила света прожектора}}{\text{Квадрат высоты установки}} \leq 300.$$

В соответствии с приведенным равенством наименьшие высоты для ПЗС-35, 500 Вт, 220 В — 17 м, для ПЗС-35, 500 Вт, 127 В — 20 м, для ПЗС-45, 1000 Вт, 220 В — 22 м, для ПЗС-45, 1000 Вт, 127 В — 30 м.

Высоту установки прожекторов для освещения стадионов определяют из такого расчета, чтобы перпендикуляр, опущенный из площадки мачты на продольную ось поля, образовывал с горизонтальной плоскостью угол не менее 27°.

Прожекторы типа ПКН с лампами типа КИ мощностью 1000 и 1500 Вт рекомендуются к применению для освещения строительных площадок, котлованов, стадионов и других открытых пространств.

Щелевые световоды. Разрабатывается новый вид осветительного устройства для животноводческих и других помещений с использованием щелевых световодов. Для освещения предлагается применять мощные источники света, световой поток которых при помощи неподвижных оптических устройств вводится в торец щелевого световода, выполненного из легкой алюминированной жести или другого материала в виде цилиндра, длина которого равна длине освещаемого помещения. Книзу цилиндр имеет широкую продольную щель, через которую свет равномерно распределяется вдоль помещения.

Системы со щелевыми световодами по сравнению с обычными многоламповыми системами обеспечивают более равномерное освещение. Световод можно поворачивать вокруг оси, а также использовать для вентиляции.

22.6. ВЫБОР СВЕТИЛЬНИКОВ И ИХ РАЗМЕЩЕНИЕ

Выбор источника света. Для общего освещения помещений нужно применять преимущественно газоразрядные лампы, и в первую очередь для общего освещения в помещениях с повышенными требованиями к светопередаче: административно-канцелярских и лабораторных, предназначенных для работы или занятий подростков или слабовидящих, для общего освещения или с недостаточным естественным освещением.

помещения, предназначенных для постоянного пребывания людей. Во указанных случаях заменять газоразрядные лампы лампами накаливания допускается в исключительных случаях, лишь при технической возможности использования первых.

Лампы накаливания для общего освещения следует применять преимущественно в складах, на площадках для обслуживания крупного оборудования, на технологических площадках, переходах, во вспомогательных и вспомогательно-бытовых помещениях и т. д. в соответствии со строительными нормами и проектами.

Галогенные лампы накаливания рекомендуется применять, когда единичная мощность источника света более 1000 Вт, а также в помещениях, где нельзя применить люминесцентные лампы, но требуется различать предметы по цветопередаче.

Для местного освещения могут быть использованы как лампы накаливания, так и люминесцентные лампы, а для аварийного освещения — предпочтительнее лампы накаливания.

Размещение светильников. Светильники необходимо располагать так, чтобы их было удобно обслуживать, создавалась нормированная экономная освещенность, соблюдались требования к качеству освещения (равномерность освещения, нужное направление света, ограничение теней, пульсаций, блескости и т. д.).

На рисунке 22.5 приведены схемы конструктивного исполнения наиболее распространенных светильников с лампами накаливания и люминесцентными лампами.

На рисунке 22.6 показаны основные схемы, определяющие расположение светильников в помещении. Высота подвеса h_n зависит от условий помещения, высоты помещения H , конструкции светильника, мощности ламп и защитного угла светильника.

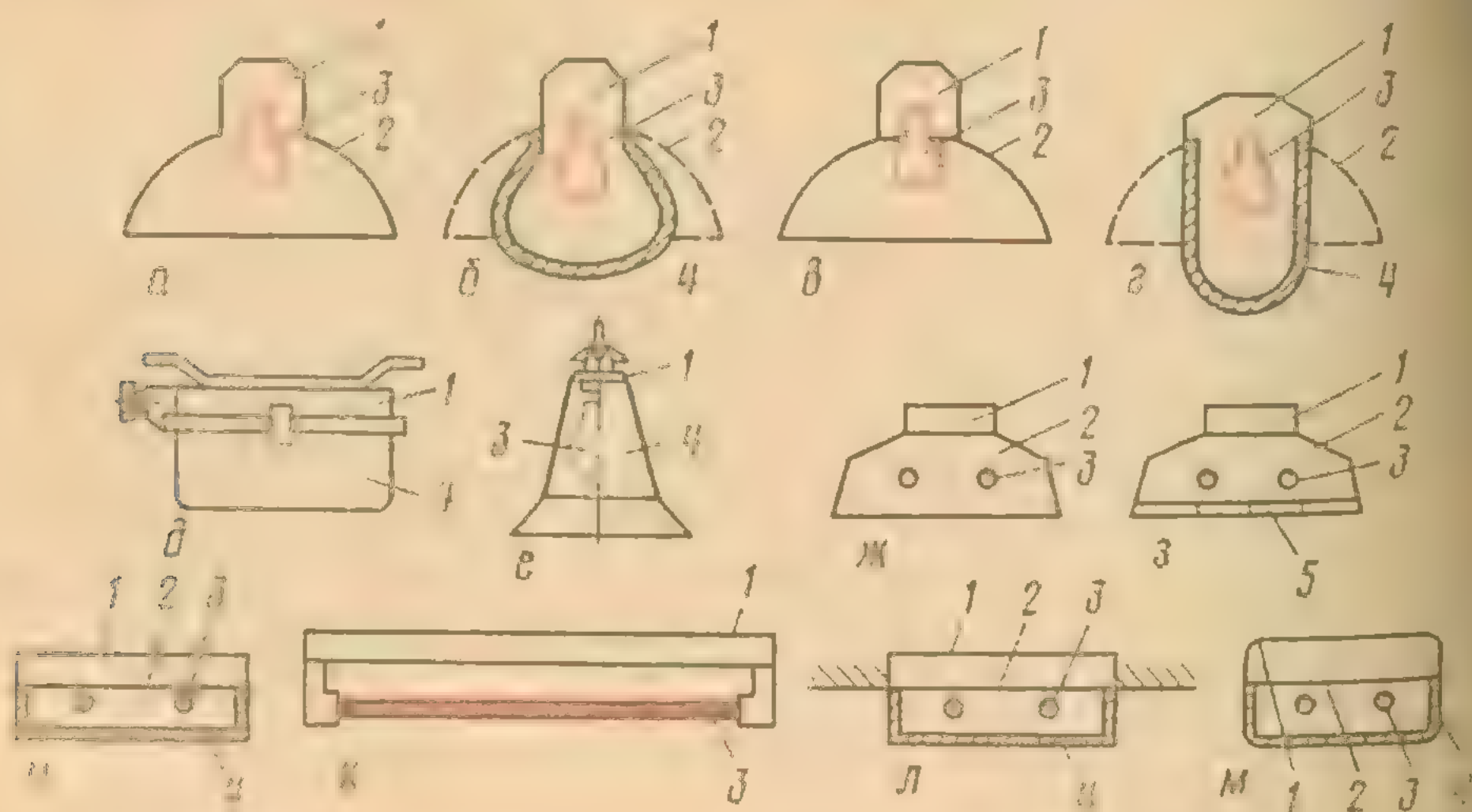


Рис. 22.5. Конструктивные схемы светильников с лампами накаливания и лампами ДРЛ (а — серий ГсР, СДДРЛ; б — У-15; «Универсаль»; в — СДРТС, СЗРТС, ГсУ; г — ППД, ППР; д — ПСХ; е — ПО; «Люцетта») и с люминесцентными лампами (ж, з — серий ОД, ЛД, ЛСП; и — ЛНО 02; к — ПВЛМ; л — ЛВО 01; м — ПВЛП);

1 — корпус светильника; 2 — отражатель; 3 — лампа; 4 — рассеивающее защитное стекло; 5 — решетка.

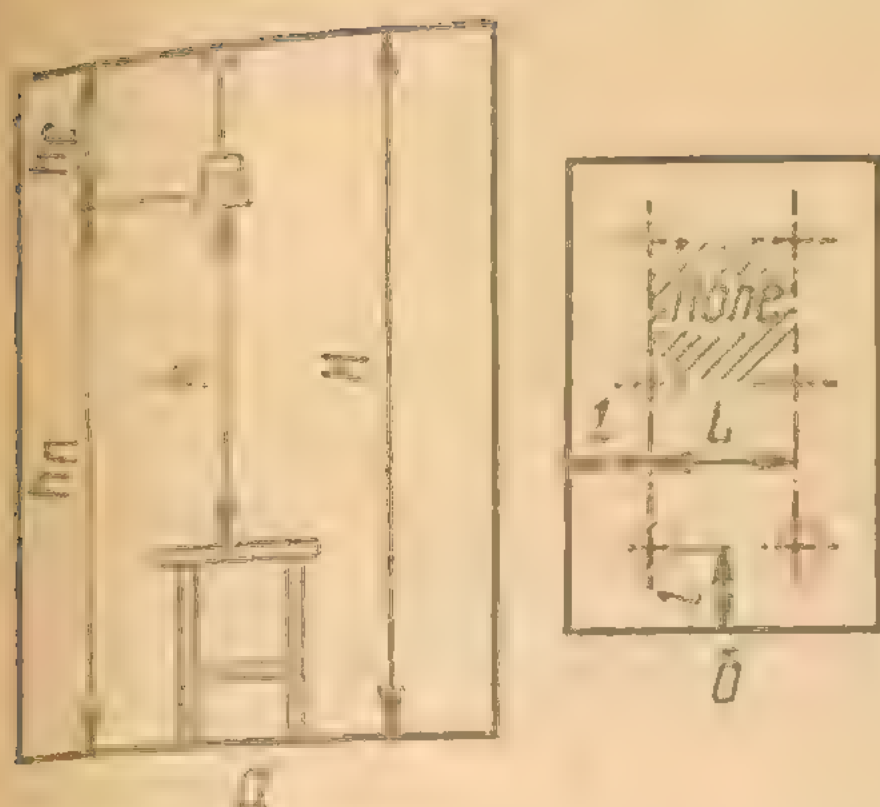


Рис. 22.6. Расположение светильников в помещении:

l — разрез; b — план помещения; h_n — высота подвеса; l , L — расстояния от стен между светильниками; h_c — свес; h — расчетная высота; H — высота помещения.

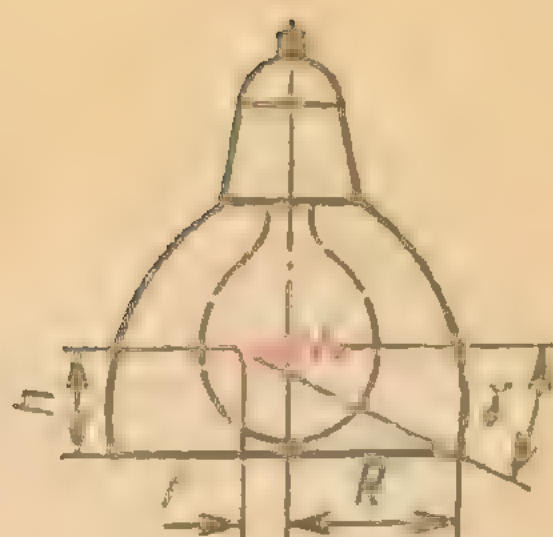


Рис. 22.7. Защитный угол γ светильника.

Защитный угол γ светильника (рис. 22.7) — важный показатель, определяющий защиту глаз от прямых лучей источника света. Он образуется горизонталью, проходящей через тело накала лампы, и линией, соединяющей крайнюю точку тела накала с противоположным краем отражателя. Этот угол может быть определен из выражения

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{h}{R + r}, \quad (22.9)$$

где h — расстояние от тела накала лампы до уровня выходного отверстия светильника; R — радиус выходного отверстия светильника; r — радиус кольца тела накала лампы.

Светильники с защитным углом менее 30° недостаточно защищают глаз от действия прямых лучей света.

На условиях ограничения слепящего действия высота подвеса светильников над уровнем пола или земли (h_n) должна быть не меньше значений, приведенных в таблицах 22.7...22.9. Свес h чаще выбирают равным 0,5...0,7 м. Не рекомендуется брать h больше 1,5 м (кроме многоламповых люстр). Не следует принимать высоту подвеса h_n больше 4...5 м (кроме светильников над кранами). В установках наружного освещения светильники чаще всего подвешивают на высоте 6...7 м над уровнем земли.

Форму освещаемой площади можно принимать в виде квадрата, прямоугольника или ромба с острым углом 60° , с отношением сторон не более 1,5. В таблице 22.10 указаны наиболее целесообразные отношения расстояния l между светильниками к высоте их подвеса h_n для различных светильников, если поле освещения квадратное. При другой форме поля величину l можно найти, если принять площадь прямоугольного поля равной площади квадратного поля, а площадь ромбовидного поля равной 1,3 площади квадратного поля.

22.7. Наименьшая высота подвеса над полом светильников с лампами накаливания в установках внутреннего освещения

Светильник и его характеристика (рис. 22.8)	Наименьшая высота подвеса над полом, м		
	в матированной колбе до 150 Вт	в прозрачной колбе	
		200 Вт и меньше	свыше 200 Вт

Светильник с диффузным отражателем без рассеивателя с защитным углом 10...80° (ГсУ, С/ЦРЛ и др. Кривая II)	2,5	3,0	4,0
То же, но с рассеивателями, с коэффициентом пропускания до 80% в зоне 0...90° (У-15, ППД, ППР)	—	2,5	3,5
Глубокоизлучатель эмалированный и аналогичные без рассеивателей с защитным углом более 30° (кривая I)	Не ограничивается		3
Цельного молочного стекла, типов ППО, ПУП и др.	2,5	3,0	4
Шары, плафоны ПО, ППБ и др.	—	2,5	3
Зеркальные глубокоизлучатели	2,0	2,5	3
Зеркальные широкоизлучатели	3,5	4,0	6
Открытые лампы в патронах с колбой матированного стекла, зеркальные лампы без арматуры	—	4,0	6

Примечание. Светильники с защитным углом менее 10° без рассеивателей с лампами в прозрачных колбах не применяются.

22.8. Наименьшая высота подвеса над полом светильников с люминесцентными лампами в установках внутреннего освещения

Характеристика светильника	Наименьшая высота подвеса (м) при числе ламп в светильнике или светящейся полосе	
	4 и менее	более 4

Светильники с защитным углом в продольной и поперечной плоскостях, создаваемых отражателем или решетчатым затенителем:		
менее 15°	Не допускается	
15...25°	4	4,5
25...40°	3	3,5
более 40°	Не ограничивается	
Светильники с рассеивателями в зоне 0...90° с коэффициентом пропускания рассеивателей:		
менее 55%	2,6	3,2
55...80%	3,5	4,0

22.9. Наименьшая высота подвеса светильников к уровню земли на площадях, улицах, дворах и проездах

Характеристика светильника	Наименьшая высота подвеса, м
Светильники с защитным углом не менее 10°, с лампой мощностью менее 150 Вт	5,5
То же, с лампой 150 Вт	6,0
» » » 200...300 Вт	6,5
» » » 500...700 Вт	7,5
» » » 1000 Вт и выше	8,5
Светильники с замкнутыми светорассеивающими стеклами	4,0
Светильники у входов в здания с лампами мощностью до 60 Вт	2,5

В связи с большим разнообразием сортамента светильников при выборе отношения $l:h$, где l — расстояние между светильниками или рядами светильников, а h — высота их подвеса над рабочей плоскостью, рекомендуется пользоваться типовыми кривыми силы света. ГОСТ устанавливает следующие типовые кривые силы света: К — концентрированная, Г — глубокая, Д — косинусная, Л — полуширокая, Ш — широкая, М — равномерная, С — синусная (рис. 22.8). Отношение $l:h$ для светильника с кривой силы света типа К находится в пределах 0,4...0,7, типа Г — 0,8...1,1; Д — 1,4...1,6; М — 1,8...2,6; Л — 1,6...1,8.

Уменьшение отношения $l:h$ удорожает устройство и обслуживание освещения, а чрезмерное увеличение приводит к резкой неравномерности освещенности и увеличению расхода электроэнергии.

Светильники с люминесцентными лампами следует размещать рядами (сильными или с незначительными интервалами между ними) вдоль

22.10. Выбор расположения светильников

Тип светильника	Отношение расстояния между светильниками (а при расположении рядами между рядами светильников) l к расчетной высоте подвеса h	
	наивыгоднейшее	наибольшее допустимое

Зеркальные лампы глубокого светораспределения, люминесцентные светильники с решетчатым затенителем, создающим защитный угол 30° и более	1,1...1,3	1,4
Глубокоизлучатель эмалированный	1,6	1,8
Светильники с кривой светораспределения типа Д (рис. 22.8)	1,8	2,5
Светильники с горизонтальными люминесцентными лампами	1,4	1,5
Шар молочного стекла, плафоны одно- и двухламповые, промышленный уплотненный и аналогичные — при отсутствии отражателей	2,3	3,2

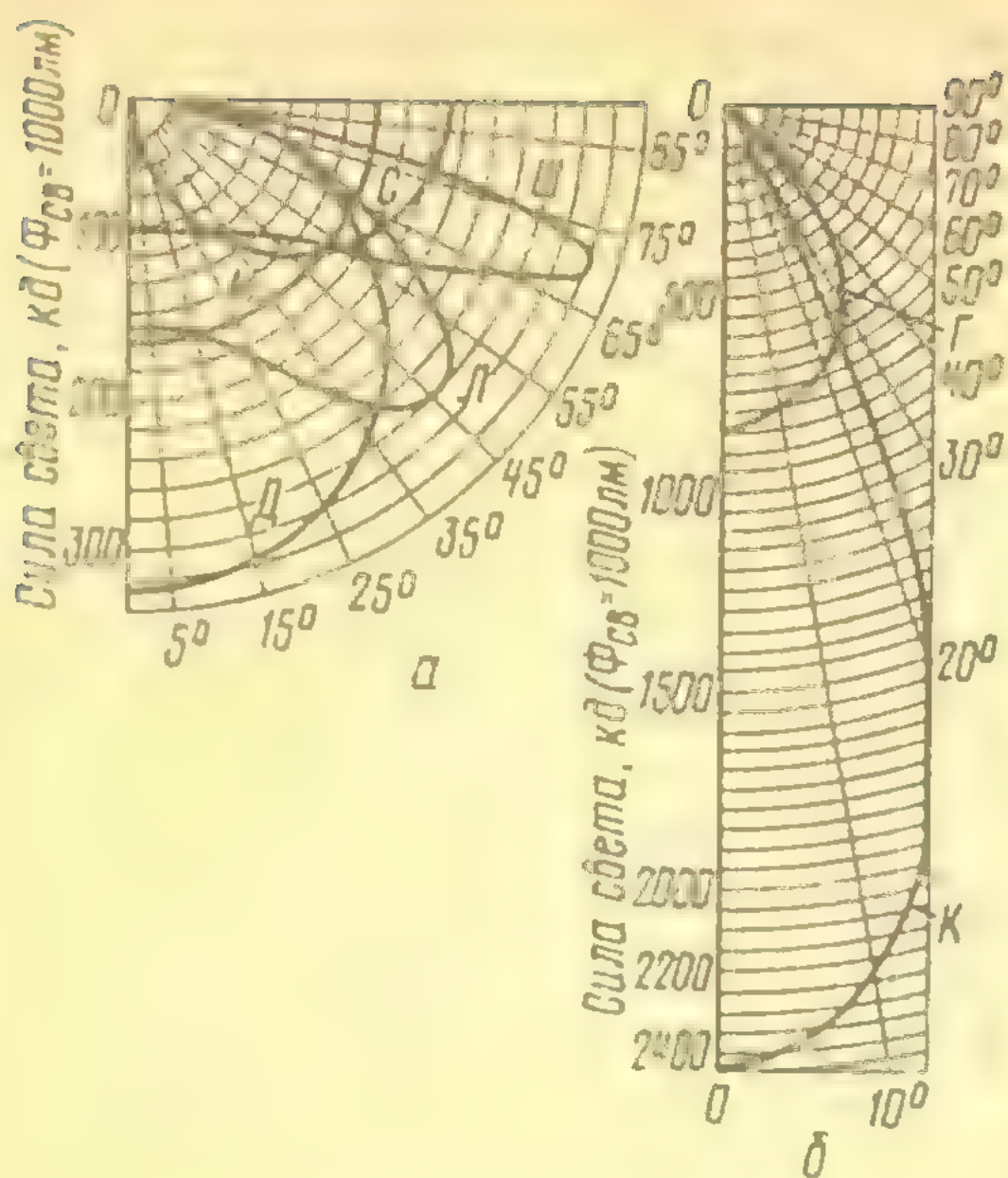


Рис. 22.8. Типы кривых силы света для светового потока светильника $\Phi_{\text{св}} = 1000$ лм:

а — кривые типов Д, Л, Ш, М, С; б — кривые типов Г, К

22.7. ВИДЫ И СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ

По своему назначению освещение может быть основным, или рабочим, и аварийным.

Рабочее освещение по характеру исполнения делится на три системы: общее, местное и комбинированное.

Общее освещение распространяется во всем помещении или его части более или менее равномерно на всех его участках. Светильники располагают равномерно вдоль помещения или локализованно. В последнем случае достигается большая освещенность на определенных участках помещения и меньшая освещенность от этих же светильников на других участках помещения.

Местное освещение предназначается только для рабочих поверхностей. Светильник устанавливают на рабочем месте в непосредственной близости от поверхности, которую он должен освещать. Местное освещение рабочей поверхности дополняется, как правило, общим освещением помещения.

Комбинированное освещение — это сочетание общего и местного освещения.

Обычно комбинированное освещение требует меньшей мощности, но дороже по первоначальным затратам, чем одно общее. Комбинированное освещение целесообразно применять при высокой точности работ, малой площади рабочих мест, редком их расположении.

Когда технологический процесс по своему характеру не требует напряжения зрения (освещенность 30...50 лк), система общего ос-

продольной оси помещения и параллельно стене с окнами. Расстояние между рядами светильников определяется по таблице 22.10.

При использовании люминесцентных ламп, как и при лампах накаливания, расстояние от крайних светильников или крайних рядов светильников до стен принимается в пределах (1/2...1/3) в зависимости от того, находятся ли у стен рабочие места или проходы.

Расстояние между светильниками наружного освещения выбирают из условий минимума общих эксплуатационных расходов.

Светильники с лампами ДРЛ нужно подвешивать на высоте не менее 4 м при мощности менее 400 Вт и не менее 6 м при большей мощности.

поэтому предпочтительнее, так как она требует меньших капитальных затрат. Если в помещении есть определенные рабочие места больших размеров, но работа не слишком точная, следует применять общее люминесцентное освещение. При устройстве комбинированного освещения освещенность на рабочей поверхности от светильников общего освещения должна составлять не менее 10% нормы комбинированного освещения, но не менее 100 лк при люминесцентных лампах и 30 лк при лампах накаливания.

Аварийное освещение предусматривается, помимо основного рабочего освещения, в тех помещениях и на площадках, где отсутствие света может послужить причиной несчастного случая, взрыва, пожара, привести к длительному нарушению технологического процесса или прекращению снабжения потребителей электроэнергией, водой и т. д. При этом должна создаваться освещенность не менее 10% нормированной для общего рабочего освещения лампами накаливания. Аварийное освещение для эвакуации людей из помещения выполняют по линиям основных проходов и на ступеньках лестниц. Оно должно обеспечивать освещенность не менее 0,3 лк, а на открытых пространствах — не менее 0,2 лк. Светильники аварийного освещения включают вместе со светильниками основного освещения, что создает нормированную рабочую освещенность. Аварийное освещение можно использовать и как дежурное или охранное освещение в нерабочее ночное время.

22.8. УПРОЩЕННЫЙ СПОСОБ РАСЧЕТА ОСВЕЩЕНИЯ

Для приближенного, но практически вполне приемлемого подсчета мощности, расходуемой на освещение, можно пользоваться нормами удельного расхода мощности на электрическое освещение (табл. 22.11).

22.11. Рекомендуемые удельные мощности на освещение

Потребители	Удельная мощность (1 Вт на 1 м ² площади по наружному обмеру) для осветительной и бытовой нагрузок		Средняя мощность светоточки, Вт	Годовое число часов использо- вания уста- новленной мощности
	установ- ленная	максимальная для расчета сети и выбора мощности подстанций		

1. Общественные помещения

Сельсовет	18	9	100	800
Контора, дом приезжих, чайная	16	8	100	800
Магазин, больница	21	10	100	800
Столовая	21	10	130	800
Хлебопекарня	22	11	130	800
Парк, детский сад, ясли	24	12	140	800
Школа	30	15	150	800

Потребители	Удельная мощность (1 Вт на 1 м ² площади по наружному обмеру) для осветительной и бытовой нагрузок		Средняя мощность светоточки, Вт	Головое число часов использо- вания уста- новленной мощности
	установ- ленная	максимальная для расчета сети и выбора мощности подстанций		
Клуб, отделение связи	27	13	100	800
Библиотека	17	8	100	800
Баня	33	15	150	800
Прачечная	25	12	110	800
<i>II. Производственные помещения</i>				
Гараж, пожарное депо	11	5	100	800
Слесарно-механическая мастерская	12	6	150	1500
Деревообделочная мастерская	12	6	150	1500
Мельница	14	7	150	800
<i>III. Животноводческие помещения</i>				
Коровник с доильной площадкой	4,0	1,6	60	700
Доильная площадка	13,0	8,0	100	700
Коровник при доении в стойлах	4,5	2,5	90	700
Лаборатория, молочная	15,5	7,0	100	700
Телятник	3,7	1,8	75	700
Свинарник-маточник	4,5	2,0	75	700
Свинарник-откормочник	2,6	1,3	75	700
Скотный двор для откорма на мясо	2,2	1,0	60	700
Овчарня для овцематок	3,5	1,5	60	700
Конюшня	2,3	1,0	60	700
Птичник с дополнительным освеще- нием, цыплятник	5,0	3,0	75	700
Кормоприготовительная	7,0	5,0	100	700
Пункт искусственного осеменения жи- вотных	25,0	18,0	100	700
<i>IV. Складские помещения</i>				
Зерно- и овощехранилище	2	1	100	600
Яйцесклад	6	3	100	600
Склады оборудования и материалов	3	1	100	600
Весовая	12	8	150	600
Склад минеральных удобрений	2	1	100	600

Расчет освещения в целом ведут, пользуясь таблицами, в такой последовательности.

1. Выбирают тип светильника для данного помещения.
2. Принимают наивыгоднейшее расположение светильников.
3. Определяют мощность каждого из светильников:

$$P_{\text{св}} = pS/N, \quad (22.10)$$

где S — площадь помещения, м²; N — число светильников (исходя из наивыгоднейшего их размещения); p — удельная мощность на освещение (табл. 22.12), Вт/м².

В таблице 22.11 приводятся значения удельной мощности на освещение в расчете на 1 м^2 по наружному обмеру. Соотношение между площадью по наружному обмеру и полезно освещаемой площадью следует принимать равным $1,2 \dots 1,25$. Для люминесцентного освещения удельную мощность рекомендуется принимать приблизительно в 2 раза меньшей.

22.9. ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СВЕТА

Использование электрического света для борьбы с насекомыми-вредителями. Метод борьбы с насекомыми — вредителями полей, садов и огородов с использованием светоловушек дает максимальный эффект при совместном применении с химическими средствами.

Простейшее приспособление для улавливания насекомых, летающих в ночное время, состоит из противня или корыта с водой с размещенной над ними лампой накаливания в арматуре. В воду добавляют керосин или ядовитые вещества. Насекомые летят на свет (отражение лампы в воде) и гибнут. Мощность лампы в отражателе $60 \dots 100 \text{ Вт}$. Для привлечения насекомых с большой площади сада или огорода вблизи от ловушки на высоте 6 м можно установить электролампу 25 Вт .

Другой тип светоловушки: электрическая лампа устанавливается у раструба с небольшим вентилятором, который засасывает насекомых, летящих на свет лампы, в марлевый мешок.

Весьма перспективно использовать высоковольтные истребители насекомых совместно с источником света. Этот аппарат представляет собой сетку из параллельных проволок (стальных или латунных) диаметром $1,5 \dots 2 \text{ мм}$, расположенных друг от друга в $8 \dots 9 \text{ мм}$ и хорошо изолированных друг от друга (рис. 22.9, а). К проволокам (через одну)

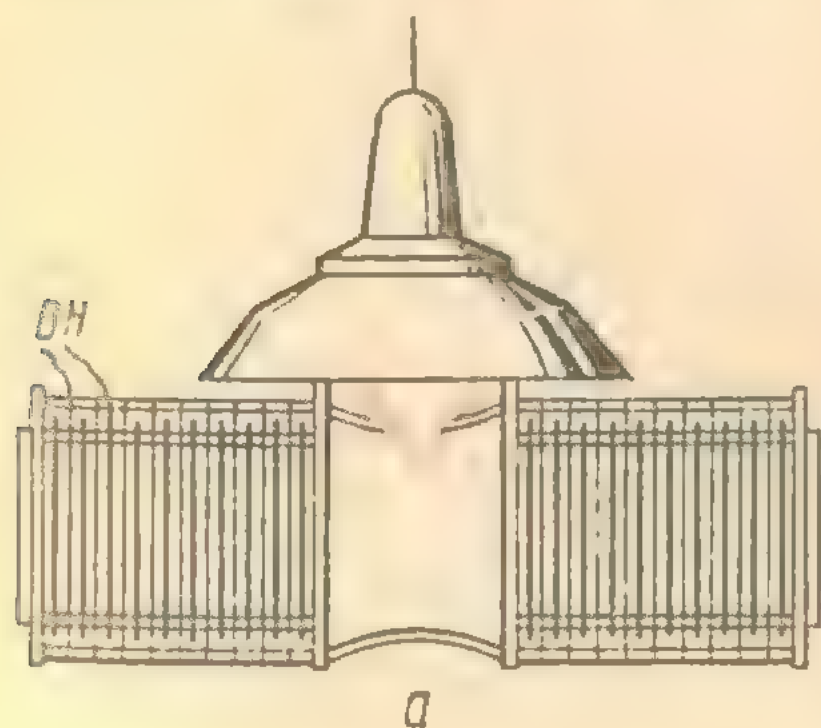
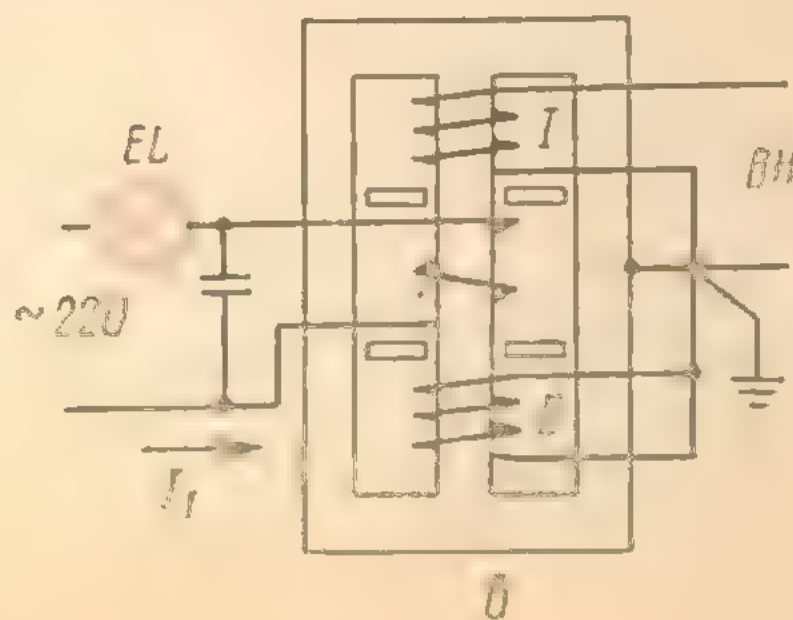
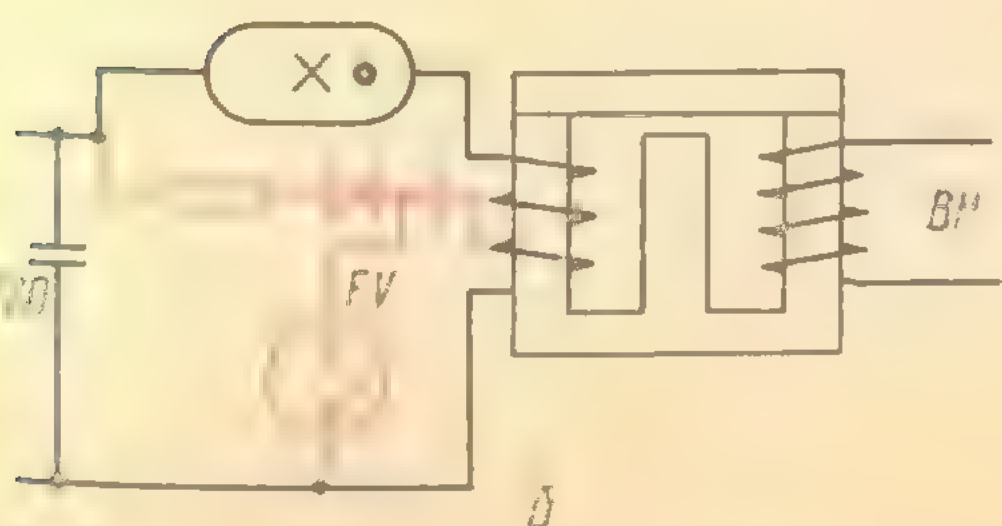


Рис. 22.9. Высоковольтный истребитель насекомых:

а — общий вид светильника-истребителя с лампой ДНат; б — схема питания от ПРА; в — включение трансформатора типа ТГ-10/20; Л — лампа 40 или 60 Вт в зависимости от числа подключенных сеток (от 10 до 30).



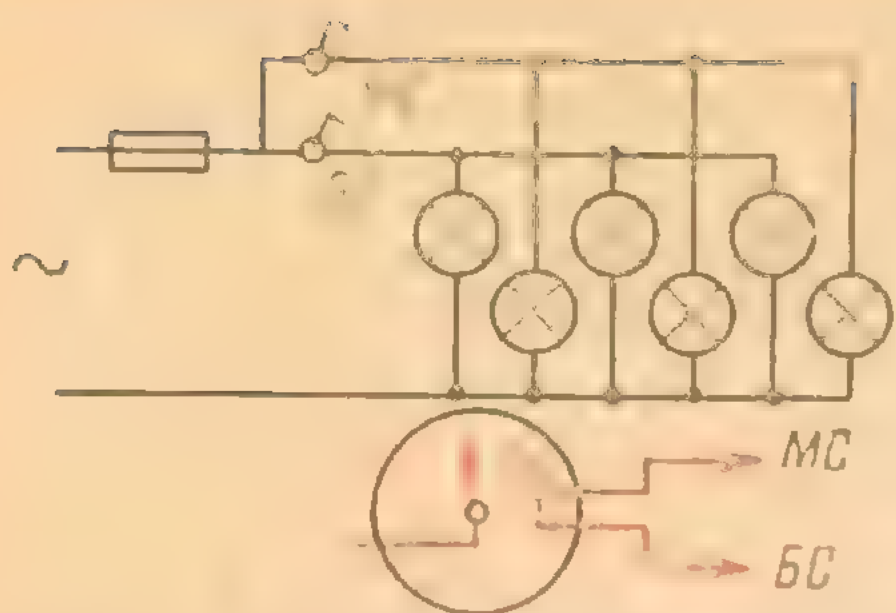


Рис. 22.10. Схемы включения лампы в птичнике по способу малого (МС) и большого (БС) света.

подводится напряжение 2...2,5 кВ от повысительного трансформатора небольшой мощности, например типа ТГ-10 (рис. 22.9, а). Насекомое, летящее на свет через сетку, попадает под напряжение между двумя соседними проводками и гибнет. Схема включения лампы типа ДНаТ с дополнительной высоковольтной (2,5 кВ) обмоткой на свободном стержне балластного дросселя показана на рисунке 22.9, б. Ток короткого замыкания в этой обмотке ограничивается магнитным шунтом.

Ток короткого замыкания не должен превышать 20 мА. Такие сетки могут быть эффективно использованы и в дневное время при установке их на окна животноводческого помещения или у приманки с сильным запахом, привлекающим насекомых. Изготавливать и устанавливать высоковольтные истребители, а также внимательно следить за их состоянием следует квалифицированным электрикам. При установке сеток на доступной для касания высоте их необходимо ограждать деревянными или металлическими решетками. Особенно тщательно должен быть изготовлен и налажен трансформатор. Ток короткого замыкания трансформатора снижают до 20 мА подбором магнитного шунта из пластин трансформаторного железа, устанавливая его между стержнями трансформатора, на которых отдельно располагаются первичная сетевая обмотка и вторичная высоковольтная (ВН).

Использование электрического освещения в птичниках для удлинения светового дня. В короткие дни осенне-зимнего периода яйценоскость птицы значительно уменьшается вследствие снижения их жизнедеятельности. Для увеличения яйценоскости применяют добавочное электрическое освещение. В средней полосе Советского Союза добавочное электрическое освещение в птичниках рекомендуется использовать с октября до марта, включая его с 5...6 ч утра до полного рассвета и с наступлением сумерек до 20...21 ч. В случае применения для этой цели ламп накаливания рекомендуемая норма расхода мощности 4...5 Вт на 1 м² пола птичника. Лампы выбирают мощностью 60...100 Вт, высота подвеса 2 м, расстояние между лампами 3 м. При номинальных условиях расход в среднем на курицу составляет 1,3...1,5 кВт·ч в год. Годовая яйценоскость кур повышается на 15...20%.

Выключать лампы на ночь следует постепенно, чтобы дать птицам время разместиться на насестах. Для этой цели пользуются следующими способами.

1. Выключение света «миганием», то есть периодическим включением и выключением, пока куры не расположатся на насестах. Этот способ имеет тот недостаток, что контакты выключателя быстро изнашиваются и сокращается срок службы ламп.

2. Выключение сначала части ламп (50...70%) на некоторое время, а затем «малого света» (рис. 22.10), когда куры разместятся на своих местах.

Эта наиболее простая схема управления дополнительным освещением в птичниках реализована при помощи программного реле управления светом (ПРУС-1). Реле включает свет двумя степенями. Оно позволяет также задавать продолжительность освещения в сутки с учетом возраста птицы.

Устройство УПУС-1 предназначено для мгновенного выключения освещения вечером и включения утром, что применяется при клеточном содержании птицы. При помощи этого устройства можно также задавать продолжительность освещения в зависимости от возраста птицы.

Дополнительное освещение в теплицах и оранжереях. Свет играет большую роль в жизни растений. При его участии протекает процесс фотосинтеза — накопление углеводов.

В зимний период, когда солнце не дает достаточного по интенсивности и продолжительности освещения, в остекленных теплицах и оранжереях естественное освещение можно заменить искусственным. Лучшие результаты достигаются в том случае, когда источник света, подобранный по интенсивности и по спектральному составу, наиболее полно удовлетворяет потребности данного растения. Для выращивания рассады огурцов и томатов наиболее подходящая освещенность 9...10 тыс. лк, а для взрослых растений освещенность должна быть не менее 8 тыс. лк.

Промышленность выпускает облучатели для растений ОТ-6-40, в которых используется 6 ламп типа ЛФ-40 удельной мощностью 276 Вт м². Облучатели ОТ-400 имеют одну лампу ДРЛФ-400 (400 Вт м²).

Для освещения растений перспективны лампы типа ДНаТ — натриевые высокого давления.

При выборе источников света для дополнительного освещения растений необходимо проводить технико-экономическое сравнение вариантов (см. гл. 28).

При соблюдении требуемого светового и температурного режимов сроки выращивания рассады в зимние месяцы сокращаются вдвое.

Электрическое освещение полевых работ в ночное время. Тракторный агрегат освещают специальными лампами накаливания типа ТН низкого напряжения на 6 или 12 В мощностью до 10...15 Вт. В качестве источников тока служат генераторы, устанавливаемые на тракторах, а в качестве светильников — фары или софиты.

Для освещения молотильного тока (от сети) используют светильники с арматурой наружного освещения с лампами 200...300 Вт, «глубокоизлучатель» с лампой 300...500 Вт, фарфоровый полугерметический с лампами 60 Вт. Светильники располагают так, чтобы хорошо были освещены все рабочие места. Для освещения скирд соломы рекомендуется использовать прожекторы типа ПЗС-35 с лампами по 500 Вт.

Контрольные вопросы и задания к главе 22. 1. Дайте определение световой энергии, силе света, освещенности. 2. Что вы знаете о спектре излучения? 3. Различают ли излучение от инфракрасных до ультрафиолетовых лучей? 4. Как различают лампы накаливания и какие основные параметры они имеют? 5. Как различают лампы с глубоким излучением и как они могут быть включены в сеть? 6. Для чего в лампах с глубоким излучением используется конденсатор? 7. Что такое стробоскопический эффект и как

его преодолеть? 7. Расскажите об устройстве газоразрядных ламп высокого давления типа ДРЛ, ДНаТ, ДРИ, а также о схемах их включения. 8. Как выбрать светильник для производственного помещения? 9. Какие вы знаете виды освещения? 10. Выберите мощность для общего освещения слесарно-механической мастерской, площадь помещения которой равна 120 м². Найдите оптимальное число светильников.

Глава 23. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ, ИНФРАКРАСНЫХ И ДРУГИХ ИЗЛУЧЕНИЙ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

23.1. ДИАПАЗОН УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ. ИСТОЧНИКИ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Источником ультрафиолетовых излучений в природных условиях является солнце. К ультрафиолетовым излучениям относят излучения с длиной волны от 10 до 380 нм. Коротковолновые ультрафиолетовые излучения солнца интенсивно поглощаются в верхних слоях атмосферы. Излучения с волной короче 290 нм практически не доходят до поверхности земли.

Ультрафиолетовые излучения играют очень важную роль в биологических процессах. Они необходимы и людям и животным. Естественная ультрафиолетовая недостаточность, например, в северных широтах может быть компенсирована излучениями искусственных источников.

Диапазон ультрафиолетовых излучений делится на три области — А, В и С (см. табл. 22.1). Область А — длинноволновой, или ближней (к видимым излучениям), ультрафиолетовой радиации непосредственно примыкает к фиолетовому участку солнечного спектра. Излучения этой области используют для люминесцентного анализа, а также для возбуждения светящихся веществ в сигнальных и других устройствах. Биологическая активность этих излучений относительно невелика.

Область В является областью средневолновой ультрафиолетовой радиации. Излучения этой области при определенных дозах облучения оказывают благотворное действие на живые организмы.

Излучения с длинами волн короче 315 нм способны превращать провитамин D в активно действующий витамин D, который управляет процессами отложения солей кальция в костных тканях животных.

Область С — это область коротковолновой, или дальней, ультрафиолетовой радиации. Лучи этой области обладают сильным бактерицидным действием. Они используются для стерилизации воздуха, воды, посуды и т. д., а также для возбуждения светящихся составов в люминесцентных лампах. На растения эти лучи действуют губительно.

Мера мощности ультрафиолетового излучения — ультрафиолетовый поток. Бактерицидное излучение оценивается значением бактерицидного потока, единица которого — бакт (б) — численно равна потоку ультрафиолетового излучения с длиной волны 254 нм и мощ-

ностью 1 Вт. Аналогично существуют термины эритемный поток и антирахитный поток. Для их измерения принята единица измерения эр (эр), которая равна потоку ультрафиолетового излучения с длиной волны 297 нм и мощностью 1 Вт.

На рисунке 23.1 приведены кривые относительной эффективности ультрафиолетовых излучений в зависимости от длины волны. Эритемное действие излучений в пределах длин волн 280...320 нм благотворно влияет на человеческий организм. Характер эритемного действия излучений с длинами волн короче 280 нм пока недостаточно хорошо изучен. Кривая антирахитной эффективности носит ориентировочный характер, так как она не вполне точно определена для излучений с различной длиной волны.

Существует ряд методов генерирования ультрафиолетовых излучений.

Метод температурного излучения используется в лампах накаливания. Температурные источники имеют сплошной спектр, максимум которого располагается соответственно температуре излучателя. В лампах накаливания температура излучения лежит примерно на уровне 2800 К. Поэтому излучение в ультрафиолетовой области незначительно. У ламп с колбами из обычного стекла практическое использование находят ультрафиолетовые излучения области А.

Метод генерирования ультрафиолетовых лучей через электрическое возбуждение газов и паров металлов используется в ртутных и других газоразрядных лампах. Принцип излучения в газоразрядных лампах был рассмотрен выше. Излучения возникают при переходе атома из возбужденного в нейтральное состояние. Причем чем выше скорость движения электронов в лампе и чем больше степень возбуждения атомов, тем короче волна излучения. Вследствие вышесказанного в ртутных лампах, предназначенных для генерирования коротковолновых (бактерицидных) излучений, применяют низкие давления — менее 130 Па. При низком давлении возможность столкновения электрона с атомом мала и электрон до столкновения успевает приобрести высокую скорость. С целью генерирования средневолновых ультрафиолетовых излучений применяют лампы с внутренним давлением паров ртути порядка 0,4...0,7 МПа. Для генерирования видимых излучений используют лампы сверхвысокого давления (СВД) с рабочим давлением паров ртути до 10 МПа. В этих лампах большого значения достигает температурное излучение и спектр излучения приближается к сплошному.

Метод генерирования ультрафиолетовых излучений посредством люминесценции применяется, например, в эритемных лампах из увиолевого стекла (ЛЭ). Ультрафиолетовые излучения области В генерируются в результате люминесценции специального люминофора, нанесенного на внутреннюю поверхность трубки лампы низкого давления. Этот метод наиболее экономичен для получения излучений области В. Ниже рассматриваются источники ультрафиолетовых излучений, нашедшие применение в сельском хозяйстве.

Ртутно-кварцевая лампа типа ДРТ (дуговая ртутно-кварцевая трубка, рис. 23.2, а) представляет собой трубку из плавленного кварца, заполненную аргоном при низком давлении и небольшим количеством ртути. При горении лампы давление паров ртути поднимается до

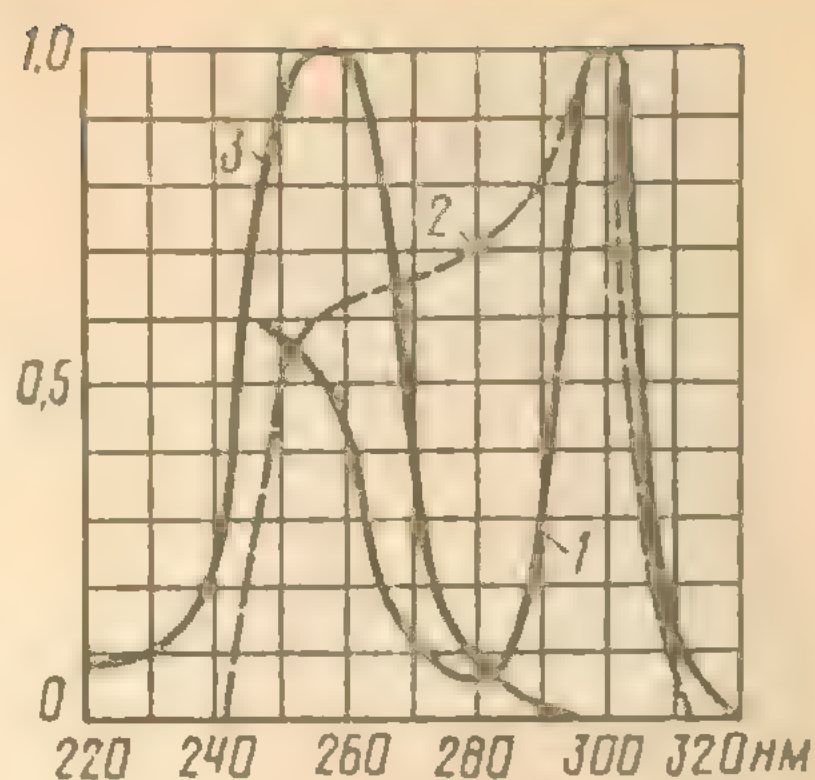


Рис. 23.1. Кривые относительной эффективности ультрафиолетовых излучений в зависимости от длины волны:
1 — эритемного; 2 — антирахитного;
3 — бактерицидного.

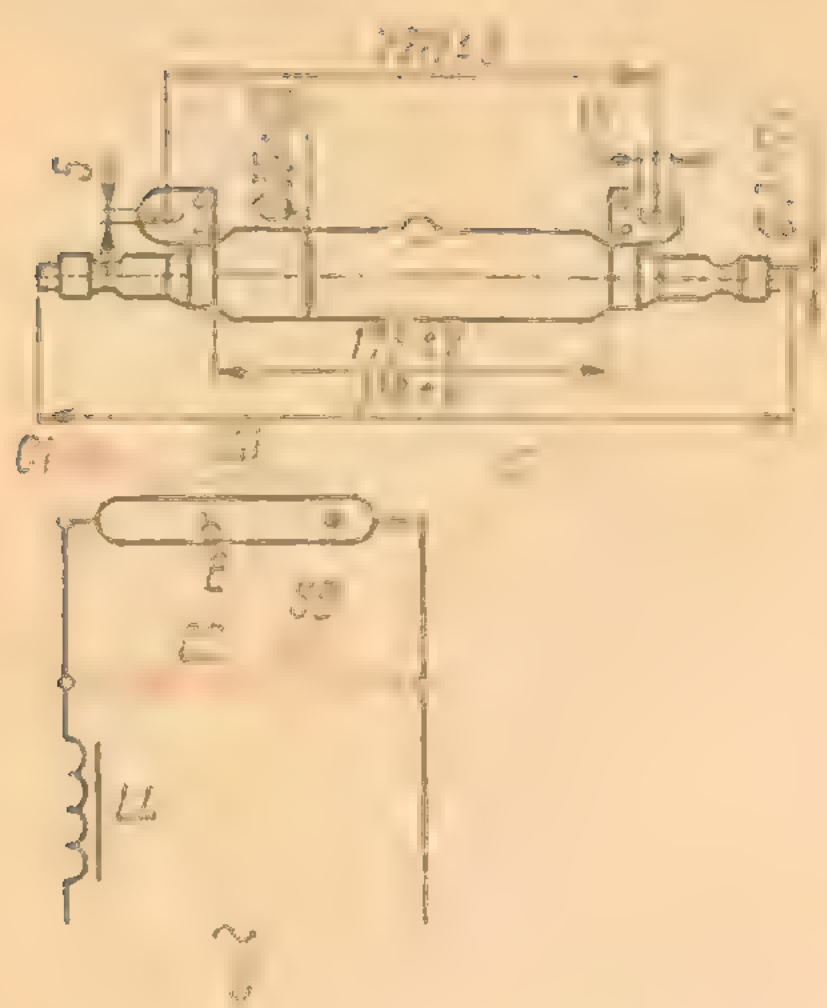


Рис. 23.2. Лампа ДРТ (а) и схема ее включения (б).

0,1 МПа. В концы трубки вставлены электроды из вольфрама, обвитые спиралью из слоя оксида. Во время работы лампы между электродами возникает дуговой разряд. Схема включения лампы показана на рисунке 23.2, б.

Лампы ДРТ используют в сети переменного тока напряжением 127 или 220 В. Нормальное положение ламп при работе — горизонтальное. Режим работы устанавливается через 8...15 мин после включения. Лампы ДРТ дают мощный поток ультрафиолетовых лучей с длинами волн от 240 нм до границ видимого спектра. Они применяются с профилактической и лечебной целью в медицине, а также для бактерицидного и эритемного облучения в животноводческих помещениях — в первую очередь

молодняка. Эти лампы используют также для люминесцентного анализа. Срок службы ламп ДРТ не менее 800 ч.

Основные параметры ртутно-кварцевых ламп при эксплуатации в сетях переменного тока приведены в таблице 23.1.

Установившийся режим наступает при полном испарении паров ртути. Цепь в схеме включения лампы, состоящая из кнопки *SB* и конденсатора *C*, облегчает зажигание лампы. Нажав кнопку, создают цепь тока дросселя *LL* и конденсатора *C*. При размыкании кнопки магнитное поле дросселя исчезает и наводит импульс ЭДС, больший, чем напряжение сети. Этот импульс пробивает промежуток между электродами в лампе, и она загорается. При нормальной окружающей температуре эта цепь не используется. Разряд возникает при сетевом напряжении. Конденсатор *C* и металлическая полоска *C* также предназначены облегчить зажигание лампы.

Максимум излучения ртутно-кварцевых ламп при давлении 0,1 МПа приходится на спектральную линию 365 нм.

Эритемные люминесцентные лампы типов ЛЭ-30, ЛЭР-30, ЛЭР-40 устроены подобно обычным люминесцентным лампам типов ЛБ или

23.1. Основные параметры ртутно-кварцевых ламп

Тип лампы	Номинальное напряжение сети, В	Пусковой ток, А	Наибольшая продолжительность разогрева, мин	Параметры в установившемся режиме		
				ток, А	излучение, Вт	мощность, Вт
ДРТ-375	220	6	15	$3,75 \pm 0,25$	120 ± 6	100 ± 5
ДРТ-220	127	5	10	$3,75 \pm 0,3$	70 ± 5	200 ± 10
ДРТ-240	220	4,2	15	$2,3 \pm 0,15$	120 ± 6	200 ± 10
ДРТ-1000	220	14	10	$8,5 \pm 0,5$	135 ± 6	1000 ± 50

ЛД, но отличаются от них составом люминофора и сортом стекла трубки. Состав люминофора подбирают так, чтобы длина волны излучения находилась в пределах 280...380 нм, что способствует недостающему зимой ультрафиолетовому излучению солнца. Максимум излучения лежит в пределах 310...320 нм. Излучение этой лампы богато не только эритемным действием, но и антирахитным, так как относительные эритемная и антирахитная эффективности в значительной мере совпадают. В спектре лампы отсутствует нежелательный коротковолновый ультрафиолет. Трубка лампы выполнена из специального увиолевого стекла, хорошо пропускающего лучи с волной 253,7 нм и короче.

Обозначение лампы ЛЭР-40 расшифровывается так: лампа эритемная рефлекторная (с отражающим слоем), мощность 40 Вт. При работе лампа дает слабое голубое свечение, что вызывается излучением паров ртути в видимой области спектра, проходящим через слой люминофора. Схема включения лампы аналогична схеме включения люминесцентных ламп дневного или белого света. Эритемные люминесцентные лампы применяются в облучающих эритемных установках для компенсации ультрафиолетовой недостаточности. Наиболее технологичными являются эритемные установки длительного действия, обеспечивающие во всем помещении малую эритемную облученность.

Их в первую очередь рекомендуется устанавливать в детских учреждениях (яслях, детсадах, школах), в лечебно-профилактических учреждениях (больницах, санаториях, домах отдыха), в жилищах (общежитиях, интернатах), расположенных севернее 60° широты, в производственных и общественных помещениях, лишенных естественного света, в животноводческих помещениях для облучения молодняка сельскохозяйственных животных и птицы.

Эритемные люминесцентные лампы можно применять совместно с люминесцентными лампами, а также с лампами накаливания. Их можно использовать с искусственным освещением, в основном в темные часы суток. В связи с тем, что осветительные и эритемные лампы, возможно, будут действовать в разное время, необходимо предусматривать раздельное включение и выключение эритемных и осветительных ламп.

Облучающие установки могут быть выполнены с равномерным или с локализованным размещением облучающих приборов. При одновременном их использовании с люминесцентными осветительными лампами рекомендуется устанавливать их в общих светильниках. При этом эритемные лампы размещают таким образом, чтобы избежать значительного ослабления ультрафиолетового потока. Для защиты зрения применяют либо светильники с системой плоских пластинок, либо светильники отраженного света. Для животноводческих помещений используют открытую корытообразную арматуру.

Дозу облучения подсчитывают как произведение облученности на время действия установки. Ориентировочно число эритемных люминесцентных ламп мощностью 15 Вт может быть принято по графику, изображенному на рисунке 23.3.

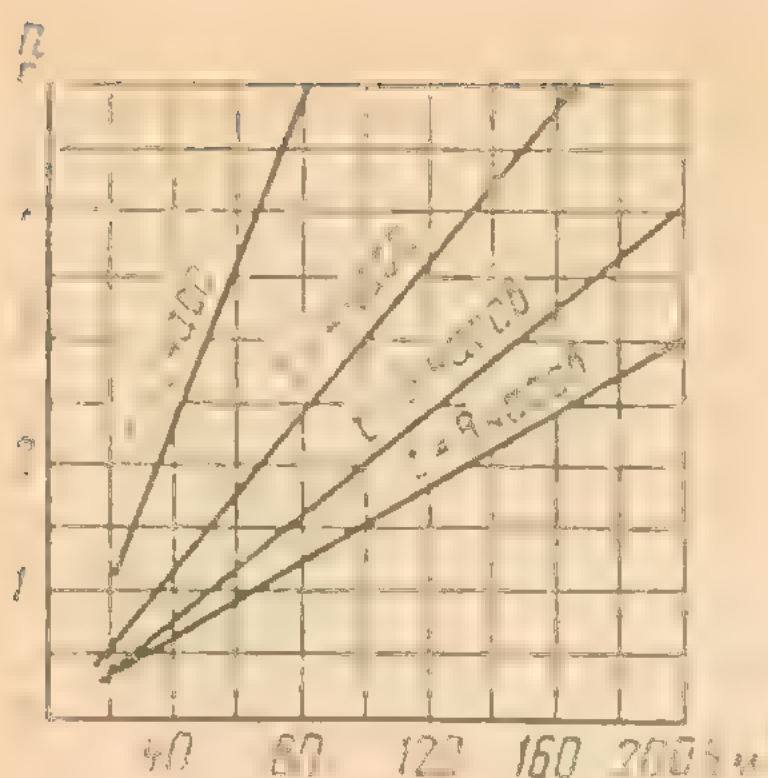


Рис. 23.3. График для ориентировочного подсчета числа эритемных ламп в облучающих установках в зависимости от площади помещения и продолжительности включения ламп: S — площадь помещения, m^2 , t — продолжительность горения ламп; n — рекомендуемое число ламп, типа ЛЭ-30.

Для облучения животных и людей и одновременного освещения помещения выпускаются эритемные дуговые ртутно-вольфрамовые диффузные лампы ДРВЭД 220-160 мощностью 160 Вт. Их включают в сеть, как и лампы накаливания. Балластным же сопротивлением служит нить накала, последовательно включенная с ртутно-кварцевой трубкой.

Бактерицидные лампы типа ДБ представляют собой газоразрядные ртутные лампы низкого давления, устроенные подобно лампам ЛБ, ЛД и ЛЭ. Трубки выполняют из кварцевого увиолевого стекла, хорошо пропускающего бактерицидные излучения с длиной волны 254 нм. Люминофором трубку не покрывают.

Бактерицидные лампы изготавливают мощностью 60 Вт (лампа ДБ-60) и мощностью 30 Вт (ДБ-30).

Средний срок службы ламп — 1500 ч. В конце срока службы бактерицидный поток составляет не менее 50% номинального.

Схемы включения бактерицидных ламп аналогичны схемам включения эритемных и люминесцентных ламп.

Бактерицидные лампы можно применять для обеззараживания воздуха помещений лечебных учреждений, бактериологических лабораторий, станций переливания крови, театров и кино, школ, детских учреждений и т. п., стен, пола, потолка в помещениях, а также предметов обихода, питьевой и минеральной воды, для обеззараживания и предохранения от микробного загрязнения пищевых продуктов, оборудования и тары на пищевых предприятиях.

Обеззараживать воздух помещений ультрафиолетовым облучением можно как в присутствии, так и в отсутствие людей. В первом случае необходимо применять меры к максимальному сокращению бактерицидной облученности на уровне до 2 м от пола. Применять неэкранированные («голые») лампы, которые могут оказываться в поле зрения, категорически запрещается.

При обеззараживании воздуха в присутствии людей в высоких помещениях (более 3 м) нужно размещать бактерицидные лампы в специальной арматуре на высоте не ниже 2 м от пола. Арматура должна направлять бактерицидный поток в верхнюю зону так, чтобы угол между горизонтальной плоскостью, проходящей через лампу, и лучами от нее был не менее 5° .

В соответствии с этими требованиями разработаны специальные настенный (типа НБО) и потолочный (типа ПБО) облучатели. Удельная установленная мощность не должна превышать 0,75...1 Вт на $1 m^3$ помещения.

В помещениях с пребыванием в них большого числа людей рекомендо-

рекомендуется облучать воздух в течение всего времени их пребывания. При верно рассчитанной установке и правильной ее эксплуатации погибает до 70% общего количества бактерий. Болезнетворные бактерии более чувствительны к лучам, поэтому их гибнет больше. Активность оставшихся бактерий снижается. Если в помещении отсутствует вентиляция и за 1,5...2 ч в нем накапливается значительное количество озона, необходимо выключать установку на 30...60 мин и проветривать помещение.

Лампы целесообразно размещать на пути конвекции воздуха или в вентиляционных каналах. Их можно также ставить в специальных рециркуляционных установках, через которые прогоняется воздух. Такие рециркуляционные установки представляют собой короткие трубы из жести с бактерицидными лампами внутри и небольшим вентилятором.

Для облучения предметов обихода (посуды, игрушек и т.д.) целесообразно применять переносную облучательную установку с 1...3 лампами ДБ-30. Хорошо вымытые и очищенные предметы облучают не менее 10 мин. Для обеззараживания питьевой и минеральной воды лампы размещают как в воздухе, непосредственно над поверхностью воды, так и в самой воде. В последнем случае лампы закрывают кварцевыми чехлами, защищающими от механических повреждений и непосредственного охлаждения водой.

Установки с лампами используют также для обеззараживания воздуха в продуктовых складах, молочных, инкубаториях, в животноводческих помещениях. В помещениях для хранения продуктов принимают удельную мощность, равную 0,3 Вт/м³. Для малых камер хранения норма может быть увеличена до 2,5 Вт/м³. Длительность облучения — 12 ч в сутки (по 6 ч). Для животноводческих помещений норма пока точно не установлена.

Ультрафиолетовые бактерицидные излучатели могут быть использованы для обработки зерна после длительного хранения. Зерно в этом случае промывают, сушат и облучают. При обеззараживании молока его облучают в тонком слое в течение 10...30 с, а затем хранят при температуре 5°C. Целесообразно облучать цитрусовые при хранении. Плоды облучают не ранее чем через 2 месяца после их сбора при температуре 3°C в течение не менее 10 мин.

Для стерилизации тары, предметов обихода, оборудования, рабочих мест используют лампы типа ДБ-30, излучение которых на расстоянии 30 см за первые 30 с убивает до 90...95% всех неспороносных микроорганизмов. С целью уничтожения спор плесени длительность облучения нужно довести до 5...15 мин.

23.2. НОРМЫ ЭРИТЕМНОГО ОБЛУЧЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЖИВОТНЫХ И ПТИЦЫ. ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОБЛУЧЕНИЯ

Нормы облучения установлены многократными опытами и рекомендуются секцией по ультрафиолетовому облучению при Академии наук СССР (см. ниже).

Телята в возрасте до 6 мес	120...140
Телята старше 6 мес	160...180
Телки и нетели	180...210
Коровы и быки	270...290
Поросята сосуны	20...25
Поросята-отъемыши	60...80
Поросята на откорме и свиноматки	80...90
Овцематки	245...260
Ягнята с 3-дневного возраста до отбивки	220...240
Цыплята при напольном содержании	15...20
Цыплята в клетках из проволоки	20...25
(планок)	(40...50)
Куры-несушки при напольном содержании	20...25
Куры в клетках	40...50

Значения эритемной облученности, создаваемой различными источниками ультрафиолетовых излучений на разных расстояниях от них, приведены в таблице 23.2.

23.2. Значения эритемной облученности

Тип лампы	Эритемная облученность (мэр / м ²) при высоте подвеса лампы над животным, м			
	1	1,5	2	4,5
ДРТ-375	720	319	180	114
ДРТ-220	420	186	105	67
ЛЭ-30	42	19	10	7

Пользуясь приведенными данными, можно рассчитать потребное облучение. Например, для облучения поросят доза составляет 30 мэр · ч / м². Высота подвеса лампы ЛЭ-30 равна 2 м. Из таблицы 23.2 находим, что эритемная облученность в этом случае 10 мэр / м². Чтобы получить дозу облучения 30 мэр · ч / м², необходимо ежедневно проводить облучение в течение 3 ч, то есть 10 мэр / м² · 3 ч = 30 мэр · ч / м².

Животных нужно приучать к облучению постепенно: в течение первых пяти дней давать четверть дозы, затем половину, и наконец, полную дозу.

Искусственное ультрафиолетовое облучение животных и птицы особенно необходимо в осенне-зимний период. Для широт Советского Союза этот период длится с ноября по апрель включительно, когда естественная солнечная радиация недостаточна. Во всех случаях целесообразно устанавливать сроки облучения в зависимости от климатических зон и условий содержания скота.

Эффективность облучения. В результате опытов, проводимых рядом научно-исследовательских учреждений, было установлено, что по сравнению с контрольными у облучаемых поросят привес увеличился на 21...24%, у телят — на 18...25%, удойность коров повы-

на 10...12%, яйценоскость кур — на 20...25%. Наблюдается общее оздоровительное действие, в результате которого снижаются различные заболевания и отход молодняка.

Большой эффект дает также облучение кормов (дрожжей, рыбной муки, молока и т. д.) с целью обогащения их витамином D. Но при этом необходимо строго соблюдать дозировку облучения, так как повышенные дозы облучения приводят к превращению витамина D в ядовитые для животных продукты.

Облучательные установки. Для облучения животных и птицы можно использовать как стационарные, так и передвижные облучательные установки. В стационарных облучающих установках применяются светильники с эритемными лампами. В передвижных используются лампы типов ДРТ-375, ДРТ-220, которые перемещаются вдоль всего помещения специальной приводной станцией и поочередно облучают всех животных прямо в станках.

В птичниках ультрафиолетовое облучение можно осуществить одновременно с удлинением светового дня. Для этого наиболее целесообразно использовать эритемные лампы.

При одновременном использовании эритемных ламп и ламп накаливания можно обойтись без дросселей. Их заменяют лампы накаливания.

Две лампы накаливания по 40 Вт на 127 В включают последовательно между собой и с эритемной лампой. При включении в сеть 380 В люминесцентная лампа загорается без стартера. Для надежного зажигания на лампы снаружи можно наложить заземленные металлические колпачки (из фольги). При этом зажигание возможно даже при окружающей температуре 2...3°C. Один такой комбинированный светильник рекомендуется монтировать из расчета на 15...20 м² облучаемой площади. При высоте подвеса светильника 2...2,3 м над уровнем пола создается облученность 10...12 мэр/м². Необходимая доза ультрафиолетового облучения достигается изменением продолжительности облучения. Схема и общий вид такого комбинированного светильника показаны на рисунке 23.4.

На птицефабриках, где куры круглый год содержатся в многоярусных металлических клетках (батареях) и полностью лишены естественного солнечного освещения, для предупреждения рахита и других заболеваний в их рацион вводят витамин D или проводят систематическое облучение ультрафиолетовым излучением. Для облучения кур в клетках созданы специальные передвижные установки.

Установка монтируется на самоходной тележке и приводится в движение от электродвигателя. На тележке установлены также бара-



Рис. 23.4. Комбинированный светильник с эритемной люминесцентной лампой и двумя лампами накаливания:

а — схема; б — общий вид.

бан с питающим кабелем и две кварцевые лампы ПРК-2 с пусковой аппаратурой. Лампы расположены на разных уровнях, на высоте от пола 0,9 и 2 м. Этим обеспечивается равномерное облучение по этажам батареи. Потребляемая из сети мощность равна 1 кВт, общая масса установки до 80 кг. Дозировка регулируется скоростью передвижения установки вдоль клеток.

Расход электроэнергии на облучение одной курицы в месяц составляет 0,06 кВт·ч. При клеточном содержании кур и цыплят ультрафиолетовое облучение необходимо проводить круглый год.

Промышленность выпускает для освещения и облучения в животноводческих помещениях светильник-облучатель ОЭСПО1-2ХХ40/ПКХ-01, в котором используются рефлекторные лампы ЛБР-40 и ЛЭР-40. Лампы в нем включаются раздельно. Для облучения животных выпускается эритемный облучатель типа ЭО-1-30 с одной лампой типа ЛЭ-30-1. При высоте подвеса 2...2,2 м он облучает 18...20 м² площади пола помещения.

23.3. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ АНАЛИЗ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Длинноволновые ультрафиолетовые излучения области А вызывают свечение многих веществ и микроорганизмов, в том числе и сельскохозяйственных продуктов.

Анализ проводят в темном помещении при помощи источника ультрафиолетовых излучений, желательно мощного, например лампы ДРТ и СВД в закрытой арматуре из жести, в которой имеется окно с фильтром из черного увиолевого стекла. Такой фильтр задерживает видимые и пропускает ультрафиолетовые излучения. Это требуется для того, чтобы видимые излучения не мешали наблюдению за относительно слабым свечением.

Различают *сортовой* и *химический* люминесцентные анализы. *Сортовым люминесцентным анализом* условно называют способ отбора объектов по их свечению без дополнительных химических люминесцентных реакций. В результате *химического люминесцентного анализа* определяют не только качественные, но и количественные показатели.

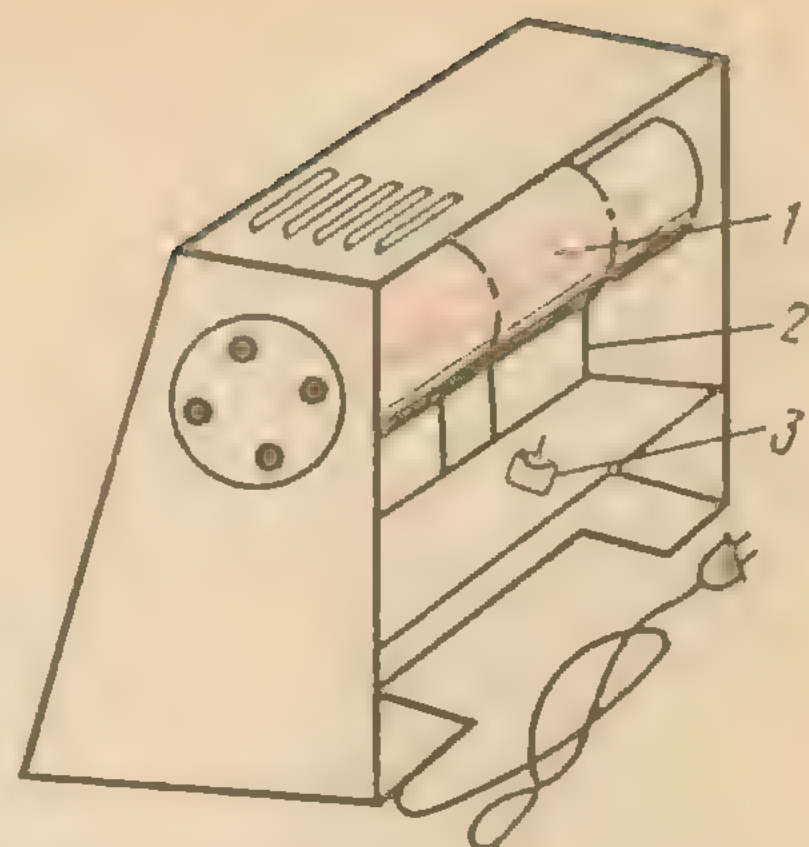
Люминесцентный анализ применяют во многих отраслях народного хозяйства, науки и техники. Очень велики возможности использования люминесцентного анализа и в сельском хозяйстве.

При помощи люминесцентного анализа можно выявить заболевания и повреждения картофеля, лука репчатого, чеснока, моркови, свеклы, брюквы и т. д., определить наличие спорыньи в муке, примесь минерального масла к растительному, выявить скрытые формы порчи мяса, рыбы, зерна, оценить качество молока и его продуктов, фруктовых соков и вин, яиц и т. д. Можно правильно распознать отдельные сорта семян, морфологически сходные между собой и трудно различимые по внешним признакам, съедобные и ядовитые грибы и т. п.

Простейший аппарат для люминесцентного анализа представляет

Рис. 23.5 Схема аппарата для люминесцентного анализа:

1 — лампа ДРТ; 2 — окно со светофильтром УФС;
3 — исследуемый объект.



собой ящик (рис. 23.5), состоящий из двух отделений. В верхнем отделении находится ртутно-кварцевая лампа 1 типа ДРТ. Между верхним и нижним отделением установлен светофильтр 2 типа УФС-3. В нижней части помещают исследуемые объекты. Пусковые приспособления можно монтировать отдельно. Верхняя часть должна иметь хорошую вентиляцию (отверстия в задней части и по бокам и щели с козырьками сверху). Светофильтр нельзя размещать ближе 200...250 мм от лампы. Работу проводят в затемненном помещении.

В настольном ультрафиолетовом осветителе типа КИ-1-Н, выпускаемом промышленностью, применена лампа СВД-120А и светофильтр УФС-4 с максимумом пропускания на волне 365 нм.

Во время проведения работы необходимо соблюдать правила техники безопасности и в первую очередь следить за тем, чтобы излучения через фильтр не попадали в глаза.

23.4. ИСТОЧНИКИ ИНФРАКРАСНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Природа инфракрасных излучений также электромагнитная: при нагреве тел усиливается колебательное движение молекул, сопровождающееся излучением электромагнитных колебаний, длины волн которых соответствуют инфракрасным излучениям (см. табл. 22.1).

Солнечный спектр богат инфракрасными излучениями, особенно в диапазоне волн от 760 до 500 нм. На долю этих волн приходится основная часть солнечной тепловой энергии.

В качестве искусственных источников инфракрасных излучений могут быть использованы любые тела, нагретые до высокой температуры. Хорошим источником этих излучений является обычная лампа накаливания, которая превращает в тепловые излучения до 65% всей подводимой к ней энергии. Но использовать лампы накаливания в качестве источников тепловых излучений неэкономично.

В практике получили распространение специальные лампы накаливания — термизлучатели, которые предназначены для сушки разных изделий, материалов, окрашенных поверхностей, продуктов и т. д.

Промышленность выпускает лампы-термизлучатели (зеркально-сушильные лампы) типов ЗС-2 (127 В, 250 Вт), ЗС-1 (127 В, 500 Вт), ЗС-3 (220 В, 550 Вт) и др. Колба параболической формы этих ламп изнутри покрыта зеркальным слоем. Температура нити накала понижена по сравнению с нормальными осветительными лампами аналогичной мощности, в результате чего срок службы увеличивается до 2000...10 000 ч вместо 1000 ч у осветительных ламп накаливания.

Тело накала располагается в фокусе параболической части колбы и дает концентрацию лучистого потока в определенном направлении. Эти лампы не требуют дополнительных отражающих устройств, что очень удобно в эксплуатации. Они рассчитаны на использование при температуре окружающей среды не выше 70°C. Поэтому цоколи защищают от действия высоких температур.

Колбы ламп сверху защищены от попадания холодных капель воды на их раскаленную поверхность, так как это может привести к преждевременной порче лампы. Их нельзя применять в помещениях, содержащих горючие пары и газы.

23.5. ПРИМЕНЕНИЕ ИНФРАКРАСНЫХ И РЕНТГЕНОВСКИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Инфракрасные излучения хорошо проникают внутрь органических материалов. Поэтому их целесообразно использовать для сушки сельскохозяйственных продуктов: фруктов, овощей, зерна, грибов, орехов и т. д. При сушке зерна одновременно можно проводить дезинсекцию от вредителей (например, амбарного долгоносика, мучного клеща и т. д.). Широкое распространение находит инфракрасная сушка лакокрасочных покрытий. Излучения проникают через слой краски, отражаются от металла, и сушка идет из глубины. Они могут применяться для быстрого прогрева поверхности перед окраской, лужением, пайкой или при горячей посадке деталей и для сушки древесины и т. д. Хорошие результаты дает использование инфракрасных излучений для обогрева молодняка сельскохозяйственных животных и птицы в холодное зимнее время, а также при лечении животных.

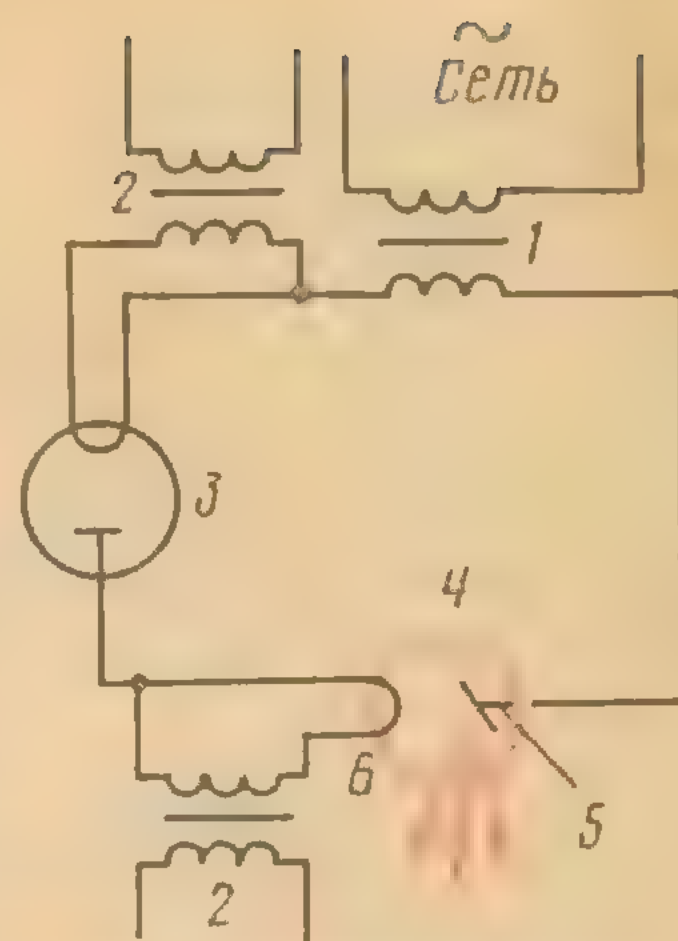
Для облучения поросят в станке отгораживают горизонтальными планками угол площадью 0,5 м² так, чтобы туда могли свободно заходить только поросята. Лампу 500 Вт подвешивают на высоте 1 м в центре отгороженного участка. Новорожденных поросят первые три дня облучают до 20 ч в сутки. Затем продолжительность облучения постепенно сокращают до 10 ч и менее в зависимости от наружной температуры. К полуторамесячному возрасту облучение прекращают. При облучении обычно не наблюдается простудных заболеваний, рост идет более интенсивно. К 12...16-дневному возрасту поросята охотно пользуются подкормкой.

Инфракрасные лампы применяют также и для обогрева цыплят в неотапливаемых помещениях. Четыре лампы по 250 Вт используют в установке, рассчитанной на обслуживание 400 цыплят. Высоту подвеса ламп меняют (40...80 см) в зависимости от возраста цыплят. На первые две недели обогреваемое место должно быть отгорожено небольшим плотным барьером (от сквозняков). Облучатель, состоящий из лампы ЗС и специальной арматуры, имеет марку ИКО.

Для одновременного ультрафиолетового и инфракрасного облучения выпускаются установки ИКУФ-1. Облучатель имеет две инфракрасные лампы типа ИКЗК-220-250 и одну ультрафиолетовую типа ЛЭ-15. Установка состоит из комплекта на 40 облучателей, общая ее мощность 22 кВт.

рис. 23.6. Устройство рентгеновской установки с одним кенотроном:

1 — повышающий трансформатор; 2 — трансформаторы для цепей накала газотрона и трубки; 3 — газотрон для выпрямления тока высокого напряжения; 4 — рентгеновская трубка; 5 — антиматод; 6 — катод.



Один из недостатков использования инфракрасных ламп — отсутствие резервирования теплоты на случай перерыва в электроснабжении.

В медицине инфракрасные излучения используются при лечении самых различных заболеваний. Излучения хорошо проникают в ткани и вызывают их нагрев. Усиливается активность клеток ткани. Инфракрасные излучения усиливают кровоток в слоях кожи, увеличивают обмен между кровью и тканями, ускоряют выделение токсинов и вызывают образование пигментов, играющих в организме защитную роль. Через посредство реакций крови и нервной системы облучение воздействует на функции желез и обмен веществ. Поэтому инфракрасное облучение применяется для лечения заболеваний лимфатической системы, суставных заболеваний, абсцессов, экзем и кожных сыпей, а также различных травм и т. д.

Рентгеновские излучения обладают мощным проникающим и биологическим действием. Для их получения применяют специальные рентгеновские аппараты. Одна из схем такого аппарата приведена на рисунке 23.6.

Высокое напряжение вторичной обмотки трансформатора 1 выпрямляется газотроном 3 и подается на рентгеновскую трубку 4. Под действием высокого потенциала электроны, образованные катодом 6, устремляются к антиматоду 5, представляющему собой пластинку из тугоплавкого металла, расположенную под углом 45° к оси потока электронов. Удар быстрых электронов о твердое тело (антиматод) вызывает поток рентгеновских излучений.

Рентгеновские излучения хорошо проходят через организмы, ионизируя атомы, составляющие тело организма, и нарушают при этом систему планетарных электронов этих атомов. При длительном облучении живые клетки погибают. При облучении семян большими и мощными дозами рентгеновских излучений растения получали различные изменения, несвойственные им. Чаще изменения носили отрицательный характер, однако иногда эти изменения были положительными. Наиболее широко рентгеновские излучения применяются для диагностики в медицине, а также для дефектоскопии (определении дефектов в металлических деталях) в технике.

23.6. РАЗЛИЧНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

К излучениям Рентгена близки по своим свойствам гамма-излучения, возникающие при радиоактивном распаде. Кроме гамма-излуче-

ний, при распаде образуются альфа- и бета-излучения. Альфа-, бета- и гамма-излучения объединяются общим термином «ионизирующие излучения». Они имеют широкую перспективу применения в сельском хозяйстве для стимуляции жизненных процессов в растениях и живых организмах, для получения биологических изменений в живых организмах, включая и получение новых сортов сельскохозяйственных растений, для стерилизации продуктов сельского хозяйства, уничтожения вредителей — насекомых, для контроля за технологическими процессами, для сигнализации, автоматизации, для изучения жизненных процессов в растениях, живых организмах, почве и т. п.

В ряде случаев в сельскохозяйственном производстве требуется не стимулирование, а некоторое угнетение жизненных процессов, например при хранении картофеля. Воздействие соответствующими дозами ионизирующих излучений предохраняет картофель от прорастания. Снижаются дыхание картофеля и потеря питательных веществ за время хранения. Имеются производственные установки для обработки картофеля таким образом. Установка может работать с использованием конвейера, на котором картофель проходит через туннель с мощным источником излучения, или же источник излучения устанавливают прямо в хранилище.

Эти излучения могут быть использованы для регулирования жизнедеятельности полезных микроорганизмов. Так, например, дрожжи после облучения вырабатывают значительно больше эргостерина — продукта, из которого получают витамин D и некоторые другие медицинские препараты. Большие дозы облучения способны вызвать наследственные изменения в микроорганизмах. Таким путем была получена промышленная культура грибка пенициллина, способная вырабатывать в сотни раз больше пенициллина, чем исходная культура, найденная в природе.

Гамма-излучения при определенных дозах убивают микроорганизмы и насекомых. Облучая продукты и улетая, таким образом, микроорганизмы, которые вызывают их порчу, добиваются увеличения срока хранения продуктов. Облучение мяса позволяет уничтожать личинки паразитических червей (глистов).

Лучевую пастеризацию и стерилизацию проводят обычно под землей в специальных помещениях или на поверхности в помещениях с толстыми бетонными стенами, защищающими обслуживающий персонал от излучений. Для облучения используют радиоактивный кобальт-60 или цезий-137. С целью предотвращения химических изменений, нарушения внешнего вида и вкуса рекомендуется продукты перед стерилизацией замораживать или вводить в них специальные защитные средства, например витамин С. Уничтожать вредных насекомых по этому методу можно непосредственно в земле, зерне, древесине. Если доза даже не смертельна, насекомые делаются бесплодными, а развитие личинок останавливается. Практические приемы по облучению еще недостаточно разработаны.

Гамма-излучения используются также для контроля за качеством ремонтных и сварочных работ. В этом случае заменяют рентгеновский

аппарат источником гамма-излучений, деталь просвечивают и фотографируют.

При автоматизации ионизирующие излучения применяют, например, для контроля уровня жидкости, толщины изделия, влажности и плотности материалов, скорости газов, давления и т. д.

В борьбе со статическим электричеством, которое может стать причиной пожаров на предприятиях (мельницах, деревообделочных и др.), используют альфа-излучения, испускаемые радиоактивным полонием-210. Эти излучения ионизируют воздух, делают его электропроводящим и препятствуют накоплению статических зарядов. Металлические пластинки со слоем радиоактивного полония-210 подвешивают у мест образования статического электричества. Альфа-излучения распространяются от источника излучения на 10...15 см, поэтому они будут безопасны для людей, если места их расположения выбрать правильно. Ионы смешиваются с воздухом и уносятся из помещения.

23.7. МЕТОД МЕЧЕНЫХ АТОМОВ

Метод меченых атомов помогает решать важнейшие задачи, связанные с жизнедеятельностью растений и живых организмов. Этот метод позволяет исследовать механизм усвоения растениями удобрений при различных способах его внесения и различных почвенно-климатических условиях, изучать фотосинтез в растениях, вопросы обмена веществ, усвоения кормов животными в зависимости от различных факторов и т. п. Принцип метода заключается в том, что к удобрениям или кормам подмешивают радиоактивный изотоп того элемента, влияние которого на организм исследуется (углерод, водород, кислород, сера, фосфор, кальций и др.). Радиоактивный изотоп усваивается организмом так же, как и стабильный изотоп данного элемента. Но движение его в организме можно проследить при помощи приборов — счетчиков радиоактивных частиц.

Если, например, хотят проследить скорость усвоения фосфора в зависимости от способа его внесения в почву в составе суперфосфата, то некоторое количество радиоактивного фосфора P_{32} смешивают с суперфосфатом. Полученную смесь вносят под растение. Радиоактивный фосфор испускает бета-излучения. При помощи счетчика радиоактивных частиц следят за появлением радиоактивного излучения в различных частях растения.

По времени его появления можно судить о скорости усвоения фосфора растением, а по интенсивности излучения — о количестве усвоенного фосфора.

К работе с мечеными атомами допускаются только лица, которые прошли специальный курс обучения, знают правила безопасности при обращении с радиоактивными изотопами и имеют специальное разрешение на работу с ними. Лица, не имеющие этой подготовки, не прошедшие специальной подготовки и не имеющие специального удостоверения, к работе с изотопами не допускаются, ибо нарушение правил безопасности при

работе с ними может повлечь за собой опасное заболевание лучевой болезнью.

Контрольные вопросы к главе 23. 1. Что вы знаете об ультрафиолетовых излучениях области А, области В и области С? 2. Расскажите об источниках ультрафиолетовых излучений. 3. Для каких целей используются эритемные лампы? Как выбрать их мощность для помещения? 4. Что надо знать при использовании бактерицидных ламп? 5. Где может найти применение в сельском хозяйстве люминесцентный анализ? 6. Какие вы знаете источники инфракрасных излучений? 7. Что вы знаете о рентгеновских излучениях и об их использовании в сельскохозяйственном производстве? 8. Что такое ионизирующие излучения и для чего они могут быть использованы в сельском хозяйстве?

Глава 24. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ НАГРЕВА. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ

24.1. ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ЦЕЛЕЙ

Использование электрической энергии для тепловых целей постоянно расширяется. При решении вопроса о применении электронагревательных приборов необходимо помнить, что им следует отдавать предпочтение, когда по технологии производства требуется точно поддерживать температуру (в инкубаторах, пастеризаторах, хранилищах и т. п.), когда электронагрев приводит к значительному росту производительности труда (нагрев воды на ферме, электросушилки и т. п.), когда есть возможность использовать энергию в ночные часы, так как электростанции не нагружены промышленными предприятиями (аккумуляционный водонагрев), и т. д.

Электрический обогрев жилищ в сельской местности в ряде случаев может оказаться экономичнее обогрева дровами или углем. Это можно показать следующим расчетом.

Стоимость 1000 кДж энергии, полученной от любого вида топлива,

$$D_T = \frac{1000 C_T}{\Theta \eta}, \quad (24.1)$$

где C_T — стоимость топлива, руб/кг (уголь, нефть) или руб/м³ (дрова); Θ — удельная теплота сгорания топлива (для дров 5050 тыс. кДж/м³, для антрацита 27 300 кДж/кг); η — тепловой КПД печи, равный 0,35 для угольной или дровяной.

Стоимость топлива складывается из его себестоимости на месте добычи и расходов на транспортирование.

Для электроэнергии стоимость 1000 кДж

$$D_E = \frac{1000 C_E}{100 \cdot 3600 \eta_e} = \frac{C_E}{360 \eta_e}, \quad (24.2)$$

где C_E — стоимость электроэнергии [коп/(кВт · ч)]; η_e — КПД прибора (при внутренней установке КПД близок к единице).

Таким образом, можно сравнить, что дешевле — уголь, дрова или электроэнергия.

Вторая часть расчетов — определение примерной мощности на обогрев и расхода электроэнергии в год.

Мощность на обогрев

$$P = ap (\tau_{\text{вн}} - \tau_{\text{н}}), \quad (24.3)$$

где a — удельная тепловая характеристика [для многоквартирного дома $p = 0,87$ Вт/(м²·град)]; α — коэффициент, учитывающий местные климатические условия (главным образом, ветры) и равный от 1,2 до 1,4; $\tau_{\text{вн}}$ — температура внутри помещения (принимается равной 18°С); $\tau_{\text{н}}$ — среднесуточная температура за самый холодный месяц года.

При подсчете необходимой для электроотопления энергии за весь отопительный сезон можно пользоваться следующей формулой:

$$W = ap (\tau_{\text{вн}} - \tau_{\text{ср.сез}}) T, \quad (24.4)$$

где $\tau_{\text{ср.сез}}$ — средняя наружная температура за сезон, °С; T — продолжительность отопительного сезона, ч.

Расчеты показывают, что если отпускная цена на дрова более 20 руб. за 1 м³, то отопление электричеством выгоднее даже при стоимости электроэнергии 4 коп/(кВт·ч). При стоимости тонны угля 50 руб. электроотопление будет целесообразнее при стоимости 1 кВт·ч менее 2 коп.

Особенно выгодно электроотопление при удешевленном ночном тарифе и использовании печей с аккумулятированием теплоты в ночное время.

24.2. ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ БЫТОВЫХ ЦЕЛЕЙ

Использование электрических плит и плиток может обеспечить значительную экономию топлива.

При сравнении эффективности электроплит с огневыми и газовыми плитами следует учитывать то обстоятельство, что КПД огневых плит при использовании их только для приготовления пищи (а не для обогрева жилища) составляет 12...13%. Поэтому применение их может быть рационально только в холодное время года. Газовые плиты имеют КПД от 20 до 40%, керосинки — около 30%, электрические плиты — от 40% и более. Одинаковая стоимость приготовления пищи на газе (при газификации) и электроэнергии соответствует стоимости электроэнергии до 1,65 коп/(кВт·ч). При введении двойного тарифа на электроэнергию (стоимость электроэнергии, потребленной в ночные часы, в 2 раза меньше, чем в дневное время) становится целесообразным применять аккумулятирующие электронагреватели.

С расширением применения электрических нагревательных приборов растет годовое потребление электроэнергии на душу населения.

Годовое потребление электроэнергии одной семьей при использовании бытовых электроприборов, приведенных в таблице 24.1, в домах с плитами на сетевом газе составляет 1125...1560 кВт·ч.

24.1. Наиболее массовые электроприборы, используемые в быту, и средняя продолжительность их работы в году

Приборы	Установленная мощность, Вт	Продолжительность работы в году, ч	Годовое потребление электроэнергии одним прибором, кВт · ч	Примечание
Телевизор	150...250	1000	150...250	На одну семью
Холодильник	160	1875	300	То же
Стиральная машина:				
без подогрева воды	600	130	65	На семью из 4 человек
с подогревом воды	2200	260	300	То же
Пылесос	400	850	320	—
Освещение	400	260	300	Для квартиры площадью 45 м ²
Утюг	700	120	65	На семью из 4 человек
Плита	5800	1400	1200	То же
Плитка переносная	800	600	350	То же
Малые приборы	—	—	100...200	—

в домах с электроплитами — 2325...2760 кВт · ч, в домах с плитами на сжиженном газе и твердом топливе — 1475...1810 кВт · ч.

Существуют следующие способы обогрева жилищ и производственных помещений.

1. Трубчатыми нагревателями, устанавливаемыми в помещении по плинтусу.

2. Различными по форме и размерам теплоизлучающими панелями из стекла, пластмассы или металла. Эти панели устанавливают в окнах или на стенах.

3. Калориферами, состоящими из электронагревателей и вентиляторов, устанавливаемых в системе централизованного вентилирования или в вентиляционных вводах в каждой комнате.

4. Нагревательным проводом или кабелем, укладываемым в канавках бетонного пола.

5. Легкими нагревательными листами типа фольги, наклеиваемыми на потолок.

6. Теплоаккумулирующими печами, внутренний слой которых нагревается ночью за счет более дешевой ночной электроэнергии. Нагревательный слой окружен теплоизолирующим слоем. Запасенная теплота поступает в помещение под действием вентилятора через воздушные каналы.

7. Автоматизированным и аккумуляторным (в ночные часы) нагревом в электродных котлах воды, которая циркулирует в системе центрального отопления.

8. Электроэнергетическими установками или тепловыми насосами, принцип действия которых изложен ниже.

24.3. ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОНАГРЕВА В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ

Электрический нагрев можно экономически эффективно применять более чем в 50 производственных процессах. Вот только некоторые из этих процессов.

Молочное животноводство и свиноводство: нагрев воды в моечных и кормокухнях, на доильных площадках, в системах автопоения, в групповых поилках (при беспривязном и бесстаночном содержании животных), в душевых камерах и бассейнах для мытья животных; электропаровая стерилизация молочной посуды и частей доильной машины; запаривание сочных кормов; запаривание картофеля на силос; подготовка концентрированных кормов; электросилосование грубых кормов; выпечка кормового хлеба; сквашивание молока на ацидофилин; искусственная выпойка поросят и ягнят; пастеризация молока, сливок и обрата; местный обогрев пола в репродуктивных свинарниках; обогрев акклиматизационных площадок для поросят-отъемышей; местный обогрев пола на скотных дворах с высокоудойными коровами; вентиляция с подогревом свежего воздуха в репродуктивных свинарниках, в телятниках; обсушка новорожденных животных.

Птицеводство: инкубация, отопление и вентиляция помещений, обогрев птичников; подогрев воды в поилках.

Шелководство: кондиционирование воздуха в червоводнях; нагрев коконов.

Пчеловодство: выводка детки; обогрев ульев; распечатка сотов; впаивание вошины.

Растениеводство в открытом грунте: яровизация картофеля; тепловое протравливание семян; сушка зерна и семян на селекционных станциях; сушка плодов, овощей, грибов, хмеля, хлопка; активное вентилирование сена с подогревом воздуха; ферментация чая и табака.

Растениеводство в закрытом грунте: обогрев зимних и весенних парников для выращивания рассады, овощей, хлопка, табака, сеянцев цветов, черенков садовых культур; обогрев теплиц; обогрев помещений для культуры шампиньонов; обогрев ящиков для стратификации виноградных прививок; дозревание помидоров; стерилизация почвы и рассадопосадочного материала.

Сельскохозяйственные мастерские: горячая промывка тракторных деталей; регенерация масел; вулканизация авторезины; плавка антифрикционных сплавов; наплавка деталей; сварка и т. д.

Кроме чисто электрического нагрева, в сельском хозяйстве перспективно применять комбинированный нагрев. При этом основная доля теплоты получается от систем с угольным, газовым или на жидком топливе обогревом, а дополнительный нагрев в целях повышения эффективности процесса или установки осуществляется от электроустановок.

Когда обогрев краткосрочный, а также когда требуется точное поддержание температуры, электрические приборы и установки — вне конкуренции. Лишь при необходимости длительного постоян-

ного обогрева с большим выделением теплоты экономически целесообразно применять централизованную теплофикацию.

Производительность труда при применении электронагревательных установок промышленного назначения выше, чем при газовом нагреве.

Удобство эксплуатации, широкая возможность автоматизации нагрева в комплексе автоматизированных процессов дают основание рассчитывать в перспективе на значительный рост использования электрической энергии для удовлетворения потребности сельскохозяйственного производства в тепловой энергии.

При определении границ целесообразного использования электроэнергии для получения горячей воды и пара в животноводстве можно пользоваться следующим соотношением:

$$C_{\text{эн}} \leq \frac{3600 C_{\text{т}} \eta_{\text{эн}} K_{\text{р}}}{\theta_{\text{н}} \eta_{\text{тн}}}, \quad (24.5)$$

где $C_{\text{эн}}$ — стоимость 1 кВт·ч электрической энергии, коп.; $C_{\text{т}}$ — стоимость 1 кг топлива, коп.; $\eta_{\text{эн}}$ — КПД электронагревателя (принимается равным 0,9...0,98); $\eta_{\text{тн}}$ — КПД огневого прибора (для котлов-парообразователей равен 0,35...0,55); $K_{\text{р}}$ — коэффициент, учитывающий добавочные затраты на рабочую силу, обслуживающую огневые установки для котлов-парообразователей (принимается равным 1,25...1,5); $\theta_{\text{н}}$ — удельная теплота сгорания топлива, кДж/кг.

24А. ЭЛЕКТРООБОГРЕВ В ЗАЩИЩЕННОМ ГРУНТЕ

При решении вопроса об эффективности применения электронагрева в защищенном грунте необходимо учитывать назначение того или иного сооружения защищенного грунта, его конструкцию, срок эксплуатации, вид выращиваемой культуры.

В остекленных зимних теплицах можно выращивать рассаду овощных культур, плодоносящие огурцы или томаты, лук на перо, салаты и т. д. Пока, как правило, электрообогрев зимних теплиц экономически нецелесообразен. Но эффективен местный подогрев почвы, например, под рассадой при высокой плотности посадки растений, при выгонке лука на перо, салата-витлуфа на зелень и т. д. В ряде случаев бывает целесообразен дополнительный электрообогрев в системе водяного централизованного обогрева, автоматически включаемый при снижении температуры внутри теплиц ниже критической.

В весенних теплицах, укрытых стеклом или пленкой и обогреваемых за счет солнечной радиации, для сохранения растений при ночных резких снижениях температур целесообразно устраивать систему аварийного электроподогрева. Ее использование позволяет также начинать эксплуатацию весенних теплиц на 10...14 дней раньше. При этом система должна быть автоматизированной, поддерживающей температуру только на минимально необходимом уровне без затраты энергии на малоэффективный избыточный нагрев.

В ранневесенних парниках под остекленными рамами можно устроить электрообогрев почвы и воздуха, если есть избыточная дешевая электроэнергия. В этом случае надо провести технико-

экономическое сравнение возможных вариантов обогрева и принять более дешевый.

В поздневесенних солнечных парниках под пленкой, обогреваемых за счет солнечной радиации, целесообразно применять систему дополнительного автоматизированного обогрева воздуха для предупреждения губительных последствий заморозков.

Для выгонки салатного цикория-виглуфа, не нуждающегося в освещении, эффективны грядки-стеллажи с автоматизированным электронагревом, устраиваемые непосредственно в хранилищах.

В районах с продолжительной и холодной зимой, а также на Крайнем Севере целесообразно выращивать растения в подземных, хорошо теплоизолированных помещениях с использованием искусственного освещения люминесцентными лампами и лампами типа ДРЛ, которые и обогревают помещения в достаточной мере.

Мощность на обогрев

$$P = KF (\tau_{\text{в}} - \tau_{\text{н}}), \quad (24.6)$$

где P — мощность, Вт; F — площадь поверхности укрытия, через которую сооружение теряет теплоту, м^2 ; $\tau_{\text{в}}$ — необходимая внутренняя температура для растений, при защите от заморозков холодостойких культур (редис, салат) может быть принята равной $+4^\circ\text{C}$, а для теплолюбивых (огурцы, помидоры) $+12^\circ\text{C}$; $\tau_{\text{н}}$ — минимальная наружная температура в период выращивания растений; может быть принята равной среднемесячной минимальной за последние 5...10 лет для данного района, $^\circ\text{C}$; K — коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град.})$ —

Для остекленных теплиц и парников $K=6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град.})$; для парника под остекленными рамами и соломенными матами $K=3$; для остекленных парников с покрывалом из плотной бумаги $K=4$; при использовании поролоновых покрывал $K=2,1$; для укрытий из пленки $K=10...13$; для солнечных парников с укрытием из пленки с дополнительным покрывалом из плотной бумаги $K=5,5$; для подвалов и подземных, хорошо утепленных сверху помещений $K=1,5...2,0 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{град.})$.

Пример 24.1. Определить ориентировочную мощность системы ночного воздушного аварийного обогрева для солнечного парника под пленкой ($K=10$) с площадью укрытия $F=30 \text{ м}^2$ при выращивании цветной капусты ($\tau_{\text{в}}=+4^\circ\text{C}$); ожидаемая минимальная ночная температура в апреле $\tau_{\text{н}}=-6^\circ\text{C}$.

Решение. Необходимая мощность

$$P = KF (\tau_{\text{в}} - \tau_{\text{н}}) = 10 \cdot 30 [4 - (-6)] = 10 \cdot 30 (4 + 6) = 3000 \text{ Вт} = 3 \text{ кВт}.$$

Целесообразно использовать стандартизованные обогревающие комплекты для обогрева сооружений защищенного грунта.

Автоматизированные системы обогрева дают значительную экономию электроэнергии по сравнению с неавтоматизированными. Расход электроэнергии при автоматизации может быть в 4...5 раз меньшим. На рисунке 24.1 показано, как меняется естественная температура в последних числах марта, в начале апреля под пленочными укрытиями солнечных парников в ясный и облачный день (для Подмосковья).

В дневные часы за счет солнечной радиации под пленкой обеспечивается температура, благоприятная для развития холодостойких

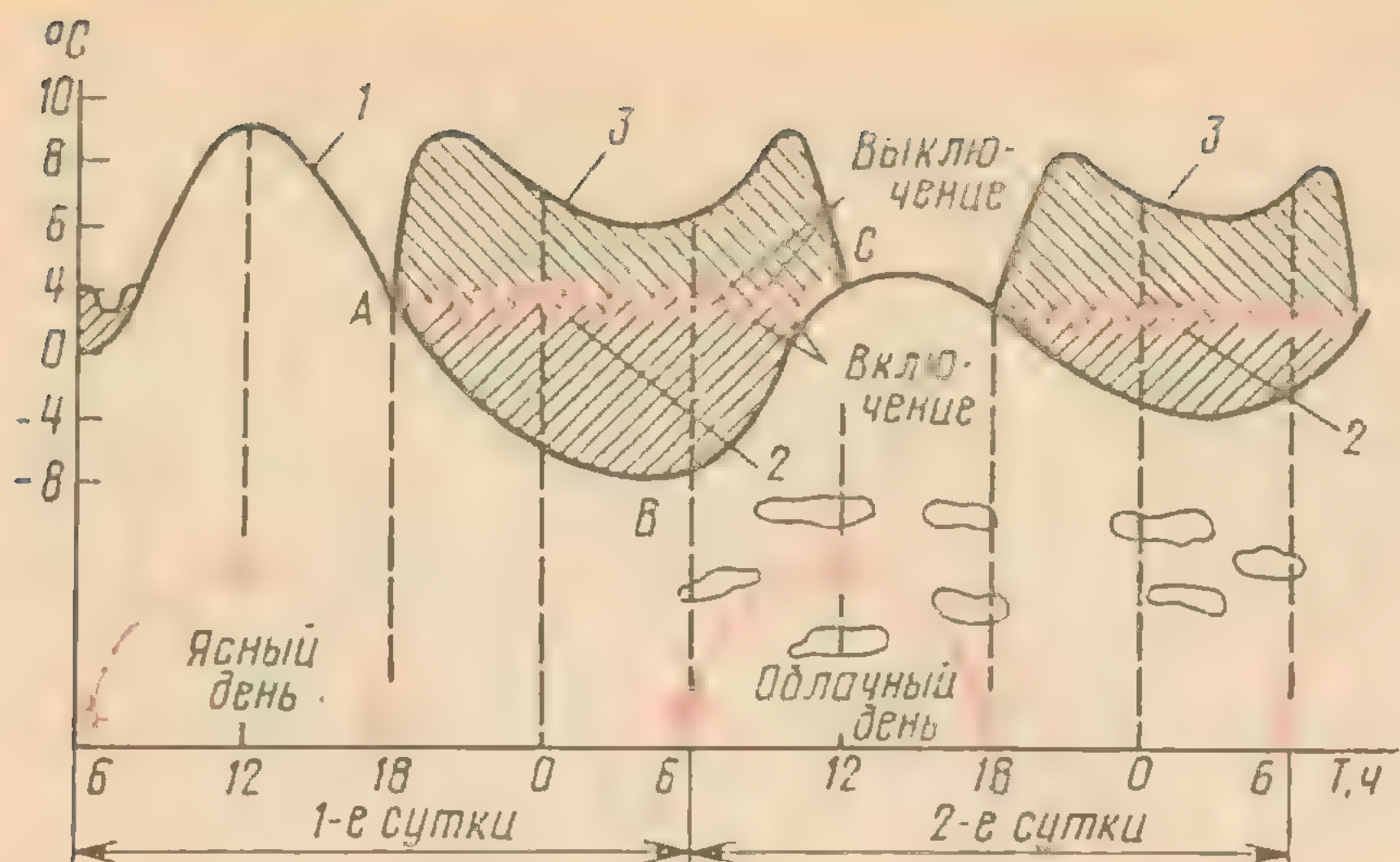


Рис. 24.1. Примерное изменение температуры воздуха под пленочным укрытием солнечных парников:

1 — естественная температура в парнике; 2 — температура при автоматическом включении и выключении системы дополнительного подогрева воздуха; 3 — температура под пленкой при постоянном включении системы обогрева (неавтоматизированная система).

культур. Однако ночью, особенно безоблачной, запасенная днем теплота уходит из парника и температура падает (в первый день в точке В до -8°C). Чтобы удержать температуру на уровне $+4^{\circ}\text{C}$, можно воспользоваться автоматизированной или неавтоматизированной системой обогрева. При автоматизированной системе температура будет изменяться в виде ломаной линии 2, верхние точки которой соответствуют моментам отключения системы, а нижние — моментам включения. Расход энергии будет пропорционален площади ABC . Если же система не автоматизирована (линия 3) и включается вручную при снижении температуры до $+4^{\circ}\text{C}$, расход энергии возрастет более чем вдвое.

При облачной погоде ночное снижение температуры несколько меньше. Расход энергии при неавтоматизированной системе будет в 3 раза больше, чем при автоматизированной.

Кроме того, автоматическое управление нагревом происходит без непосредственного участия оператора, в то время как при неавтоматизированной системе он следит за изменением температуры, включает и выключает нагреватели.

Из других применений электротеплоты в овощеводстве защищенного грунта следует отметить стерилизацию почвы, главным образом в небольших количествах под рассаду. Расход энергии на нагрев почвы до $96...98^{\circ}\text{C}$ составляет $45...50 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / \text{м}^3$. Стерилизаторы могут быть электродного типа, когда ящик, в котором нагревается почва, перегороден пластинами-электродами, равноотстоящими друг от друга, и к ним подводится напряжение. Нагрев осуществляется за счет прохождения тока непосредственно в почве. В элементных стерилизаторах нагрев почвы идет от труб с вложенными в них проволочными нагревателями. Трубы с нагревателями располагают в

шахматном порядке вдоль ящика-стерилизатора с расстоянием между ними 20...25 см.

При стерилизации рассады овощей, а также посадочного материала плодово-ягодных культур большой эффект дают ванны-стерилизаторы, вода в которых нагревается автомагизированным нагревателем. Это позволяет установить строго заданную температуру (например, точно 46°C для черенков смородины, рассады садовой земляники и т. д.).

24.5. ЭЛЕКТРОНАГРЕВАТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ В ЖИВОТНОВОДСТВЕ

В животноводстве широкое применение получили серийные электронагревательные установки, которые помогают обеспечить микроклимат в помещениях для животных и птицы, нагреть воду для технологических целей и поения животных, устроить местный обогрев молодняка. Эти установки имеют целый ряд преимуществ перед теплообеспечением от котельных и котлов: полная автоматизация нагрева воды, воздуха, пола и т. д.; отсутствие постоянного дежурного персонала; высокие гигиенические условия труда; меньшая пожаро- и взрывоопасность; отсутствие складов топлива. Перечень наиболее широко применяемых в животноводстве установок приведен в таблице 24.2.

Электрокотлы, потребляющие значительную мощность из сети, целесообразно использовать с теплоаккумулирующими емкостями, чтобы обеспечить работу котлов в часы, когда в графике нагрузки имеются провалы, главным образом ночью. Для предотвращения накипеобразования используют противонакипные магнитные устройства.

24.2. Электронагревательные установки для животноводства

Электронагревательные установки	Основные параметры
Электронагреватели-термосы: УАП-1600	Производительность 1600 л воды за 4 ч, мощность 50 кВт
ВЭТ-400	Производительность 400 л воды за 4 ч, мощность 10,5 кВт
Проточный электроводонагреватель (автоматизированный) ЭИВ-2А	Производительность 120 л/ч при 80° С, мощность 10,5 кВт
Водогрейные котлы электродные типа ЭПЗ-100/0,4	Мощность 100 кВт
Электродно-паровые воздушно-отопи- тельные установки УЭПВО-130/0,4	Теплопроизводительность 0,5 ГДж/ч, мощность 130 кВт
Электродные паровые регулируемые кот- лы КЭПР	Паропроизводительность до 350 кг/ч, давление пара (0,7...6) 10 ⁴ Па, мощность 160, 250 кВт
Электрокалориферы ОКБ	Мощность 20, 40, 100 кВт, производи- тельность 3700...18 500 м ³ /ч
Электрокалориферы СФО	Мощность 25, 40, 60, 100, 160, 250 кВт, про- изводительность 2000...197 000 м ³ /ч
Электрокалориферные агрегаты СФОА	Мощность 25, 40, 60, 100 кВт

Для автоматического управления микроклиматом применяют терморегуляторы ПТР-2 или РТБ-2, влагорегуляторы ПЭ, СИР-104, ДРОВ-3 и др.

Широкое применение имеют установки для местного обогрева животных, в первую очередь молодняка. Это электрообогреваемые полы, панели и коврики (конвекционно-контактный обогрев); светлые излучатели с лампами, темные — с трубчатыми элементами (лучистый нагрев).

При обогреве свиноматок и откормочного молодняка удельная мощность для пола до 100 Вт/м², поросят-сосунов — 150...200, цыплят в южной зоне — 50...100, в средней полосе — 150...200 Вт/м². Полы устраивают в соответствии с утвержденными проектами.

Для местного обогрева поросят могут одновременно использоваться конвективно-контактные и лучистые обогреватели. При этом достигаются оптимальные условия комфорта. Удобно применять электронагревательные коврики. Для инфракрасного обогрева рекомендуются описанные выше ИКУФ, ИКО, а также устройства типа «Астра-12», ОКБ-1376А (темный) и др. По мере роста поросят высоту подвеса излучателей увеличивают (с 40 до 80 см). В течение суток они могут несколько раз включаться и отключаться автоматически по заданной программе от реле времени типа РВМ.

Для местного обогрева телят применяют также и конвективно-контактные и лучистые обогреватели. В индивидуальных станках обогревают до 20-дневного возраста излучателями с высотой подвеса 140...160 см и режимом — 1 ч включено, 30 мин выключено. Для телят от 20 дней до 2...3 месяцев целесообразен обогреваемый пол.

Эффективен обогрев ягнят в первые 10...15 дней жизни лучистыми обогревателями, например одна лампа инфракрасного излучения 500 Вт на каждые 15...20 м² площади пола при высоте подвеса 110 см. Сначала включают на 20 ч в сутки, а затем доводят до 10 ч при режиме — 1,5 ч включено, 1 ч выключено.

При обогреве цыплят при помощи подвешиваемых излучателей высота их подвеса меняется в зависимости от температуры в помещении от 75 (при 12°C) до 115 см (при 24°C). При устройстве обогреваемых полов целесообразно чередовать по всей длине пола обогреваемые и необогреваемые полосы.

Обогрев целесообразно сочетать с ультрафиолетовым облучением.

24.6. ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ПРИ ПОМОЩИ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ. КОНДИЦИОНЕРЫ

В тепловом насосе теплота от источника с низкой температурой переносится к источнику теплоты с более высокой температурой. На рисунке 24.2 приведена схема отопления жилых домов 3 за счет теплоты, отнимаемой от низкопотенциального источника (река, термальные подземные воды, тепловые отходы промышленного производства). Теплота переносится рабочей жидкостью (агентом) с низкой температурой кипения (фреон, аммиак и др.), циркулирующей в замкнутой системе теплового насоса. Это происходит следующим

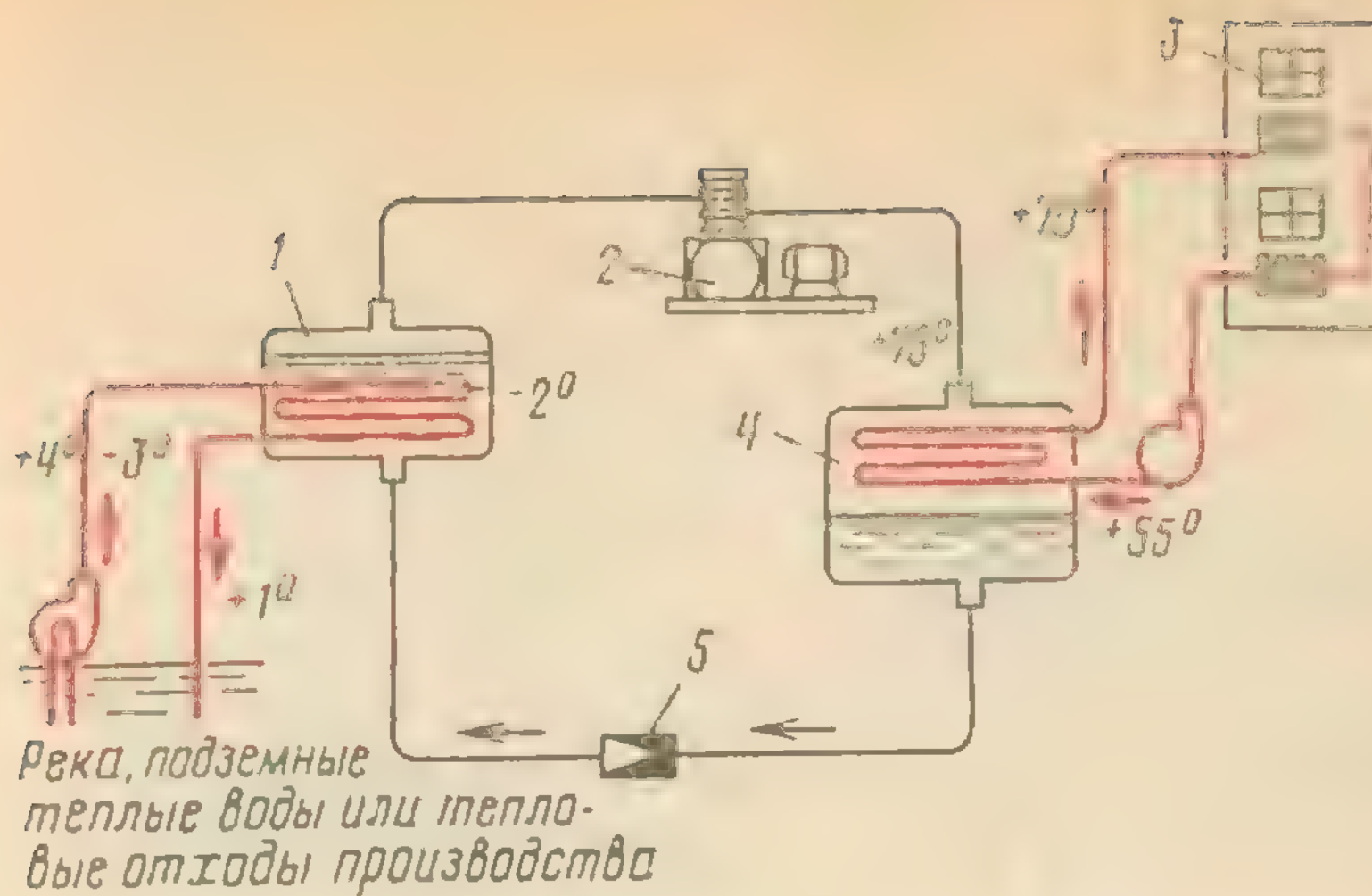


Рис. 24.2. Схема обогрева жилых домов при помощи теплового насоса:

1 — испаритель; 2 — компрессор; 3 — отапливаемые дома; 4 — конденсатор; 5 — дроссельный вентиль.

образом. Компрессор 2 создает разрежение в испарителе 1, благодаря чему жидкость-агент кипит при $t = -2^\circ\text{C}$. Процесс кипения форсируется подачей в змеевик подогрева воды от низкопотенциального источника теплоты (на рисунке от подледной воды при $t = +4^\circ\text{C}$). Эта вода, охлаждаясь, передает свою теплоту жидкости-агенту. Пары агента компрессор нагнетает в конденсатор 4, где за счет высокого давления температура паров агента поднимается (на рисунке до $+75^\circ\text{C}$). В змеевике конденсатора циркулирует вода из системы отопления домов. Пары агента охлаждаются и конденсируются, а температура воды в системе обогрева увеличивается (на рисунке с $+55^\circ$ до $+70^\circ\text{C}$). Сконденсировавшийся агент через дроссельный вентиль 5 снова поступает в испаритель 1 и т. д.

Электроэнергия затрачивается здесь лишь на привод компрессора и насосов. По сравнению с прямым электронагревом расход электроэнергии будет меньше в 2,5...3 раза, в зависимости от температурных условий и качества применяемых материалов.

Тепловые насосы применяют для отопления ряда объектов. Перспективно применение тепловых насосов при экономической целесообразности децентрализованного теплоснабжения, то есть в районах с малой тепловой нагрузкой при дорогом топливе. Особенно целесообразно применять тепловые насосы там, где надо получать и теплоту и холод, или там, где зимой требуется отапливать помещение, а летом — охлаждать. В сельском хозяйстве наиболее перспективно применять тепловые насосы в животноводстве. Например, уже находят применение тепловые насосы для охлаждения молока и одновременного нагрева воды в системе центрального отопления служебных помещений.

Пока стоимость установок с тепловыми насосами еще высока, так как нет их массового серийного изготовления. Однако они

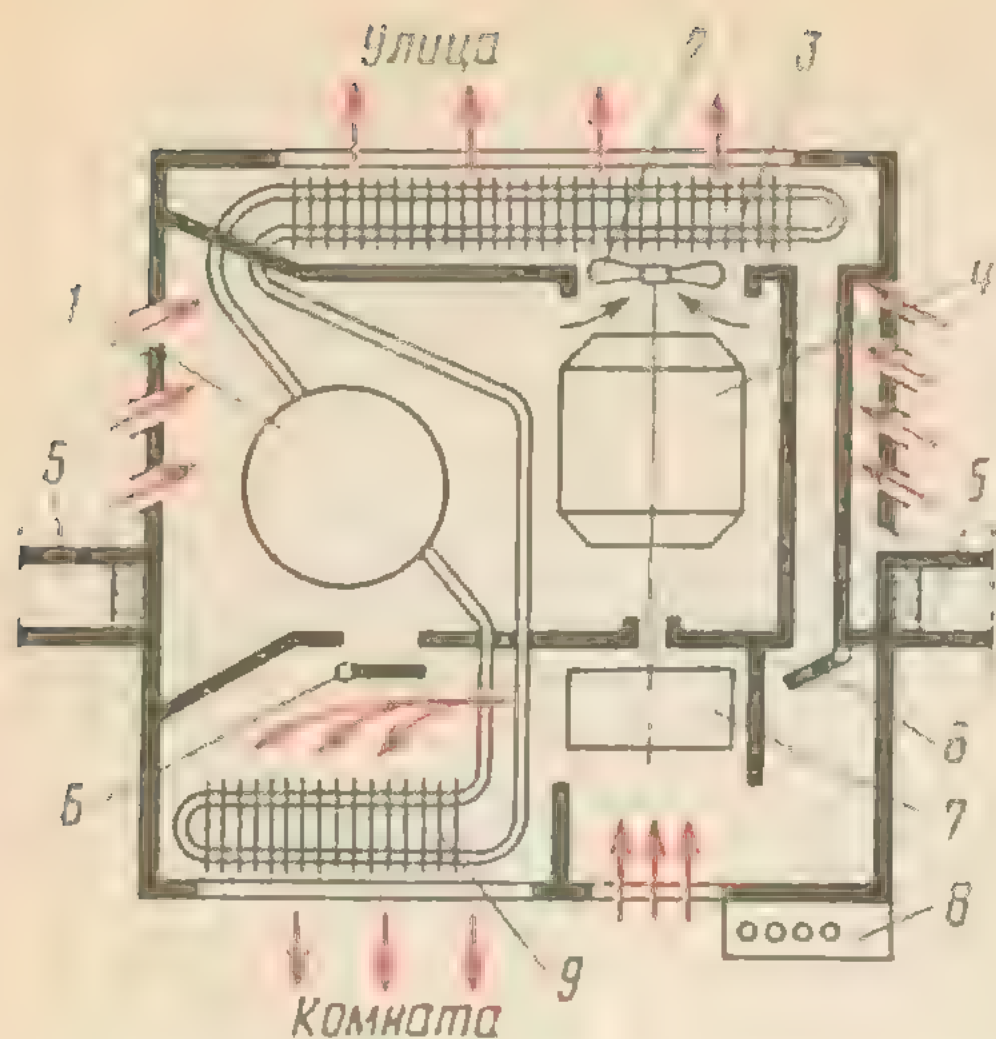


Рис. 24.3. Схема кондиционера воздуха для отдельных комнат:

1 — компрессор; 2 и 7 — вентиляторы; 3 — радиатор конденсатора; 4 — двигатель; 5 — окно комнаты; 6 — заслонка; 8 — панель управления; 9 — радиатор испарителя.

несомненно найдут большое распространение в сельском хозяйстве как для бытовых, так и для производственных целей.

Кондиционеры — это аппараты для охлаждения воздуха в помещениях летом и для нагрева его зимой. Комнатные кондиционеры устанавливают обычно в вырезе окна 5 (рис. 24.3). Компрессор 1 кондиционера и вентиляторы 2 и 7 при-

водятся в действие электродвигателем 4. Вентилятор 7 засасывает воздух из комнаты и прогоняет его через пластины радиатора 9 испарителя снова в комнату. Благодаря этому в жаркое летнее время воздух в комнате охлаждается. Агент в конденсаторе 3 охлаждается наружным воздухом. В случае необходимости может работать один вентилятор и через заслонки 6 вентилировать помещение. При помощи приборов панели управления 8 можно задать тот или иной режим работы кондиционера: летом на охлаждение воздуха в помещении, зимой на подогрев.

24.7. МЕТОДЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ МЕТАЛЛОВ

К методам электротехнологии при обработке металлов следует отнести различные методы электросварки, электроэрозионную обработку металлов и т. д.

Электросварка может быть дуговая и контактная, на постоянном и переменном токе, а также высокочастотная, ультразвуковая, электронно-лучевая. Наиболее широкое применение в сельскохозяйственной практике нашла электродуговая сварка. Сварка на постоянном токе имеет более высокое качество, чем сварка на переменном токе, но требует использования более дорогих (машинных) преобразователей тока.

При дуговой сварке на переменном токе обычно применяют однопостовые сварочные трансформаторы для питания одной дуги. Сварочный ток регулируется дросселем 2 с раздвигающимся сердечником (рис. 24.4).

Перемещая сердечник, увеличивают или уменьшают воздушный промежуток в магнитопроводе, что приводит к изменению его самоиндукции, а следовательно, и сопротивления сварочной цепи. Так регулируют силу тока в соответствии с требованиями технологии сварки.

Первичная обмотка трансформатора 1 может быть рассчитана на



рис. 24.4. Схемы включения сварочного агрегата с трансформатором:
1 — трансформатор 380 (220) 65 В; 2 — дроссель; 3 — электрод; 4 — свариваемые детали.

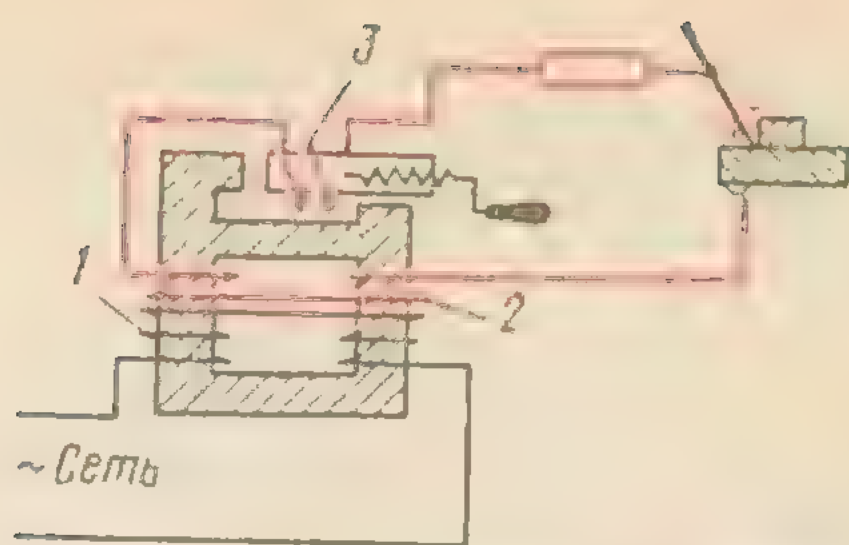


Рис. 24.5. Схема включения сварочного трансформатора, совмещенного с индукционным регулятором:
1 — первичная обмотка; 2 — вторичная обмотка; 3 — обмотка индукционного регулятора.

включение в сеть переменного тока 220 и 380 В. Напряжение холостого хода на вторичной обмотке равно 65 В.

После возникновения дуги напряжение на вторичной обмотке снижается до 16...20 В. Благодаря дросселю 2 ток короткого замыкания между электродом 3 и свариваемой деталью 4 не превышает рабочий сварочный ток более чем на 40%.

Функции трансформатора и дросселя могут быть совмещены в одном аппарате. Ток в этом случае регулируют путем изменения зазора между неподвижным и подвижным сердечником (рис. 24.5).

Сущность дуговой сварки состоит в том, что металлический электрод под действием электрической дуги, возникающей между электродом и свариваемыми деталями, плавится и образует сварной шов. На металлический электрод наносят тонкий слой обмазки, которая при плавлении электродов образует газы, увеличивающие ионизацию дугового промежутка, что способствует поддержанию дуги. Поверх этого слоя наносят еще один слой обмазки, назначение которого — предотвратить окисление расплавленного металла. Этот слой обмазки образует газы, которые вытесняют воздух из дугового промежутка.

Сварочная установка типа УДГУ-30 — универсальная стационарная для аргонодуговой сварки неплавящимся электродом нержавеющей сталей, титановых и медноникелевых сплавов на постоянном токе и алюминия и его сплавов на переменном токе. Потребляемая мощность 25 кВт·А, пределы регулирования сварочного тока от 15 до 315 А, рабочее напряжение — 8...20 В. В агрегат входит силовой трансформатор, дроссель, вентилятор, автомат, блоки управления, блок вентиля.

При ремонтных работах применяют стыковую, точечную или шовную контактную сварку.

Электроэрозионная обработка металлов (электроимпульсная, электроискровая, электроконтактная и анодно-механическая) основана на тепловом действии импульсов-разрядов электрического тока, подводимого непосредственно к электродам, одним из которых является инструмент, а другим — обрабатываемая заготовка. Питание

к ним подается от специальных генераторов, а станки по назначению подразделяются на прошивочно-копировальные, вырезные, обкатные, отрезные, заточные и т. д.

24.8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ (ЭЛЕКТРОННО-ИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ)

К электронно-ионной технологии относятся электрогазоочистка, нанесение краски в электрическом поле, электросепарация семян и других материалов, электропечать, электроионизация и т. д. Особенности этих процессов являются непосредственные воздействия электрической энергии на материал без каких-либо преобразований. Материал при этом может быть как проводящим, так и изолирующим, но должен быть в виде мелких частиц. В большинстве процессов общими стадиями являются: зарядка частиц материала, формирование пути движения этих частиц, отбор готового продукта. Зарядка частиц и формирование пути их движения, как правило, осуществляются с использованием коронного разряда — начальной стадии электрического разряда между электродами (проводами).

Электрогазоочистка. В электрофильтрах для очистки газов от взвешенных в них частиц коронирующие провода размещают между пластинами — осадительными электродами. При прохождении газа через фильтр частицы у коронирующих электродов заряжаются и движутся к осадительным электродам, где осаждаются в виде слоя пыли. Периодически эти слои стряхивают или смывают.

Нанесение краски в электрическом поле. При электроокраске изделий распыление краски происходит в электростатическом поле напряженностью около 4 кВ/см с приложением напряжения между форсункой и изделием. Капли краски дробятся на мельчайшие частицы и равномерно покрывают изделие. Потери краски при этом снижаются.

Электросепарация семян. Сепарация семян в электрическом поле осуществляется в различных устройствах. В машине камерного типа разделение семян происходит в межэлектродном пространстве при их свободном падении (рис. 24.6). Семена 1 заряжаются, например,

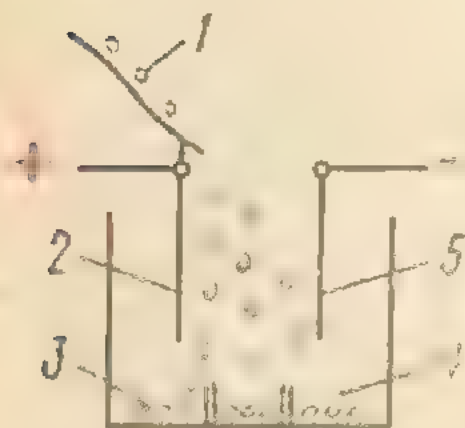


Рис. 24.6. Сепарация (разделение) семян в камере с электродами:
1 — семена; 2 и 5 — электроды;
3 и 4 — ячейки.

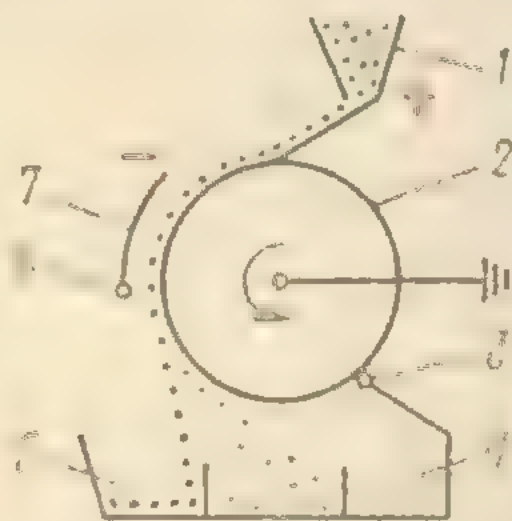


Рис. 24.7. Схема устройства коронно-статического барабанного сепаратора:
1 — бункер; 2 — барабан; 3 — щетка; 4 и 5 — отделения приемника; 6 — отклоняющий электрод; 7 — коронирующий электрод.

положительным зарядом и сыпаются в пространство между электродами 2 и 5, подключенными к высоковольтному (от 10 до 50 кВ) выпрямителю. Падая, они в зависимости от собственного веса по-разному отклоняются в сторону отрицательно заряженного электрода 5. Более легкие семена при этом попадают в ячейку 4, а тяжелые — в ячейку 3.

Такие простейшие машины, однако, не нашли широкого применения в связи с тем, что режим разделения семян здесь весьма неустойчив и зависит от состояния окружающей среды — ее влажности, температуры, запыленности, а также от значения напряжения между электродами.

На рисунке 24.7 показано устройство коронно-статического барабанного сепаратора. Семена из бункера 1 высыпаются на барабан 2, являющийся осадительным электродом, заряженным положительно. Под действием коронного разряда между электродом 7, который подключен к отрицательному полюсу выпрямителя, и барабаном 2 семена ориентируются на барабане и более или менее равномерно рассредоточиваются на его поверхности. У отклоняющего электрода 6, имеющего отрицательный заряд, от барабана отрываются семена более тяжелые, качественные. Они попадают в левое отделение 5 приемника семян. Самые легкие семена и шелуха собираются щеткой 3 в отделение 4.

Решетчатые семяочистительные машины состоят из вибрирующего заземленного решета, над которым размещается плоский электрод, находящийся под напряжением. Под действием вибрации и электрического поля зерна ориентируются длинной осью вдоль вертикального поля и при своем перемещении вдоль решета проваливаются в отверстия, соответствующие толщине зерна.

Поле коронного разряда применяется также при распылении ядохимикатов с целью их равномерного осаждения на растения.

24.9. ПРЕДПОСЕВНАЯ ОБРАБОТКА СЕМЯН. ПЕРСПЕКТИВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ

Учеными разработаны рекомендации по предпосевной обработке семян воздействием на них электрическими и магнитными полями, гамма-излучениями, ультрафиолетовыми и инфракрасными излучениями. При этом наблюдается повышение энергии прорастания, всхожести, ускорение созревания, увеличение урожайности. В связи с тем, что эффект от воздействия на семена различных факторов получается примерно равный, предпочтение следует отдавать тем методам, которые наиболее просты, дешевы и безопасны.

Один из таких наиболее простых методов воздействия на семена — обработка их в электрическом поле переменного тока высокого напряжения при частоте 50 Гц. Устройство представляет собой плоский конденсатор, в который засыпают семена, с параллельными обкладками, отстоящими друг от друга на 2...4 см. Обкладки изолированы и подключаются на напряжение 10 кВ от повышающего трансформатора (например, типа ТНГ и др.). В зависимости от культуры семян

выдерживают в электрическом поле конденсатора от 30 до 180 с. Приобретенная активность семян сохраняется, как правило, до двух недель со времени обработки.

Эффективна также обработка клубней и луковиц цветов в магнитном поле, лука-севка в поле высокой частоты и т. д.

Общий недостаток всех методов предпосевной обработки посадочного материала в том, что механизм явлений, происходящих в посевном материале и в зародышах семян, пока не имеет объяснения. Нет методики и приборов для определения дозы облучения в процессе самого облучения. Об этой дозе судят лишь по получаемому урожаю, то есть по последствию.

Не имеет достаточно четкого научного объяснения и эффект, получаемый при орошении и поливе растений омагниченной водой или водой, прошедшей электрическую обработку. Орошение и полив омагниченной водой находят между тем все более и более широкое применение, так как эта обработка воды не требует больших затрат, проста и безопасна: могут использоваться постоянные магниты. Так, при использовании омагниченной воды лучше укореняются черенки плодово-ягодных культур.

Контрольные вопросы к главе 24. 1. Как оценить перспективность (экономичность) использования электроэнергии в сельском хозяйстве для тепловых целей? 2. Как ориентировочно рассчитать мощность на обогрев объекта? 3. Какие вы знаете электронагревательные приборы? 4. Где может найти применение электрообогрев для технологических целей? 5. От каких факторов зависит расход электроэнергии на обогрев пленочных укрытий? 6. Какие нагревательные установки для животноводства вы знаете и каковы их основные параметры? 7. Как работают тепловые насосы? 8. Как работает схема электросварочного агрегата? 9. Что вы знаете об электронно-ионной технологии? 10. Что вы знаете об электротехнологических методах обработки семян перед посевом?

ЭКСПЛУАТАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК.
ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И
МОЛНИЕЗАЩИТА

глава 25. МЕТОДЫ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ФОРМЫ
ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
ОБОРУДОВАНИЯ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

25.1. ОБЪЕМ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБСЛУЖИВАНИЮ
ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ
И МАТЕРИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ БАЗА
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ

Производительность труда, качество получаемой продукции, условия труда и безопасность персонала в значительной мере определяются уровнем технического состояния электроэнергетического оборудования в сельскохозяйственном производстве. Эксплуатация оборудования должна осуществляться в соответствии с «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей» и «Правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей» или, если у потребителей имеются специальные установки, не предусмотренные Правилами, в соответствии с эксплуатационными инструкциями, утвержденными руководством предприятия и согласованными с технической инспекцией профсоюза.

Периодичность мероприятий по эксплуатации электрооборудования в сельском хозяйстве регламентирована также «Системой планово-предупредительного ремонта и технического обслуживания электрооборудования, используемого в сельском хозяйстве (ППРЭСХ)». Эта система представляет собой совокупность организационно-технических мероприятий по планированию и проведению различного рода работ с целью обеспечения безотказной и безопасной работы установок при минимальных эксплуатационных затратах.

К основным видам работ, выполняемых при обслуживании энергооборудования, относятся следующие:

текущее техническое обслуживание, включающее внешний осмотр, очистку от пыли и грязи, устранение мелких неполадок (подтяжка болтов и др.) и т. п.;

плановое техническое обслуживание, включающее осмотр, очистку, диагностику, простейшие регулировки, испытания и мелкий ремонт с заменой некоторых деталей без разборки оборудования и снятия его с места установки; при этом определяется необходимость внеочередного, текущего или капитального ремонта;

замена смазки, которая проводится в соответствии с графиком или при текущем ремонте;

текущий ремонт энергооборудования, включающий операции технического обслуживания, а также разборку, очистку деталей и узлов, их дефектовку, замену или ремонт изношенных и поврежденных деталей, устранение других неисправностей, сборку, регулировку, настройку и послеремонтные испытания;

капитальный ремонт, проводимый при необходимости, с заменой или ремонтом деталей и узлов, пришедших в негодность или выработавших свой ресурс;

техническое обслуживание при хранении, включающее комплекс работ при подготовке оборудования к хранению, при хранении и использовании после хранения.

В составе материально-технической базы хозяйства должны быть посты технического обслуживания, пункты текущего ремонта, энерго-ремонтная измерительная лаборатория. Посты текущего обслуживания — это основная техническая база монтажных участков, предназначенная для проведения работ по техническому обслуживанию и мелкому ремонту оборудования, а также для хранения запасных деталей и узлов, приборов, инструмента, материалов и технической документации. Эти посты целесообразно оборудовать при пунктах технического обслуживания технологического оборудования.

Пункт текущего ремонта — центральный технический объект материально-технической базы хозяйства, он должен обеспечивать профилактические и диагностические работы, текущий ремонт, испытания и наладку оборудования в стационарных условиях. Этот пункт целесообразно иметь в составе центральных ремонтных мастерских или автогаража.

Энергоремонтная измерительная лаборатория предназначена для диагностики, текущего ремонта, проверки, наладки и испытаний энергооборудования в местах его установки, а также для его доставки на пункт текущего ремонта.

Объекты материально-технической базы энергетической службы создаются в соответствии с типовыми проектами.

25.2. СОСТАВ И СХЕМА ПОСТРОЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СЛУЖБЫ ХОЗЯЙСТВА И ЕЕ ДОКУМЕНТАЦИЯ

Схема построения службы. В состав общей энергетической службы хозяйства в зависимости от материально-технического оснащения и размеров хозяйства могут входить: служба газификации, служба обслуживания холодильного оборудования, служба обслуживания средств диспетчеризации и связи. Энергетическая служба организует и обеспечивает эксплуатацию и ремонт электрических сетей внутри хозяйства и внутренних проводов, электрооборудования, трасс газификации и теплогазопроводов теплоэнергетического оборудования. Она также заботится о дальнейшем развитии и совершенствовании электрификации, газификации и теплофикации, отвечает за рациональное использование топ-

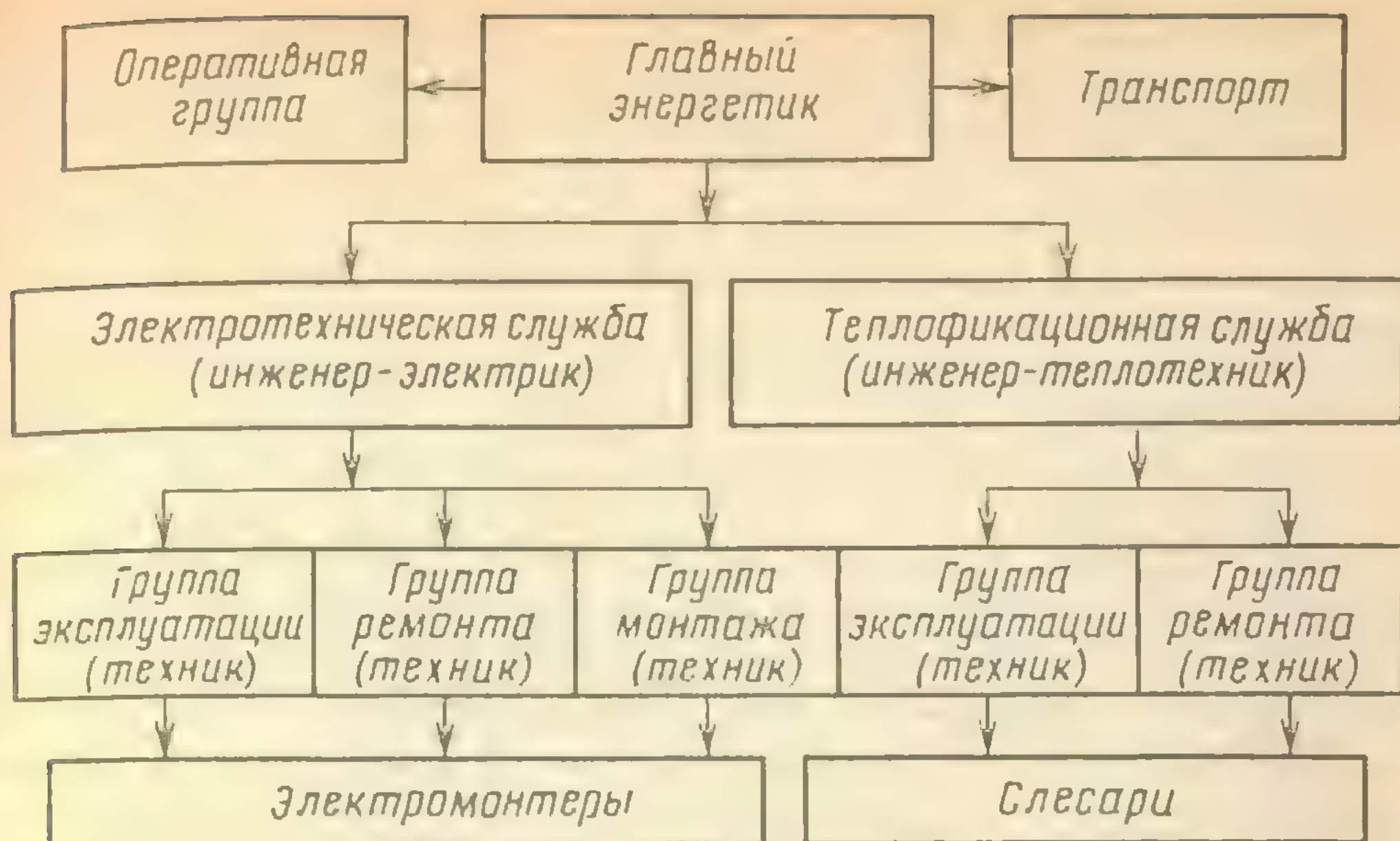


Рис. 25.1. Схема построения инженерной электротехнической службы в хозяйстве.

дивно-энергетических ресурсов на стационарных установках сельскохозяйственного производства, за соблюдение правил охраны труда и техники безопасности, за подготовку и повышение квалификации персонала, занятого на эксплуатации и обслуживании энергетических установок.

Общая схема построения энергетической службы приведена на рисунке 25.1. Эта служба может включать другие звенья, кроме отмеченных на схеме, в зависимости от состава материально-технической базы и энергетического обеспечения хозяйства. Административно главный энергетик подчинен руководителю хозяйства, а по техническим вопросам — соответствующему специалисту вышестоящего органа. В свою очередь, главному энергетiku подчинены инженер-электрик, инженер-теплотехник, специалисты по холодильному оборудованию, по газификации, радиотехник, персонал электротехнической и теплотехнической служб.

Персонал групп эксплуатации и ремонта разделяется на бригады, закрепляемые за отдельными участками (монтерскими пунктами), которые оснащены постами технического обслуживания. Бригадирами должны назначаться более подготовленные электромонтеры, имеющие, как правило, более высокий разряд или при равных разрядах более высокую группу допуска по технике безопасности. В обязанности руководителей бригад входит: обеспечение выполнения работ в соответствии с графиком и контроль за выполнением этих работ и расходом материалов; заполнение журналов учета работ и инструктажа по технике безопасности; составление заявок на детали и материалы; контроль за соблюдением членами бригады правил техники безопасности и т. д.

Число электромонтеров в группах определяется затратами труда,

потребными для выполнения соответствующих работ. Краткая методика определения затрат труда приведена в следующем параграфе.

Оперативная (дежурная) группа энергетической службы предназначена для выполнения экстренных работ по вызовам, устранению аварий и различных неисправностей, для оперативных переключений и отключений. Между вызовами группа занимается ремонтом на пунктах текущего ремонта.

Документация. Деятельность энергетической службы должна оформляться соответствующей документацией. Основным документом является энергетический паспорт хозяйства, в котором приведен перечень всех энергетических установок и их основные характеристики. Установки и их оборудование занесены в соответствующие разделы: электро-снабжение, теплоснабжение, водоснабжение, газификация, холодильные установки, канализация, телефонизация и радиосвязь. В пояснительной записке по каждому разделу приводятся соответствующие схемы и краткое описание состояния различных сетей и наиболее энергоемких потребителей.

Другая техническая документация и материалы оформляются в виде журналов, ведущихся в соответствии с утвержденной для них формой. Это следующие журналы: 1) журнал учета электроприемников с пуско-защитной аппаратурой и проводки, предназначенный для регистрации электрооснащения производственных, общественных и культурно-бытовых помещений; 2) графики технического обслуживания и ремонта электрооборудования, которые целесообразно составлять на каждую установленную физическую единицу на соответствующих объектах — коровнике, свиноматке, зернотоке, кормоцехе и т. д.; 3) журнал учета дефектов, обнаруживаемых при текущем техническом обслуживании и ремонте оборудования; 4) журнал учета выхода электрического оборудования из строя для учета времени и причин выхода из строя; 5) журнал учета числа и продолжительности перерывов электроснабжения от энергосистем; каждый перерыв следует фиксировать отдельно; 6) журнал учета потребления электроэнергии на производственные нужды; при отсутствии счетчиков количество израсходованной энергии ориентировочно может быть определено как произведение мощности установки на число часов ее использования; 7) оперативный журнал электроснабжения (со сроком хранения 3 года) для фиксирования всех распоряжений и указаний электроснабжающей организации; 8) журнал учета основных и дополнительных защитных средств по обслуживанию электроустановок; 9) журнал учета проверки заземляющих устройств; 10) журнал регистрации вводного инструктажа по технике безопасности для вновь поступающих на работу; 11) журнал инструктажа электромонтеров по технике безопасности; каждый электромонтер должен быть проинструктирован не реже одного раза в квартал по вопросам техники безопасности; листы журнала нумеруют, прошивают и опечатывают; в журнале расписываются инструктирующие и инструктируемые лица; 12) журнал проверки знаний по Правилам технической эксплуатации и правилам техники безопасности электротехнического персонала; проверку знаний проводят один раз в год для персонала, непосредственно обслуживающего действующие установки,

проходящего в них наладочные, ремонтные или другие работы; 13) журнал проверки знаний по технике безопасности у персонала I квалификационной группы, которая присваивается лицам, занятым на обслуживании электрифицированных машин и механизмов, а также лицам, ответственным за электрохозяйство предприятия или участка; 14) журнал работы с персоналом, в котором фиксируются различные курсовые мероприятия, и т. д.

Состав штата. Для определения численного состава штата и его должностей пользуются нормативами в условных единицах установленного электрооборудования, расчет которых ведется по коэффициентам перевода, приведенным в таблице 25.1, или по объему потребляемой на производственные цели электроэнергии. Так, должность главного энергетика хозяйства устанавливается в том случае, когда в хозяйстве будет электроустановок более чем на 1500 условных единиц (у.е.) и потребление электроэнергии составит свыше 1 млн. кВт·ч; должность старшего инженера-энергетика — при наличии электроустановок от 501 до 1500 у.е. и потреблении электроэнергии от 0,5 до 1,0 млн. кВт·ч на производственные цели; инженера-электрика — от 251 до 500 у.е.; старшего техника-электрика — от 101 до 250 у.е. Средняя нагрузка на электромонтера должна составлять 70 у.е., а годовые затраты труда — 1900...1950 ч.

25.1. Коэффициент перевода электротехнического оборудования и сооружений в условные единицы

№ п/п	Электротехническое оборудование и сооружения	Переводные коэф-фициенты
1	Линии электропередачи напряжением 1...10 кВ на металлических или железобетонных опорах (основаниях) при совместной подвеске проводов напряжением до 1000 В и линий радиотрансляционной сети, 1 км	3,0
2	То же, на деревянных опорах, 1 км	2,5
3	Линии электропередачи напряжением 1...10 кВ на железобетонных опорах (основаниях) без совместной подвески проводов, 1 км	2,1
4	То же, на деревянных опорах без совместной подвески проводов, 1 км	1,7
5	Линии электропередачи напряжением до 1 кВ на железобетонных опорах (основаниях) при совместной подвеске проводов (независимо от числа установленных проводов), 1 км	2,4
6	То же, на деревянных опорах, 1 км	2,2
7	То же, на деревянных опорах, без совместной подвески проводов (независимо от числа установленных проводов), 1 км	1,7
8	Кабельные линии электропередачи напряжением до 20 кВ (3 фазы), 1 км	1,9
9	Кабельные колодцы, 1 колодец	0,3
10	Вводные кабельные устройства (1 устройство)	0,09
11	Кабельные тоннели, 10 м	0,08
12	Мачтовая подстанция или закрытый трансформаторный пункт с одним трансформатором мощностью до 100 кВт·А (1 пункт)	2,3
13	Закрытый трансформаторный пункт с одним трансформатором мощностью 100 кВт·А и выше	2,5
14	То же, с двумя трансформаторами мощностью каждого 100 кВт·А и выше	3,5

		Предмет
№ п. п.	Электротехническое оборудование и сооружения	Переводные коэф. ф.и.ц.енты
15	Распределительный пункт и подстанция на напряжение 3...20 кВт, 1 присоединение	2,2
16	То же, на напряжение до 1 кВ	0,5
17	Воздушные и кабельные линии связи, 1 км	0,6
18	Электростанции мощностью до 100 кВт, используемые в качестве горячего теплового резерва, 1 электростанция	10,0
19	То же, с мощностью от 100 до 300 кВт	20,0
20	То же, с мощностью от 300 до 500 кВт	30,0
21	Электростанции мощностью до 100 кВт, используемые в качестве аварийного резерва (холодный резерв и передвижные), 1 электростанция	5,0
22	То же, с мощностью от 100 до 300 кВт	10,0
23	То же, с мощностью от 300 до 500 кВт	15,0
24	Распределительные пункты, силовые сборки, щиты управления напряжением до 1000 В в животноводческих фермах и других производственных помещениях совхоза, 1 присоединение	0,5
25	Электропривод стационарных и передвижных сельскохозяйственных машин и установок с электродвигателем мощностью до 10 кВт, 1 двигатель (1 присоединение)	0,5
26	То же, с электродвигателем мощностью от 10 до 20 кВт	0,6
27	То же, с электродвигателем мощностью свыше 20 кВт	0,7
28	Электроприводы, снабженные приборами автоматического управления, с электродвигателем мощностью до 10 кВт, 1 двигатель (1 присоединение)	0,7
29	То же, с электродвигателем мощностью от 10 кВт и выше	1,0
30	Светильники для облучения растений, сельскохозяйственных животных и птицы, 1 присоединение	0,5
31	Внутренние силовые и осветительные электропроводки на животноводческих фермах и в других производственных помещениях, 100 м ² площади помещения	0,5
32	Синхронные компенсаторы и батареи статических конденсаторов, 1 батарея	16,0
33	Монтаж новых электроустановок (электрификация новых технологических процессов) силами эксплуатационного персонала (хозяйственным способом) за счет средств капиталовложений совхоза, на 100 тыс. руб.	300,0
34	Сварочные трансформаторы, 1 установка	0,5
35	Трансформаторы безопасности, 1 присоединение	0,3
36	Сварочные преобразователи, 1 присоединение	1,0
37	Зарядные агрегаты (выпрямители), 1 агрегат	0,5
38	Электровулканизаторы, 1 установка	0,3
39	Электрические сушильные шкафы, 1 присоединение	0,5
40	Электрические автоклавы, 1 присоединение	0,7
41	Электроподогрев парникового хозяйства, 20 парниковых рам	0,5
42	Водоэлектроподогреватели типа ВЭТ, 1 присоединение	0,5
43	Электрокалориферы мощностью до 40 кВт, 1 установка	1,0
44	Электрокалориферы мощностью свыше 40 кВт, 1 установка	1,5
45	Электродные котлы, 1 установка	3,0
46	Электрический обогрев полов в животноводческих помещениях, 50 м ²	0,1

Примечания. 1 В пунктах 15 и 16 учитывают все присоединения к сборным шинам отходящих фидеров, линий и шинносоединительных выключателей

2. К электростанциям (пункты 18, 19, 20) относятся электростанции всех типов, находящиеся в постоянной готовности к включению в электросеть.

3. В пункте 24 учитывают все присоединения к сборным шинам отходящих фидеров напряжением 380/220 В.

4. В пункте 30 за одно присоединение считают группу соединителей на одном отключающем устройстве.

5. Таблица условных единиц предусматривает работы по техническому обслуживанию и планово-предупредительному ремонту электроустановок с входящим в них электрооборудованием, аппаратурой управления, щитами автоматики, а также силовыми и осветительными электропроводками.

6. В условных единицах учтены время и сезонность работ электроустановок (по условиям электрифицированных технологических процессов), а также затраты труда на их текущее обслуживание и планово-предупредительный ремонт.

25.3. ПОРЯДОК РАСЧЕТА ОБЪЕМОВ РАБОТ ПО ТЕХОБСЛУЖИВАНИЮ И РЕМОНТУ ЭНЕРГООБОРУДОВАНИЯ В ХОЗЯЙСТВЕ

При организации планового обслуживания и ремонта энергооборудования с привлечением сторонних организаций важно правильно определить объем работ по техобслуживанию и ремонту энергооборудования в хозяйстве, годовые затраты труда на выполнение этих работ, необходимое количество персонала и стоимость выполнения работ.

Объем работ может быть определен по числу технических обслуживаний и ремонтов с учетом рекомендаций таблицы 25.2. При этом учитываются не только номенклатура оборудования и его количество, но и число часов использования его в сутки, число дней работы в году, а также условия его работы в хозяйстве. Эти все факторы оцениваются актом инвентаризации энергооборудования, в котором фиксируется оборудование, сгруппированное по номенклатуре, окружающей среде, числу часов работы в сутки и месяцев работы в году, и заносятся затем в таблицу расчета годового объема работ на обслуживание и ремонт.

Системой ИПРЭСХ нормативные затраты труда разработаны на условную единицу ремонта, поэтому физическое число ремонтов необходимо пересчитать в условное. За условный ремонт принимают при этом техническое обслуживание и ремонт электродвигателя закрытого исполнения, условной мощностью 5 кВт, напряжением 380/220 В, частотой вращения 1500 оборотов в минуту. Все другие приемники электроэнергии, аппараты, приборы и элементы электроустановок по трудоемкости обслуживания и ремонта приравниваются к этому эталону трудоемкости при помощи коэффициентов перевода путем перемножения физических ремонтов на эти коэффициенты.

Формы расчетных таблиц и перечень коэффициентов перевода приводятся в служебных нормативных документах, в частности в «Системе ИПРЭСХ», «Единой системе планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий», «Общепромышленных типовых нормах времени на ремонт электрооборудования, электродвигателей и трансформаторов» и др. Коэффициенты перевода на некоторое электрооборудование приведены в таблице 25.3.

Аналогичные коэффициенты перевода разработаны на теплотехническое, холодильное, насосное и другое оборудование, применяемое в сельском хозяйстве и других отраслях.

25.2. Продолжительность периодов между техническими обслуживаниями, межремонтных периодов и ремонтных циклов работы основных видов электрооборудования в периодичность смазки подшипников

Электрооборудование	Продолжительность периодов			Периодичность замены смазки в подшипниках, мес
	между техническими обслуживаниями, дней	между текущими ремонтами, мес.	между капитальными ремонтами (ремонтный цикл), лет	
Электродвигатели переменного тока, работающие в сухих помещениях	45	12	6,5	6
Электродвигатели переменного тока, работающие в пыльных помещениях (пункты или цеха приготовления концентрированных кормов, переработки грубых сухих кормов и др.)	30	6	5,0	4
Электродвигатели переменного тока, работающие во влажных и сырых помещениях (водокачки, кормокухни, молочные и др.)	15	6	5,0	4
Электродвигатели переменного тока, работающие на открытом воздухе или под навесом	15	6	5,0	4
Электродвигатели переменного тока, работающие в сырых помещениях с выделением аммиака (животноводческие помещения)	10	6	4,0	3
Генераторы переменного тока передвижных электростанций, работающие в помещениях	15	12	5,0	6
Генераторы переменного тока передвижных электростанций, работающие на открытом воздухе или под навесом	7	6	4,0	4
Трансформаторы сварочные, работающие в помещениях	15	12	3,0	—
Трансформаторы сварочные, работающие на открытом воздухе	7	6	2,0	—
Генераторы многоамперные низковольтные постоянного тока, работающие в помещениях	15	4	3,0	6
Аппараты управления и защиты напряжением 380/220 В	Техническое обслуживание и текущий ремонт аппаратов одновременно с техническим обслуживанием и плановым ремонтом электрических машин			
Электропроводки в чистых, сухих помещениях с нормальной средой	6 мес.	—	—	—
Электропроводки в сырых, пыльных, пожароопасных помещениях	3 мес.	—	—	—
Надземная часть заземляющих устройств	3 мес.	—	—	—

Примечания. 1. Для определения продолжительности работы электрооборудования при одной смене приведенные данные умножают на коэффициент 1,5, а при трех сменах — на коэффициент 0,6.

2. Продувку и очистку электрооборудования, работающего в условиях загрязненности или запыленности, без его разборки выполняют в зависимости от условий работы через 10...20 рабочих смен.

25.3. Коэффициенты перевода числа физических технических обслуживаний (ТО), текущих ремонтов (ТР), замены смазок (ЗС) и капитальных ремонтов (КР) электрооборудования в условные ремонты

Электрооборудование	Коэффициенты перевода	
	ТО, ТР, ЗС	КР
Агрегаты зарядные с аппаратурой управления	1,0	1,0
Арматура электроосветительная (на 10 светильников):		
с одной лампой накаливания	0,52	—
с ртутными лампами высокого давления	1,04	—
с люминесцентными лампами:		
до 2 ламп	0,62	—
более 2 ламп	0,83	—
Водозлектроподогреватель с аппаратурой управления	1,0	1,0
Выключатели автоматические с током до, А:		
50	0,42	—
200	0,83	—
400	1,04	—
Генераторы переменного тока мощностью до, кВт · А:		
10	2,38	4,26
60	4,25	7,20
150	6,72	9,58
Заземляющие устройства	3,00	4,00
Контакты с током до, А:		
160	0,52	—
400	0,73	—
Контрольный кабель с числом жил с площадью сечения 1,5 мм ² , проложенный:		
в земле, на 1000 м	2,50	3,20
в непроходных каналах и трубах	3,75	4,80
по кирпичным и бетонным основаниям, на 1000 м	3,11	4,00
Линии воздушные до 10 кВ на деревянных опорах с площадью сечения, мм ² (на 1000 м):		
до 35	1,87	2,40
50	2,50	3,21
70	3,12	4,00
95 и более	3,75	4,80
Линии воздушные на металлических и железобетонных опорах с площадью сечения, мм ² (на 1000 м однолинейного провода):		
до 35	1,25	1,60
50	1,87	2,40
70	2,50	3,21
90 и более	3,12	4,00
Проводки в сельских домах, включая ввод	0,57	0,73
Пускатели магнитные для электродвигателей мощностью, кВт:		
до 17	0,25	—
30	0,29	0,37
40	0,33	0,42
75 и более	1,04	1,12
Рубильники трехфазные с центральной рукояткой на ток, А:		
до 400	0,17	—
630	0,19	0,20
1000	0,29	0,32
Распредустройства для трансформаторов до 10 кВ:		
внутренней установки до 250 кВт · А	8,34	8,80
то же, 630 кВт · А	10,40	12,00

Электрооборудование	Коэффициенты перевода	
	ТО, ТР, ЗС	КР
наружной установки до 250 кВ · А	10,40	12,00
то же, 630 кВ · А	18,80	16,00
Силовые трансформаторы трехфазные до 10 кВ мощностью, кВ · А:		
до 63	5,21	10,40
100	6,26	12,00
160, 250	7,10; 8,30	13,60; 15,20
Электродвигатели асинхронные, короткозамкнутые с частотой вращения 1500 мин ⁻¹ мощностью, кВт:		
до 1,0	0,81	0,78
от 1,1 до 3,0	0,90	0,80
от 3,1 до 5,5	1,00	1,00
от 5,6 до 10,0	1,14	1,44
от 10,1 до 22,0	1,25	2,07
Электродно-котельная установка с аппаратурой	6,40	6,40
Электрокалориферы с аппаратурой управления мощностью, кВт:		
до 40	1,74	1,80
свыше	2,62	2,70
Электростанции резервные мощностью до, кВт:		
100	10,00	10,00
300	20,00	20,00

Дальнейший ход расчетов следующий. После подсчета условных ремонтов определяют потребные затраты труда на все работы. При этом принимаются следующие нормативы трудоемкости: в условной единице обслуживания между ремонтами заключено 0,5 ч рабочего времени человека, смазки — 0,25 ч, текущего ремонта — 4,8 ч, капитального ремонта — 12,5 ч. Для определения общих трудовых затрат в часах общие суммы условных единиц по видам обслуживания умножают на приведенные нормативы трудоемкости.

Количество привлекаемого обслуживающего персонала можно затем рассчитать путем деления полученных затрат труда на годовой фонд времени одного работающего. Далее определяют стоимость обслуживания, стоимость материалов для обслуживания и т.п. с учетом действующих нормативов.

25.4. ОТВЕТСТВЕННОСТЬ ЗА ЭКСПЛУАТАЦИЮ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК И УРОВЕНЬ КВАЛИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА

Общая ответственность за организацию технической эксплуатации электроустановок и их правильное использование возлагается на руководителей предприятий и хозяйств, на балансе которых находятся установки.

На каждом предприятии (в учреждении) администрацией назнача-

должен знать, ответственное и соблюдение Правил эксплуатации и техники безопасности, именуемое «ответственным за электрохозяйство» и имеющее соответствующую подготовку. В его функции входит: обеспечение надежной, экономичной и безопасной работы электроустановок; обеспечение мероприятий по экономии электроэнергии и по повышению коэффициента мощности; внедрение новой техники в целях повышения производительности труда; своевременное проведение планово-предупредительного ремонта и профилактики; наблюдение за графиком нагрузки, учета электроэнергии, отчетностью, соблюдением выполнения предписания Госэнергонадзора и энергосистемы; организация обучения, инструктаж и проверка знаний обслуживающего персонала; своевременное расследование аварий и несчастных случаев и т. д.

Персонал, обслуживающий электроустановки, при назначении на самостоятельную работу, при переводе на другую должность или после перерыва в работе свыше шести месяцев должен пройти обучение на рабочем месте в срок, устанавливаемый администрацией (главным энергетиком). Программа обучения должна предусматривать овладение производственными навыками, изучение правил эксплуатации электроустановок потребителем и правил техники безопасности, производственных инструкции, дополнительных правил в соответствии со спецификой работы.

Знания персонала проверяет специальная комиссия периодически: у персонала электролаборатории и обслуживающего действующие электроустановки или проводящего в них наладочные, электромонтажные, ремонтные работы или профилактические испытания, а также у персонала, оформляющего распоряжения на эти работы, один раз в год, у остального персонала — один раз в 3 года.

Лица, которые обслуживают технологические электроустановки, также должны пройти специальную подготовку с последующей проверкой знаний и получить допуск к работе в электроустановках и соответствующую квалификационную группу по технике безопасности.

Первая квалификационная группа по технике безопасности присваивается лицам, обслуживающим электротехнологические установки (электродвигатели, электролизеры, электродонильные аппараты, электровольфрамовые аппараты и т. п.), работающим с электроинструментом, а также водителям автомобилей, автокранов, уборщикам помещений электроустановок. Они должны иметь элементарное представление об опасности электрического тока и мерах безопасности при работе на обслуживаемом участке, а также уметь оказывать первую помощь.

Лица второй квалификационной группы (практиканты институтов, техникумов и училищ, электромонтеры, электрослесари, связисты, мотористы электродвигателей, электрошарниры, машинисты кранов и электротранспорта, практики-электрики) должны быть ознакомлены с электроустановками, отчетливо представлять опасность электрического тока и приближения к токоведущим частям, иметь основные меры предосторожности, уметь оказывать первую помощь.

Третья квалификационная группа присваивается электромонтерам, электрослесарям, связистам, оперативному персоналу электрических станций и электроустановок, обслуживающему стаж не менее шести месяцев, а ли-

цам, окончившим техникум или училища, — три месяца. Они должны иметь познания в электротехнике и быть знакомы с устройством и обслуживанием электроустановок, отчетливо представлять опасность при работе в электроустановках, знать общие правила техники безопасности и правила допуска к работам в электроустановках, знать специальные правила безопасности по тем видам работ, которые входят в обязанности данного лица, уметь вести надзор за работающими в электроустановках, уметь оказать первую помощь пострадавшему (искусственное дыхание и т. д.).

Четвертая группа может быть присвоена тем же специалистам, что и в предыдущей группе, но со стажем, в 2 раза большим (не меньше соответственно одного года или шести месяцев), а также начинающим инженерам и техникам со стажем не менее двух месяцев в предыдущей группе и инженерам по технике безопасности. Они должны полностью знать правила техники безопасности, правила пользования защитными средствами, применяемыми в электроустановках, и испытания их, уметь организовать безопасное проведение работ и вести надзор за ними в электроустановках до 1000 В и т. д.

Пятая квалификационная группа может быть присвоена электромонтерам, электрослесарям, мастерам, техникам и инженерам-практикам со стажем не менее пяти лет, а лицам, прошедшим специальную подготовку, — не менее трех лет, а также мастерам, техникам и инженерам с законченным средним или высшим техническим образованием при стаже не менее шести месяцев. Они должны полностью разбираться в элементах схем и оборудования своего участка, в том, чем вызвано требование того или иного пункта вышеуказанных правил, уметь организовать безопасное проведение работ в установках любого напряжения, уметь обучить персонал других групп правилам техники безопасности и оказанию первой помощи. Причем для работающих в установках напряжением выше 1000 В учитывается стаж работы только в этих установках (по удостоверениям о проверке знаний).

25.5. ОБЪЕМ И НОРМЫ ПРИЕМО-СДАТОЧНЫХ И ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Испытание оборудования. Вновь вводимые в действие, реконструированные и отремонтированные установки должны проходить приемосдаточные испытания в соответствии с ПУЭ-76 с целью уменьшения вероятности аварийного выхода электроустановок из строя, а также повышения общего уровня надежности оборудования, обеспечения безопасности обслуживающего персонала. Из-за повреждения изоляции элементов установок и неисправности заземляющих устройств и аппаратов, предназначенных для защиты от коротких замыканий, может выходить из строя электрооборудование, происходить пожары, наблюдаться случаи электрогравматизма. Поэтому испытания электрооборудования должны проводиться и с профилактической целью.

Основные виды испытаний оборудования — измерение сопротивле-

ния изоляции, испытание изоляции повышенным напряжением и различные опробывания в соответствии с действующими директивными документами, инструкциями заводов-изготовителей и рекомендациями ЦУЭ-76. Испытания проводит монтажный персонал в процессе монтажа, наладочный персонал непосредственно перед вводом оборудования в эксплуатацию, затем оформляются соответствующие акты и протоколы.

Сопротивление изоляции силовых и осветительных проводок, обмоток электрических машин и других элементов установок измеряют мегомметрами типов М1101М и М4100/1-5. Значение сопротивления изоляции определяют как между различными токоведущими проводниками, так и между каждым проводником и землей. Перед измерениями футляр мегомметра, особенно между контактами, тщательно очищают от пыли и убеждаются в его исправности: при вращении ручки стрелка должна останавливаться на отметке « ∞ » шкалы «МОм», а при замыкании зажимов «I» и « $\frac{1}{2}$ » — на отметке «0» той же шкалы. Если отклонение стрелки от указанных отметок превышает расстояние, соответствующее основной погрешности прибора (0,8...1 мм), прибором пользоваться нельзя. Проводники для подключения прибора должны иметь хорошую изоляцию. Провода в оплетке применять нельзя, так как они легко увлажняются.

Сопротивление изоляции обмоток электродвигателей и генераторов измеряют у каждой фазы в отдельности относительно корпуса и между каждыми двумя фазами. Сопротивление изоляции силовых проводок измеряют при снятых плавких вставках и разомкнутых силовых контактах коммутационных аппаратов. При этом измеряют сопротивление изоляции каждого участка сети между смежными предохранителями (силовыми контактами), а за последними предохранителями (силовыми контактами) — между каждым проводом и землей, а также между каждой парой проводов. При этом проверяют и изоляцию коммутационно-защитной аппаратуры (автоматов, пускателей, рубильников и др.), так как они не отключаются от сети. Если сопротивление изоляции окажется ниже нормы, поврежденный элемент находят путем поочередного отключения каждого из отдельных участков.

Перед измерением сопротивления изоляции осветительных электропроводок все выключатели должны быть включены, лампы накаливания вывинчены из патронов, газоразрядные лампы отключены от сети, а штепсельные розетки и групповые щитки оставлены присоединенными. Таким образом осуществляется контроль изоляции как проводки, так и присоединенной к ней установочной аппаратуры. Измеряют сопротивление изоляции между фазными проводами и заземленным нулевым проводом, а если он не заземлен, то измеряют и его сопротивление изоляции относительно земли. Если при эксплуатационных проверках лампы отключить нельзя, то сопротивление изоляции измеряют между любым проводом и землей при предварительно отъединенном от земли нулевом проводе.

У электрифицированного инструмента сопротивление изоляции измеряют между заземляющей жилой, соединенной с корпусом инструмента, и любой из жил питания, а при наличии выключателя, раз-

рывающего цепь фазных проводов, — между каждой из питающих жил и заземляющей.

У трансформаторов измеряют сопротивление изоляции между первичной и вторичной обмоткой, а также относительно корпуса. У электронагревательных установок — относительно корпуса прибора при холодном состоянии. Одновременно проверяют надежность заземления прибора.

Испытание изоляции повышенным напряжением проводят с целью выявить местные дефекты изоляции и определить ее прочность, то есть способность длительно выдерживать рабочее напряжение. Для этой цели необходимо иметь испытательные установки — трехфазные автотрансформаторы или индукционные регуляторы с выходным напряжением не ниже 300 В. Можно использовать три однофазных автотрансформатора с выходным напряжением 0...250 В. При помощи регуляторов РНО-250-2 можно испытывать асинхронные двигатели до 10 кВт, а при помощи РНО-250-5 — двигатели до 40 кВт. При этом необходимо следить за симметрией напряжений.

Испытания изоляции напряжением промышленной частоты, равным 1000 В, могут быть заменены измерением одномоментного значения сопротивления изоляции мегомметром на напряжение 2500 В. Если значение сопротивления изоляции меньше нормы, то испытание повышенным напряжением 1000 В нужно проводить обязательно.

Нормы испытаний. Объем, периодичность и другие нормы испытаний электрооборудования приводятся в ПУЭ-76, раздел 1, а также в инструкциях по эксплуатации к отдельным видам электрооборудования. Ниже приводятся лишь краткие сведения об объеме и нормах испытаний.

Синхронные генераторы и двигатели (компенсаторы) сельскохозяйственного назначения напряжением до 1000 В при измерении сопротивления изоляции мегомметром на 1000 В должны иметь сопротивление не менее 0,5 МОм при температуре $+10...30^{\circ}\text{C}$. На электрическую прочность изоляцию проверяют напряжением, равным $1,6 U_n + 800$ В, но не менее 1200 В с продолжительностью его воздействия в течение 1 мин. Кроме того, изоляцию испытывают на ток утечки по фазам, прилагая выпрямленное напряжение, равное $2,4 U_n + 1200$ В (амплитудное значение). Снимают 5 точек — от $0,2 U_{\text{max}}$ до U_{max} через равные ступени. Напряжение выдерживают в течение 1 мин, ток фиксируют через 15 и 60 с.

Состояние межвитковой изоляции испытывают увеличенным напряжением генератора на холостом ходу до 150% номинального продолжительностью 5 мин. Одновременно снимают характеристику холостого хода. Снимают также характеристику короткого замыкания. Измеряют вибрацию и проверяют системы охлаждения, маслоснабжения, состояние подшипников.

Сопротивление изоляции машин постоянного тока должно быть не ниже 0,5 МОм при температуре $+10...30^{\circ}\text{C}$. При проверке прочности изоляции испытательное напряжение промышленной частоты составляет $1,6 U_n + 800$ В. При испытании машин постоянного тока измеряют также сопротивление постоянному току обмоток возбужде-

при, когда реостатов и пускорегулирующих устройств, снимают нагрузочную характеристику и характеристику холостого хода.

Асинхронные электродвигатели переменного тока, работающие в сухих помещениях, испытывают при текущих ремонтах один раз в 12 месяцев, в других помещениях — один раз в 6 месяцев. Сопротивление изоляции при вводе в эксплуатацию должно быть не менее 0,5 МОм (мегаомметр на 1000 В). Прочность изоляции испытывают напряжением 1,5 U_n в течение 5 мин. Проверяют также силу тока и потери холостого хода. Измеряют зазоры между статором и ротором, вибрацию подшипников и зазоры в них, разбег ротора в осевом направлении, работу на холостом ходу и под нагрузкой.

Аппаратуру управления и защиты испытывают одновременно с основным энергоприемником. Сопротивление изоляции (выпускное) должно быть не менее 1,0 МОм в холодном состоянии. Проверяют также правильность действия аппаратуры и состояние ее контактов.

Силовые и осветительные проводки в помещениях с нормальной средой испытывают не реже одного раза в 2 года (более 0,5 МОм между каждым проводом и землей), в остальных помещениях — не реже одного раза в год. Испытание изоляции повышенным напряжением 1000 В во всех помещениях проводят не реже одного раза в 3 года. Силовые кабельные сети напряжением до 1000 В испытывают напряжением 2500 В в течение 5 мин при приемке в эксплуатацию и капитальных ремонтах.

Электронагревательные устройства (бытовые плиты, элементные водонагреватели, калориферы) испытывают при текущих ремонтах, но не реже одного раза в год (плиты — одного раза в 6 месяцев). Сопротивление их изоляции должно быть 0,5 МОм (плиты — 1 МОм), испытательное напряжение — 2000 В. Сопротивление изоляции электрифицированного инструмента проверяют не реже одного раза в месяц (не менее 1 МОм), а прочность изоляции — не реже одного раза в 3 года. Значение прикладываемого напряжения для трансформаторов с первичным напряжением 127–220 В равно 1350 В, для разделяющих трансформаторов — 4000 В, для инструмента на 36 В — 550 В и т. д.

Осмотр состояния электрооборудования (силового, осветительного) внутренних сетей, щитов и щитков и т. п. в помещениях с нормальной средой проводят не реже одного раза в 6 месяцев, а в помещениях с повышенной опасностью — не реже одного раза в 3 месяца. Сопротивление изоляции в первом случае измеряют не реже одного раза в 2 года, а во втором — не реже одного раза в год. Результаты проверок изоляции оформляют актом или протоколом.

При осмотрах внутренних проводок и осветительных установок необходимо обращать внимание на состояние изоляции проводки, мест соединения проводов и контактов с арматурой заземляющей проводки и ее контактов, предохранителей, выключателей, интенсиельных розеток и т. д. Если в элементах обнаружены какие-либо повреждения, сеть необходимо отключить, а повреждение устранить.

Контрольные вопросы к главе 25. 1. Перечислите основные виды работ, выполняемых при обслуживании электрооборудования. 2. Какие объекты могут быть подвержены воздействию электрического тока и какие меры безопасности должны быть приняты?

оборудования? 3. Что относится к энергетической службе хозяйства? 4. Какие звенья включает в себя энергетическая служба? 5. Какие основные документы отчетности должен уметь оформить электрик хозяйства? 6. Каков порядок расчета численности службы по условным единицам установленного электрооборудования? 7. Как подсчитывают объемы работ по техническому обслуживанию и ремонту? 8. Что вы знаете об ответственности за эксплуатацию электроустановок и уровне квалификации персонала? 9. Какой порядок установлен для приемо-сдаточных и профилактических испытаний электрооборудования?

Глава 26. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК, ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ, ОБОРУДОВАНИЯ ФЕРМ И ЭЛЕКТРОПАРНИКОВ

26.1. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Порядок обслуживания. Осветительные установки требуют регулярного планового обслуживания, своевременной чистки светильников, замены перегоревших или отработавших свой срок службы ламп и систематического ремонта элементов установок.

Для обслуживания осветительных установок необходимо иметь соответствующее вспомогательное оборудование для доступа к светильникам, расположенным на значительной высоте: приставные лестницы и стремянки, передвижные напольные подъемные устройства, грузоподъемные краны. Правилами технической эксплуатации разрешается пользоваться стремянками и приставными лестницами при установке светильников на высоте не более 5 м. Передвижные напольные устройства применяют при установке осветительных приборов на высоте от 3 до 15 м и более. Они могут быть самоходными, передвигаемыми вручную, и самоходными, выполненными на базе электропогрузчиков. Грузоподъемные краны используют в соответствии с правилами их устройства и эксплуатации.

Замена ламп в установках может быть индивидуальная, по мере перегорания и независимо от того, сколько лампа проработала и какой световой поток отдает, и индивидуально-групповая, когда после определенного числа часов горения, примерно 0,7...0,8 от номинального срока службы ламп данного типа, заменяют все или часть ламп.

Для того чтобы облегчить обслуживание и чистку, необходимо стремиться применять светильники с легко снимаемыми отражателями, и рассеивателями, которые можно чистить и мыть в специально оборудованных мастерских.

Систематически при помощи люксометров необходимо контролировать уровень освещенности, ее равномерность и другие качественные показатели освещенности.

В процессе эксплуатации осветительной установки периодически, не реже одного раза в год, проверяют уровень освещенности в контрольных точках и уровень общей освещенности в помещении. Периодически проверяют также состояние установки: соответствие ее проекту, наличие стекол, решеток и сеток в светильниках, исправность их уплотнения и т. п.

Периодичность осмотров. Осмотр и проверку осветительной сети проводят в следующие сроки: исправность автомата и сети аварийного освещения — не реже одного раза в 3 месяца, проверку стационарного оборудования и электропроводки рабочего и аварийного освещения на соответствие номинальных токов расцепителей и плавких вставок предохранителей расчетным — один раз в год, испытание и измерение сопротивления изоляции проводов и кабелей — один раз в 3 года, измерение нагрузок и значений напряжения в отдельных точках электрической сети — один раз в год, испытание изоляции стационарных трансформаторов с вторичным напряжением 12...42 В — не реже одного раза в год, а переносных — один раз в месяц.

Если суммарная мощность люминесцентных и газоразрядных осветительных установок на предприятиях превышает 250 кВт, то для их эксплуатации необходимо иметь специальный штат, численность которого принимается в соответствии с действующими директивными указаниями. В установках с люминесцентными и газоразрядными лампами необходимо осуществлять компенсацию реактивной мощности до коэффициента мощности 0,96. Допускается групповая компенсация в трехфазных осветительных сетях, если она обоснована технико-экономически.

Уход за светильниками. Вышедшие из строя люминесцентные лампы, лампы типа ДРЛ и другие, содержащие ртуть, нужно хранить в специальном помещении и периодически вывозить для уничтожения и дезактивации в специальные места.

Необходимо также соблюдать следующие основные правила.

1. Напряжение сети должно соответствовать напряжению, указанному на цоколе или колбе лампы.

2. Лампами накаливания (кроме зеркальной) в качестве источника света следует пользоваться совместно с осветительной арматурой, которая перераспределяет световой поток в соответствии с требованиями рационального освещения. Арматура светильников с мощными лампами должна иметь вентиляционные приспособления во избежание чрезмерного нагрева цоколя лампы.

3. Необходимо предохранять работающие лампы от попадания влаги на баллон, так как на стекле могут образоваться трещины и лампа выйдет из строя.

4. Лампы следует хранить в закрытом помещении с относительной влажностью не выше 70% и температурой не ниже 5°C. При транспортировании нужно принимать необходимые меры предосторожности.

5. В ряде осветительных арматур важно правильно устанавливать лампы, чтобы получить нужный световой эффект (зеркальная арматура, прожекторы, автомобильные фары и др.).

6. Осветительную арматуру следует использовать только с теми лампами, для которых она предназначена. Применение ламп большей мощности может привести к быстрому износу арматуры, проводов и самой лампы из-за перегрева.

7. Светильник должен быть полностью укомплектован.

8. Арматуру нужно надежно укреплять. Стеклопакеты большого размера следует укрепить на арматуре дополнительной сеткой

из тонкой проволоки. Патрон не должен проворачиваться при ввертывании и вывертывании лампы. Лампу нужно ввинчивать до отказа. Плохие контакты, в частности между цоколем и патроном, могут быть причиной недопустимого нагрева лампы, патрона и проводов, а также размягчения мастики цоколя.

9. Для лучшей светоотдачи светильников необходимо своевременно очищать их от пыли, копоти и грязи: 2 раза в год в установках наружного освещения, один раз в месяц в установках, находящихся в чистых помещениях, 2 раза в месяц в помещениях с небольшим содержанием пыли, дыма и копоти (мастерских и др.) и 4 раза в месяц в помещениях с большим содержанием пыли, дыма, копоти, волокон и т. д. (кузнечных, мельниц, пенькотрепальных и др.).

Для очистки от сухой пыли светильники продувают ручными мехами, а внутреннюю отражающую поверхность и лампу протирают мягкой сухой тряпкой. От грязи светильники очищают тряпкой, смоченной в керосине. Стекланные элементы арматуры промывают в теплой воде с мылом, протирают тряпкой и просушивают.

10. Осматривать и чистить светильники можно только при отключенных от источника питания линиях.

11. Светильники, в том числе и лампы, должны быть защищены от сотрясения и толчков при помощи пружинящих подвесов (на краях, у лесопильных рам и т. д.).

12. Для лучшего использования светового потока и электроэнергии на освещение в целом необходимо следить за чистотой стен и потолков в помещениях, своевременно очищать их от пыли и копоти или белить и красить заново.

26.2. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

При получении электродвигателя со склада или с завода прежде всего необходимо проверить состояние изоляции его обмоток при помощи мегомметра. Изоляцию можно считать нормальной, если ее сопротивление не менее 0,5 МОм. В противном случае обмотки электродвигателя нужно подвергнуть сушке, используя для этой цели, например, стенд, описанный в главе 27.

Перед пуском двигателя после длительной (свыше 30 суток) остановки необходимо его осмотреть, проверить положение пусковых устройств, исправность заземления и измерить сопротивление изоляции.

Перед пуском электродвигателя следует также проверить схему соединения его обмоток, состояние контактов, крепление двигателя к салазкам, а салазок к фундаменту или раме, состояние шкива (звездочек) и натяжение ремня (цепи), наличие заземления и его надежность, вручную провернуть вал электродвигателя, чтобы убедиться в отсутствии заеданий.

На электродвигателях и приводимых ими механизмах должны быть нанесены стрелки, указывающие направление вращения. На групповых щитках у выключателей должны быть надписи, указывающие, к каким агрегатам они относятся.

Необходимо удостовериться в соответствии защиты (подвижных вето-

вок предохранителей, нагревательных элементов у тепловых реле магнитных пускателей или уставок расцепителей автоматических выключателей) данному электродвигателю, используя для этой цели стенд, описанный в главе 27, а также в исправности контактов всех аппаратов.

Если детали нового электродвигателя обильно смазаны маслом или покрыты лаком для защиты от коррозии, то их надо промыть бензином марки 70.

В подшипниках с кольцевой смазкой менять смазку надо через 200...300 ч работы, но не реже чем один раз в 3...5 месяцев. Перед заливкой нового масла (машинное марок Л и М и моторное марки М) надо слить старое, подшипник промыть бензином марки 70. Шариковые и роликовые подшипники смазывают солидолом через 1000...1500 ч работы, но не реже, чем указано в таблице 25.2.

Во время работы электродвигателя необходимо следить за тем, чтобы он был правильно загружен.

Уход за электродвигателем в процессе работы включает в себя следующие операции: периодическую очистку корпуса от пыли и грязи, продувку обмотки сжатым воздухом от компрессора или ручных мехов с целью удаления с нее пыли, внешний осмотр и проверку состояния заземления (зануления), крепления электродвигателя к фундаменту или рабочей машине, крепления подшипниковых щитов и коробки выводов, плотности посадки шкива, полумуфты или звездочки и натяжения ремня или цепи. При этом рекомендуется снять крышку выводов и проверить состояние изоляции выводных концов фазных обмоток и проводов, подводящих питание. У электродвигателей с фазным ротором необходимо проверить также состояние щеток и колец.

При включении двигателя после длительной остановки надо проверить состояние изоляции, прослушать, нет ли посторонних шумов при работе, а также убедиться в том, что подшипники не греются.

Если двигатель работает на открытом воздухе, рекомендуется на ночь закрывать его брезентом, пленкой и т. п.

Периодичность осмотров должна быть не реже одного раза в 3 дня на открытых площадках и в очень влажных помещениях и одного раза в 10 дней в сухих чистых помещениях для двигателей защищенного исполнения и в 2 раза реже для двигателей закрытого исполнения.

Сезонно используемые электродвигатели нужно хранить в сухих закрытых помещениях.

Особое внимание нужно уделять борьбе с отсыреванием изоляции обмоток, так как по этой причине возникает пробой изоляции и электродвигатель выходит из строя.

Сопротивление изоляции обмоток электродвигателя меняется в зависимости от условий окружающей среды, графика работы длительности и условий хранения и консервации, конструктивного исполнения, класса изоляции и т. д. Особенно резко колеблется сопротивление изоляции электрических двигателей открытого и защищенного исполнения, обмотки которых находятся в постоянном контакте с окружающей средой. Это обстоятельство приводит к тому, что у многих электродвигателей при больших паузах в работе сопротивление изоляции

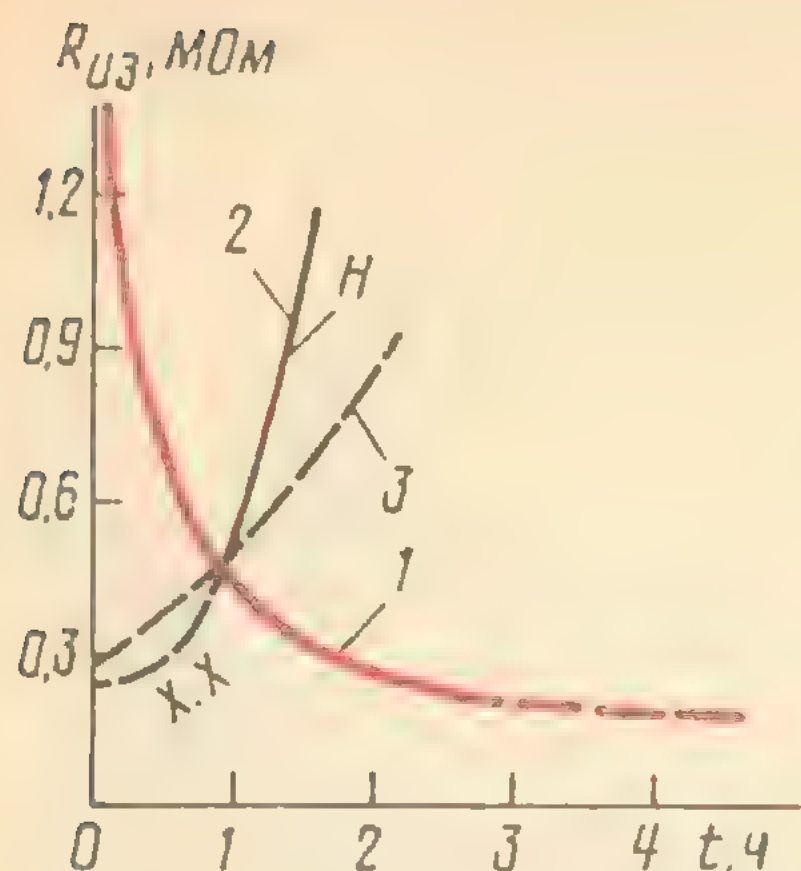


Рис. 26.1. Изменение сопротивления изоляции электродвигателя защищенного исполнения, установленного открыто под навесом:

1 — начало замеров через 45 мин после сильного дождя; 2 — восстановление сопротивления изоляции при включенном электродвигателе (х.х — холостой ход, н — нагрузка); 3 — восстановление изоляции на солнце и ветре (двигатель не включен)..

падает до уровня (порой до нескольких тысяч Ом), опасного с точки зрения электрического пробоя и виткового замыкания. В помещениях с высокой относительной влажностью сопротивление изоляции даже у закрытых двигателей типа АО2 за 4...5

суток снижается с 200...300 МОм до 0,2 МОм и может стать еще меньше.

На рисунке 26.1 показан график изменения сопротивления изоляции электродвигателя типа А, установленного открыто, но защищенного навесом от дождя. Эта картина изменения сопротивления изоляции характерна и для помещений с высокой влажностью. Отключенный электродвигатель впитывает влагу в те моменты времени, когда его температура оказывается ниже температуры окружающей среды. Как правило, чем продолжительнее пауза, тем меньшим становится значение сопротивления изоляции обмоток. При следующем включении (вхолостую) обмотка постепенно нагревается проходящим по ней током: сопротивление изоляции восстанавливается. Включение же под нагрузкой приведет к более быстрому нагреву обмотки, сопротивление ее изоляции может снизиться еще больше и возникнет пробой: двигатель выйдет из строя.

После длительного нерабочего периода электродвигателя необходимо проверить сопротивление изоляции и, если его значение окажется ниже допустимого, принять необходимые меры по сушке изоляции.

26.3. ОБЪЕМ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ РЕМОНТОВ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Правила технической эксплуатации предусматривают проведение следующих профилактических работ для электродвигателей сельских установок.

1. Перед пуском электродвигателя после длительной остановки (более 20 ч) его нужно осмотреть, проверить состояние пусковых устройств, состояние подшипников, измерить сопротивление изоляции обмоток (мегомметром на 1000 В, если рабочее напряжение электродвигателя не превышает 500 В).

2. Текущий ремонт электродвигателя нужно делать одновременно с ремонтом приводных механизмов, а также при соответствующем техническом состоянии электродвигателя.

3. Капитальный ремонт электродвигателей, пускорегулирующей аппаратуры следует проводить по мере необходимости. Ориентировочные сроки приведены в таблице 25.2.

Организация техобслуживания и текущих ремонтов электродвигателей переменного тока зависит от условий, в которых они работают.

При проведении текущего ремонта необходимо измерять сопротивления растеканию повторного заземления нулевого провода на вводах в помещения, а также сопротивления изоляции электрооборудования и электропроводок. Одновременно с текущим ремонтом необходимо смазывать подшипники качения.

Если электрические двигатели работают по 15 и более часов в сутки, интервалы между техобслуживанием и ремонтами уменьшают на 40%. Объем мероприятий при техобслуживании такой же, как и при пуске после длительной остановки. В объем мероприятий по текущему ремонту асинхронного электродвигателя входят предварительное отъединение его от сети, очистка корпуса от грязи, а при необходимости и снятие с фундамента с заменой всех прокладок.

При разборке электродвигателя снимают шкив, полумуфты или звездочки, защитные кожухи вентилятора и затем сам вентилятор; крышки подшипников и подшипниковых щитов. Во время этих операций можно применять молоток, но с использованием подкладок из дерева или мягкого металла. Вынимая ротор, нужно оберегать его от возможных ударов о сталь статора. Извлеченный ротор кладут на специальные деревянные подкладки. Затем ротор и статор очищают от пыли сжатым воздухом или сухим обтирочным материалом. Засохшую грязь удаляют деревянной лопаткой. Тщательно удаляют также графитную пыль и грязь из промежутков между контактными кольцами и с частей щеточного механизма. Внимательно осматривают изоляцию обмоток статора, особенно при выходе обмоток из пазов. Места с незначительным повреждением изоляции в лобовых частях обмотки изолируют, обматывая их лакокрасочной или хлопчатобумажной лентой с последующей пропиткой лаком воздушной сушки.

Ослабевшие пазовые клинья заменяют новыми — сухими и пропитанными олифой. То же самое делают с бандажами лобовых частей обмоток (киперная лента, шпагат, капроновые нити). Лак наносят пульверизатором или кисточкой.

Сопротивление изоляции обмоток в холодном состоянии после ремонта не должно быть менее 1 МОм. В противном случае обмотка должна быть просушена при температуре 105...110°C в течение 3...4 часов.

Лаком воздушной сушки покрывают все места, где замечено нарушение лакового покрова. После этого проверяют состояние наконечников и изоляции выводных концов обмоток электродвигателя. Провода с поврежденной хлопчатобумажной оплеткой усиливают, накладывая изоляционную ленту, а провода, имеющие трещины, механические повреждения или отслоения изоляции, заменяют новыми. Припайку новых проводов выполняют, пользуясь припоем марки ПОС-30. На выводном щитке зачищают окислившиеся или подгоревшие контакты, заменяют пришедшие в негодность токопроводящие шинки.

На роторе во время ремонта осматривают обмотку, проверяют целостность лопастей вентилятора. Подшипники очищают от остатков старой смазки и промывают в бензине (с примесью 10% автосола). Про-

веряют исправность подшипников, внешняя обойма должна свободно вращаться. Заменяют те подшипники, на которых замечены коррозии, сколы, вмятины, глубокие царапины поверхности беговых дорожек шариков или роликов, а также подшипники с радиальным зазором между телом качения и беговой дорожкой более 0,1 мм (для валов диаметром 10...30 мм) и 0,2 мм (для валов диаметром до 80 мм). Снимают подшипник при помощи винтового съемника, а место его посадки промывают бензином и насухо протирают. Новый подшипник промывают в бензине до полного удаления консервационной смазки, затем нагревают в масляной ванне до 80°C и насаживают на вал ротора, слегка постукивая молотком по отрезку трубы, упирающейся во внутреннее кольцо подшипника.

Контактные кольца при ремонте сначала зачищают от шероховатости и подгара, а потом шлифуют стеклянной шкуркой на токарном станке. Зазор между щеткой и обоймой проверяют щупом; зазор должен быть равен 0,1...0,3 мм. Износ щеток допускается до следующих размеров по высоте: 15 мм для двигателей АК габаритов 5 и 6 и 25 мм для двигателей АК габаритов 7, 8 и 9. После сборки двигателя щетки притирают к поверхности контактных колец при помощи стеклянной бумаги, наложенной на кольцо (рабочей поверхностью к щетке), которую протягивают в обе стороны под щеткой. Затем удаляют графитовую пыль.

Порядок сборки, испытания и проверки электродвигателя после ревизии и ремонта статора и ротора заключается в следующем. Вставляют ротор в статор, устанавливают подшипниковые щиты в гнезда и закрепляют их болтами. Затем заполняют подшипниковые камеры консистентной смазкой УТВ (на 2/3 их объема), предварительно пропустив ее через фильтр, и устанавливают наружные крышки подшипников. Проверяют от руки легкость вращения ротора. В случае заеданий перекося подшипников устраняют легкими ударами молотка по деревянной прокладке, наложенной на торцы вала. После этого у двигателей закрытого исполнения наклеивают и закрепляют вентилятор и укрепляют защитный кожух. В заключение при помощи винтового приспособления на вал напрессовывают шкив, полумуфту или звездочку.

При необходимости электродвигатель окрашивают. При этом поверхность корпуса промывают уайт-спиритом, протирают сухой ветошью и прошпаклевывают в местах выбоин. Просохшую шпаклевку шлифуют, после чего электродвигатель окрашивают. Затем проверяют сопротивление изоляции обмоток и включают двигатель в сеть вхолостую. Потом его соединяют с рабочей машиной и осуществляют последний контрольный запуск.

При сборке электродвигателей с фазным ротором после закрепления подшипниковых щитов и проверки ротора на вращение устанавливают узел контактных колец, соединяют токоотводы. Затем измеряют динамометром степень нажатия щеток на кольца, под щетку подкладывают газетную бумагу, а отчет усилия делают в момент освобождения бумаги из-под щетки. Давление на щетку должно быть в пределах 12...20 Н/мм². Если пружины не создают необходимого нажатия, их заменяют новыми.

26.4. НЕИСПРАВНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ИХ УСТРАНЕНИЕ

При пуске двигателя могут встретиться следующие неполадки.

1. *Ротор двигателя вращается в обратном направлении.* Для изменения направления вращения надо поменять местами две фазы сети в месте подключения электродвигателя к магнитному пускателю или рубильнику.

2. *Двигатель неестественно гудит, нагревается на холостом ходу, потребляемый из сети ток больше номинального.* Необходимо проверить схему соединения обмоток — правильно ли обозначены и соединены начала и концы обмоток.

3. *Двигатель не берет с места нагрузку.* Возможные причины: пониженное напряжение в сети, очень сильно затянут ремень, перегорел предохранитель. Надо проверить напряжение вольтметром, ослабить натяжение ремня, сменить предохранитель. Если эти меры не дали результатов, нужно установить рабочую машину в такое положение, при котором во время включения двигателя момент ее сопротивления будет минимальным.

4. *Двигатель при пуске, начиная набирать скорость, гудит, а затем останавливается.* Причина может быть в том, что предохранители, которые не были рассчитаны на данную нагрузку, перегорели. Необходимо проверить и заменить предохранители.

5. *При пуске двигателя с фазным ротором под нагрузкой пусковой реостат сильно нагревается.* Видимо, пусковой реостат не годится для данных условий пуска. Следует уменьшить нагрузку в момент пуска или установить реостат большей мощности.

6. *При пуске в ход асинхронного двигателя с переключением со звезды на треугольник двигатель не разгоняется.* Возможная причина — подгорели контакты в переключателе, нагрузка при пуске составляет более 30% номинальной, неправильно собрана схема. Принять меры, предотвращающие возникновение этих неисправностей.

7. *Двигатель в рабочем режиме перегревается.* Следует установить двигатель большей мощности.

8. *Сильно нагреваются подшипники.* Уменьшить натяжение ремня, смазать подшипники.

В процессе эксплуатации двигателя могут возникнуть следующие неисправности.

1. *Двигатель не берет нагрузку с места, сильно гудит.* Причина — неисправность предохранителя, плохой контакт в силовой цепи у рубильника, пускателя или на щитке двигателя, разрыв в цепи обмотки двигателя, пониженное напряжение в сети, заклинивание рабочей машины. Нужно принять меры по устранению этих неполадок.

2. *Двигатель тяжело запускается, быстро нагревается, при пуске гудит.* Это может быть из-за недопустимого износа подшипников. Подшипники следует заменить новыми.

3. *При включении перегорают предохранители.* Причина — короткое замыкание в обмотках двигателя или в подводящих проводах. У асинхронного двигателя с фазным ротором возможно замыкание на коль-

цах. Проверить обмотки двигателя, подводящую цепь, устранить замыкания.

4. Двигатель набирает скорость рывками, в процессе работы амперметр, включенный в цепь статорной обмотки, показывает резкое колебание тока. Неисправность заключается в том, что в цепи пускового реостата и ротора имеется плохой контакт. Проверить и восстановить контактные соединения.

Отправке в капитальный ремонт двигателя подлежат в случае, если обнаружены следующие неисправности: 1) межвитковое замыкание в обмотках; 2) неустраняемое замыкание на корпус (внутри электродвигателя в обмотке); 3) обрыв внутри обмотки; 4) обугливание изоляции обмотки; 5) изгиб вала, износ его шеек, повреждение посадочных мест подшипников; 6) небаланс ротора (вибрация). Согласно правилам технической эксплуатации, вибрация не должна превышать следующих значений:

Частота вращения, мин ⁻¹	3000	1500	1000	750
Вибрация, мм	0,05	0,1	0,13	0,16

7) разрыв бандажей; 8) повреждение контактных колец; 9) трещины в корпусе и подшипниковых щитах.

26.5. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КОЛЛЕКТОРНЫХ МАШИН

Перед пуском машины нужно проверить, правильно ли собраны схемы включения машины и пусковой аппаратуры, исправность механической передачи, состояние коллектора, контактов, заземления, надежность крепления машины к фундаменту или к салазкам, наличие смазки, исправность щеточного аппарата, плотность прилегания щеток. Следует также повернуть ротор машины от руки.

При работе машины необходимо следить за ее тепловым режимом. Перегрев чаще всего свидетельствует о перегрузке машины. Он опасен для изоляции обмоток и может вывести машину из строя.

Уход за обмоткой заключается в контроле изоляции, удалении с нее пыли и грязи (слегка промасленной тряпкой), периодическом измерении сопротивления изоляции между обмотками и корпусом машины, коллектором и корпусом, между параллельной и последовательной обмотками и т. д.

Важно внимательно следить за состоянием вентиляции машины, регулярно очищать от пыли и грязи вентиляционные каналы.

Уход за коллектором включает чистку, шлифовку и обточку. Чистить коллектор следует сухой тряпкой или неволокнутой ветошью один раз в смену после остановки машины. При появлении на пластинах коллектора царапин или шероховатостей его шлифуют. Для этого щетки снимают и при пониженной частоте вращения от постороннего двигателя прижимают к коллектору стеклянную бумагу деревянной колодкой. Если коллектор потерял строго цилиндрическую форму и бьет при работе, а также если на нем есть глубокие царапины или выгорания, его обтачивают на токарном станке. Медь коллектора

изнашивается быстрее миканитовых прокладок между пластинами. Поэтому последние вырезают специальной пилкой (продольными движениями вдоль пластин коллектора) на глубину 0,5...1 мм. Эта операция называется *продоразживанием*. После продоразживания коллектор шлифуют, а острые края пластин перед шлифовкой срезают шабером.

Щетки должны быть правильно выбраны, правильно установлены, плотно прижаты. Их необходимо своевременно заменять. Новые щетки следует пришлифовывать к коллектору. Это делается при помощи наждачной бумаги, которую прокладывают между коллектором и щетками рабочей поверхностью к щеткам. При неподвижном якоре наждачную бумагу протягивают по направлению вращения якоря до тех пор, пока формы поверхности щетки и коллектора не станут одинаковыми. После этого щетку таким же образом обрабатывают мелкой стеклянной бумагой, добиваясь зеркальной рабочей поверхности. Сильно загрязненные щетки протирают чистой тряпкой, смоченной в бензине или содовом растворе.

Смазку (солидол Л и М) меняют один-два раза в год, предварительно промыв детали бензином марки А-70. Пополняют смазку не реже одного раза в 3 месяца.

26.6. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК НА ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ФЕРМАХ И ПАРНИКОВ С ЭЛЕКТРООБОГРЕВОМ

На животноводческих и птицеводческих фермах, как правило, применяют энергоприемники в трехфазном исполнении. Однофазные приборы допускаются к применению при мощности не более 1,3 кВт, если они включаются на линейное напряжение, и не более 0,6 кВт, если включаются на фазное напряжение. Электродвигатели, пусковые и защитные аппараты рекомендуется устанавливать вне помещений, в которых содержится скот и птица, а кнопки управления — непосредственно у рабочих мест. Если вынести оборудование невозможно, то его исполнение должно соответствовать условиям среды.

Металлические конструкции транспортеров и других механизмов, к которым могут прикасаться животные, должны быть надежно изолированы от корпусов электрооборудования и нулевого провода электросети. На ответвлениях от магистральных линии водопроводов к поилкам, водонагревателям и другим энергоприемникам, а также в вакуум-проводах непосредственно за вакуум-насосами доильных агрегатов должны быть встроены изолирующие вставки. Длина вставки должна быть не менее 1 м. Если есть устройства для выравнивания потенциала, то изолировать технологическое оборудование и применять изолирующие вставки не требуется. Все металлические конструкции в этом случае должны быть заземлены.

Рекомендуется также цепи для привязи скота, кормушки, поилки и другие приспособления изготавливать из изоляционного материала (нейлон, пластмасса, текстолит и т. д.).

Розетки для включения аппаратов для чистки животных, облучающих и других установок должны быть в герметизированном испол-

нении с заземляющим гнездом. Светильники следует применять фарфоровые со стеклянным колпаком, отражателем и сеткой. Высота их подвеса должна быть не менее 2,5 м от пола, переносные лампы применять на 12 В с питанием от трансформатора с раздельными обмотками.

Металлические корпуса запарников, выключателей, трубы с проводкой, а также водопроводные трубы, идущие к запарникам, следует надежно заземлять (занулять). На распределительном щите должен быть установлен общий выключатель или закрытый рубильник, который позволяет обесточивать все электроустановки.

При развешивании электростригального пункта передвижную электростанцию необходимо устанавливать на расстоянии не менее 15 м от него. В качестве заземлителей использовать не менее двух труб диаметром 50 мм, длиной 1,5...2 м с заглублением в грунт не менее чем на 1,5 м. Высота подвеса сети над столом стригальщика должна позволять удобно пользоваться кнопочными пускателями. Систематически следует проверять надежность заземления нулевой точки генератора, корпусов стригальных машин и других устройств и приборов. Овец нужно стричь на столах или сухих щитах из дерева, а стригальщик должен быть в обуви и стоять на диэлектрической подставке, которую в исключительных случаях можно заменить сухим деревянным щитом.

При эксплуатации на фермах или на других объектах передвижных электрифицированных машин необходимо строго соблюдать инструкции, составленные применительно к мобильным электрифицированным установкам.

Электроводонагреватели, используемые на животноводческих фермах, должны быть заводского изготовления и иметь инструкции завода-изготовителя по эксплуатации и ремонту. Они должны быть только трехфазного исполнения. Водонагреватели электродного типа должны иметь блокировку, исключающую открытие водоразборного крана до отключения аппарата от сети. Элементные водонагреватели до 1 кВт, предназначенные для получения воды для мытья рук, посуды и т. п., могут быть в однофазном исполнении.

Парники (теплицы) с электрическим обогревом по степени опасности поражения током делятся на две категории: категория А — напряжение питания электронагревательных элементов выше 65 В (неизолированные электроды или сопротивления проложены в земле или воздухе), категория Б — неизолированные электроды или сопротивления питаются напряжением до 65 В или применены нагревательные провода в асбестоцементных трубах, включенные на напряжение выше 65 В, а также применены специальные нагревательные кабели.

Участок, занятый парниками или теплицами категории А, должен быть обнесен забором высотой 2 м, отстоящим не менее чем на 1 м от ближайших парников или теплиц. Устройства для автоматического регулирования температуры и влажности должны быть выполнены на напряжение не более 36 В, а рукоятки регуляторов должны быть изготовлены из изолирующего материала.

Работать в парниках и теплицах можно лишь при систематическом напря-

жении. Персонал должен быть специально подготовлен (инструктаж на рабочем месте). В журнале об инструктаже должны расписаться инструктирующий и инструктируемые. Общее обслуживание электропарников должно быть поручено специально подготовленным электромонтерам. Для каждого электрифицированного хозяйства должны быть составлены инструкции с четкими указаниями прав и обязанностей, а также ответственности персонала, последовательность операций включения и отключения парников (теплиц), порядок наблюдения, регулирования и обслуживания парников в период обогрева, в нормальных режимах и при авариях, порядок осмотра и ремонта оборудования.

В электрифицированных парниках (теплицах) категории Б можно работать при включенном обогреве, но с применением инструмента с деревянными ручками, погружаемыми в почву не более чем на 25 см. При включенной системе обогрева категорически запрещается погружать в почву руки.

В парниках (теплицах) обеих категорий при включенном напряжении необходимо вывешивать плакаты «Под напряжением! Опасно для жизни!», а для категории А — также плакат «Вход на территорию воспрещен!»

26.7. ОСОБЕННОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРОИНСТРУМЕНТА

Электроинструмент должен быстро включаться и отключаться от сети (но не самопроизвольно!), быть безопасным в работе и не иметь доступных для случайного прикосновения токоведущих частей.

Напряжение питания должно быть не выше 220 В в помещениях без повышенной опасности и не выше 36 В в помещениях с повышенной опасностью и вне помещений. Если последнее нельзя применить, то допускается применять 220 В, но при наличии устройства защитного отключения или надежного заземления (зануления) корпуса инструмента с обязательным использованием защитных средств (диэлектрических перчаток, галош, ковриков). В особо опасных помещениях и при неблагоприятных условиях (в котлах, баках и т. п.) разрешается использовать электроинструмент на 36 В, но с обязательным применением диэлектрических перчаток, ковриков и других защитных средств.

Электроинструмент на напряжение выше 36 В должен иметь заземляющий зажим. Штепсельные соединения на 36 и 220 В не должны позволять ошибочное включение приборов, то есть должны быть разных размеров, а также иметь отличительную окраску.

Электроинструмент не реже одного раза в месяц нужно проверять на отсутствие замыканий на корпус, отсутствие обрыва заземляющего провода. Проверяют также состояние изоляции трансформатора и преобразователя частоты.

Лица, пользующиеся электроинструментом, не должны передавать его даже на непродолжительное время другим лицам, разбирать его и делать какой-либо ремонт, держаться за шланговый провод, касаться вращающегося режущего инструмента.

Контрольные вопросы и задания к главе 26. 1. Перечислите основные требования к эксплуатации осветительных установок. 2. Что надо знать для организации правильной эксплуатации электродвигателей? 3. Какие операции включает уход за двигателем в процессе работы? 4. Что входит в объем планово-предупредительных ремонтов электродвигателей? 5. Какие неисправности могут встретиться в процессе эксплуатации электродвигателей? 6. В каких случаях следует отправлять электродвигатель в капитальный ремонт? 7. Каковы особенности эксплуатации коллекторных машин? 8. Что следует помнить при эксплуатации электрооборудования на животноводческих фермах? 9. Какие меры безопасности должны быть обеспечены при эксплуатации электропарников? 10. Расскажите об особенностях эксплуатации электроинструмента.

Глава 27. ВЫБОР ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ЕЕ НАСТРОЙКА. ЭКСПЛУАТАЦИЯ ПУСКОЗАЩИТНОЙ АППАРАТУРЫ

27.1. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПУСКОЗАЩИТНОЙ АППАРАТУРЕ

Правильный выбор аппаратуры управления и защиты — одно из главных условий надежной работы электродвигателей. Анализ случаев выхода из строя электродвигателей показывает, что причина этого часто кроется именно в неправильном выборе аппаратуры, которая не среагировала на аварийный режим работы двигателя и не отключила его от сети в критический момент.

Нарушение режима вызывается, как правило, превышением тока в обмотках электродвигателя (80...90% всех аварийных случаев), которое может быть обусловлено технологической перегрузкой, потерей фазы в сети и работой двигателя в однофазном режиме на двух оставшихся фазах, снижением напряжения в сети при полной нагрузке на двигатель.

Электродвигатель в нагретом состоянии должен без вредных последствий выдерживать на испытательном стенде 50-процентную перегрузку по току в течение 2 мин.

Для того чтобы предупредить выход из строя электродвигателей из-за превышения тока в обмотках, необходимо правильно выбирать пусковую и защитную аппаратуру. При этом следует руководствоваться правилами, излагаемыми ниже.

Рубильники, пусковые ящики, установочные выключатели, штепсельные соединения только с предохранителями следует применять лишь в случае, когда электродвигатели работают под постоянным присмотром обслуживающего персонала, который выключит установку при перегрузке или работе на двух фазах. Персонал должен быть обучен простым навыкам определения работы установки в ненормальном режиме. Правильно выбранные плавкие вставки предохранителей надежно защищают двигатель от токов, лишь в 2 и более раз превышающих номинальные.

При этом нельзя применять открытые рубильники, рубильники с кожухами, имеющими прорези для рукоятки, открытые плавкие вставки предохранителей и другие аппараты с открытыми токоведущими частями.

рубильники разрешается применять для включения и отключения электродвигателей мощностью не более 10 кВт, а штепсельные соединения — для управления переносными электродвигателями мощностью не более 1 кВт. Если мощность двигателя более 1 кВт, штепсельные соединения могут служить только для сочленения с сетью и при этом иметь блокировку, допускающую это сочленение лишь при отключенном аппарате управления.

Вблизи установок, включаемых рубильником и защищаемых только предохранителями, обязательно должна быть предупреждающая табличка: «Внимание! Электродвигатель не имеет защиты от перегрузки! Не оставлять без наблюдения при работе!»

Магнитные пускатели следует применять в установках с дистанционным управлением или автоматизированных, там где нет постоянно присутствующего обслуживающего персонала. Они должны иметь хорошо отлаженную тепловую защиту, обеспечивающую выключение установки при перегрузке или при работе двигателя на двух фазах, защита от коротких замыканий в силовой цепи до ввода в электродвигатель, а также в цепи управления осуществляется предохранителями. Если установка работает в присутствии персонала, но по ряду соображений надо иметь нулевую защиту, следует применять магнитные пускатели без тепловых реле или контакторы.

На неавтоматизированных установках, работающих при отсутствии персонала, необходимо устанавливать автоматические выключатели, которые дешевле магнитных пускателей и менее чувствительны к колебаниям напряжения в сети. Здесь защита от перегрузок и работы на двух фазах обеспечивается тепловыми расцепителями автоматов.

Защита будет соответствовать своему назначению, если плавкие вставки предохранителей, нагревательные элементы тепловых реле будут выбраны с учетом тока, потребляемого электродвигателем из сети. Автоматы нужно выбирать по току расцепителей с учетом номинального тока электродвигателя.

27.2. ВЫБОР ПЛАВКИХ ВСТАВОК ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ И УСТАВОК АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ

При выборе плавких вставок для защиты асинхронных электродвигателей учитывают то обстоятельство, что пусковой ток двигателя в течение нескольких секунд может в 5...7 раз превышать номинальный. Поэтому выбирать плавкую вставку по номинальному току, как это делается в осветительных сетях, нельзя: она перегорит при пуске. Нельзя выбирать плавкую вставку и по пусковому току: защита в этом случае не будет в должной мере обеспечена.

Плавкие вставки для защиты электродвигателя выбирают, исходя из следующего условия:

$$I_{\text{пл. вст}} \geq I_{\text{пуск}} / \alpha, \quad (27.1)$$

где $I_{\text{пл. вст}}$ — ток плавкой вставки, $I_{\text{пуск}}$ — пусковой ток электродвигателя, α — коэффициент, зависящий от условий работы электродвигателя.

Для цепей электродвигателей с легким режимом пуска $\alpha = 2,5$, с тяжелым режимом пуска $\alpha = 1,6 \dots 2$. При частых включениях электродвигателей с легким режимом пуска вставки нужно выбирать, как для тяжелого режима.

Для двигателей с фазным ротором ток плавкой вставки находят из условия

$$I_{\text{пл. вст}} \geq (1 \dots 1,25) I_{\text{н. дв}}, \quad (27.2)$$

где $I_{\text{н. дв}}$ — номинальный ток электродвигателя.

Плавкую вставку для группы электродвигателей с короткозамкнутым ротором выбирают из условия

$$I_{\text{пл. вст}} \geq 0,4 [\sum I_{\text{н. дв}} + (I'_{\text{пуск}} - I'_{\text{н. дв}})], \quad (27.3)$$

где $\sum I_{\text{н. дв}}$ — сумма номинальных токов одновременно работающих двигателей; $(I'_{\text{пуск}} - I'_{\text{н. дв}})$ — разность между пусковым и номинальным токами для двигателя, у которого она наибольшая.

Автоматы к электродвигателям выбирают по номинальному току теплового расцепителя $I_{\text{н. тепл.}}$, который должен быть равным номинальному току электродвигателя $I_{\text{н. дв}}$ или несколько превышать его ($I_{\text{н. тепл.}} \geq I_{\text{н. дв}}$), с учетом того, что тепловые расцепители имеют регулируемую уставку тока в пределах от 63 до 100 % номинального тока расцепителя [$I_{\text{уст. тепл.}} = (0,63 \dots 1) I_{\text{н. тепл.}}$].

Ток уставки теплового расцепителя выбирают в зависимости от температуры окружающей среды. Так, если значения температуры окружающей среды 40, 25, 15 и 0°C, то соответственно ток уставки теплового расцепителя должен быть принят равным $I_{\text{н. дв.}}$; $0,9 I_{\text{н. дв.}}$; $0,85 I_{\text{н. дв.}}$; $0,8 I_{\text{н. дв.}}$. Вообще же для любого значения температуры окружающей среды ток уставки теплового расцепителя

$$I_{\text{уст. тепл.}} = I_{\text{н. дв.}} / \beta, \quad (27.4)$$

где $\beta = 1 + 0,006 (40 - t_{\text{окр}})$; $t_{\text{окр}}$ — температура окружающей среды.

Ток уставки электромагнитных расцепителей для защиты электродвигателей с короткозамкнутым ротором принимают равным $(7 \dots 10) I_{\text{н. дв.}}$.

Электромагнитный расцепитель для защиты двигателя с фазным ротором выбирают из условия

$$I_{\text{уст. эм}} = (2,5 \dots 3) I_{\text{н. дв.}} \quad (27.5)$$

Если от силового щита работает несколько электродвигателей, то на нем вместо рубильника с предохранителями можно установить общий автомат только с электромагнитными расцепителями. Тогда ток уставки электромагнитного расцепителя выберется так:

$$I_{\text{уст. эм}} \geq (1,5 \dots 1,8) [\sum I_{\text{н. дв}} + (I'_{\text{пуск}} - I'_{\text{н. дв}})], \quad (27.6)$$

где $\sum I_{\text{н. дв.}}$ — сумма номинальных токов одновременно работающих электродвигателей; $(I'_{\text{пуск}} - I'_{\text{н. дв.}})$ — разность между пусковым и номинальным токами для двигателя, у которого она наибольшая.

В соответствии с ПУЭ проводники в резиновой, поливинилхлоридной или бумажной изоляции для ответвлений к короткозамкнутым электродвигателям напряжением до 1000 В должны выдерживать допустимую длительную токовую нагрузку не менее 125% номинального тока электродвигателя.

27.3. ТЕПЛОВЫЕ РЕЛЕ И ИХ ЗАЩИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

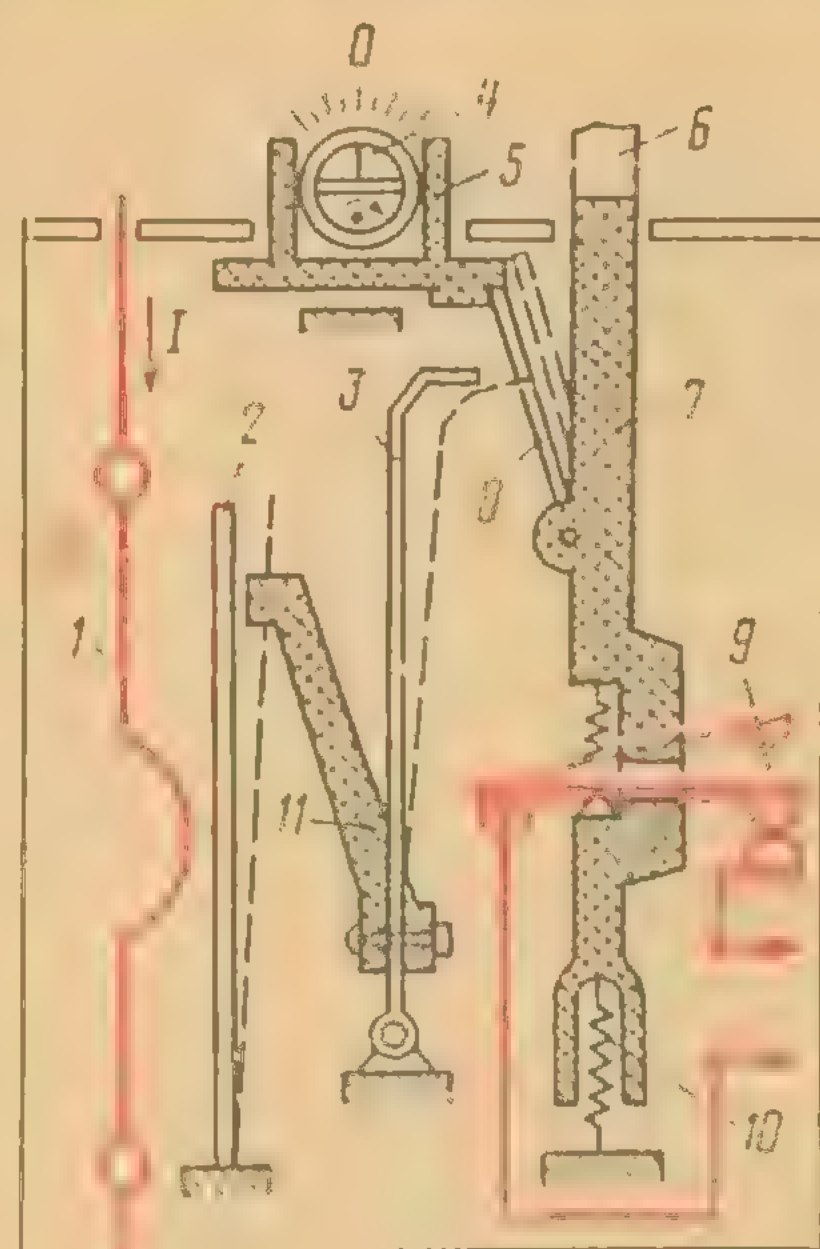
Требования к защите. Защиту электродвигателей от перегрузок следует осуществлять при помощи тепловых реле, встроенных в магнитные пускатели. Можно использовать также тепловые реле, пристраиваемые к контакторам. При защите мощных электродвигателей тепловые реле можно включать через трансформаторы тока. Защиту от коротких замыканий нужно подбирать так, чтобы тепловые реле были устойчивыми к токам короткого замыкания. Это будет достигнуто, если ответвление к электродвигателю будет защищено плавкой вставкой с номинальным током, не превышающим более чем в 4 раза длительно допустимый ток теплового реле, или автоматическим выключателем с тепловым расцепителем, с номинальным током в 2 раза больше, чем у теплового реле, и с электромагнитным расцепителем с током уставки, превышающим длительно допустимый ток теплового реле не более чем в 18 раз.

Устройство реле. На рисунке 27.1 приведена схема устройства теплового реле ТРН для магнитных пускателей типов ПМЕ и ПАЕ. Биметаллическая пластина 2 при прохождении тока, превышающего заданный, изгибается и перемещает вправо пластмассовый толкатель 11, связанный жестко с биметаллической пластиной 3, выполняющей роль расцепителя и температурного компенсатора. Отклоняясь вправо, пластина 3 нажимает на защелку 8 и выводит ее из зацепления с пластмассовым движком 5 уставок, в результате чего под действием пружины 10 пластмассовая штанга 7 расцепителя отходит кверху (показано пунктиром) и размыкает контакты 9 в цепи управления магнитным пускателем. Движок уставок можно перемещать, поворачивая эксцентрик 4 и изменяя расстояние между концом пластины 3 и защелкой 8, а значит, и ток срабатывания реле.

Температурная компенсация заключа-

Рис. 27.1. Схема устройства теплового реле типа ТРН:

1 — нагревательный элемент; 2 — биметаллическая пластина; 3 — биметаллическая пластина температурного компенсатора; 4 — эксцентрик; 5 — движок уставок; 6 — кнопка «возврат»; 7 — штанга расцепителя (тяга); 8 — защелка; 9 — контакты; 10 — пружина; 11 — толкатель.



ется в том, что изгибанию биметаллической пластины 2 при изменении окружающей температуры соответствует противоположное по направлению изгибание пластины компенсатора 3. Таким образом достигается независимость тока уставки от окружающей температуры. Ток уставки можно менять в пределах от 0,75 до 1,3 номинального тока нагревательного элемента.

В станциях управления электроприводами широко применяются также одноэлементные реле серий ТРА и ТРВ с несменяемыми нагревателями и автоматическим возвратом в исходное положение.

Ниже приведены значения номинальных токов сменных нагревательных элементов к реле типа ТРН.

Тип реле	Номинальные токи нагревательных элементов, А
ТРН-10А	0,32; 0,4
ТРН-10	0,5; 0,63; 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,6; 3,2; 4,5; 8; 10
ТРН-25	5; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25
ТРН-40	12,5; 16; 20; 32; 40

Регулятор тока уставки реле ТРН имеет 5 делений влево и 5 делений вправо от нулевой риски. Каждое деление соответствует примерно 5% номинального тока теплового элемента. Чтобы выбрать уставку, сначала определяют поправку (в делениях шкалы уставок в сторону от нулевого деления):

$$N_1 = \frac{I_{эд} - I_0}{cI_0}, \quad (27.7)$$

где $I_{эд}$ — ток электродвигателя; I_0 — номинальный ток нагревательного элемента (нулевая уставка); c — коэффициент деления шкалы ($c = 0,05$ для открытых пускателей и $c = 0,055$ для защищенных).

Число делений шкалы уставок может быть получено со знаком плюс или минус. Поправку на температуру находят из выражения

$$N_2 = (40^\circ - \tau_{окр}) / 10, \quad (27.8)$$

где $\tau_{окр}$ — температура окружающей среды.

Общую поправку в делениях шкалы определяют, суммируя показатели N_1 и N_2 .

Двухполюсные тепловые токовые реле ТРН-10 и ТРН-25 с температурной компенсацией, сменными нагревательными элементами и механизмом регулировки тока уставки предназначены главным образом для защиты трехфазного короткозамкнутого асинхронного электродвигателя от перегрузок недопустимой продолжительности. От коротких замыканий они не защищают. Реле должны допускать не менее 10 000 срабатываний при токах, равных трехкратному номинальному току уставки.

Для новых магнитных пускателей серии ПМЛ предназначены тепловые реле серии РТЛ, которые имеют 24 типоразмера на токи от 0,1 до 200 А, рассчитаны на защиту электродвигателей до 185 кВт, напряжением до 660 В. Реле имеют температурную компенсацию, механизм ускоренного срабатывания и ручной возврат.

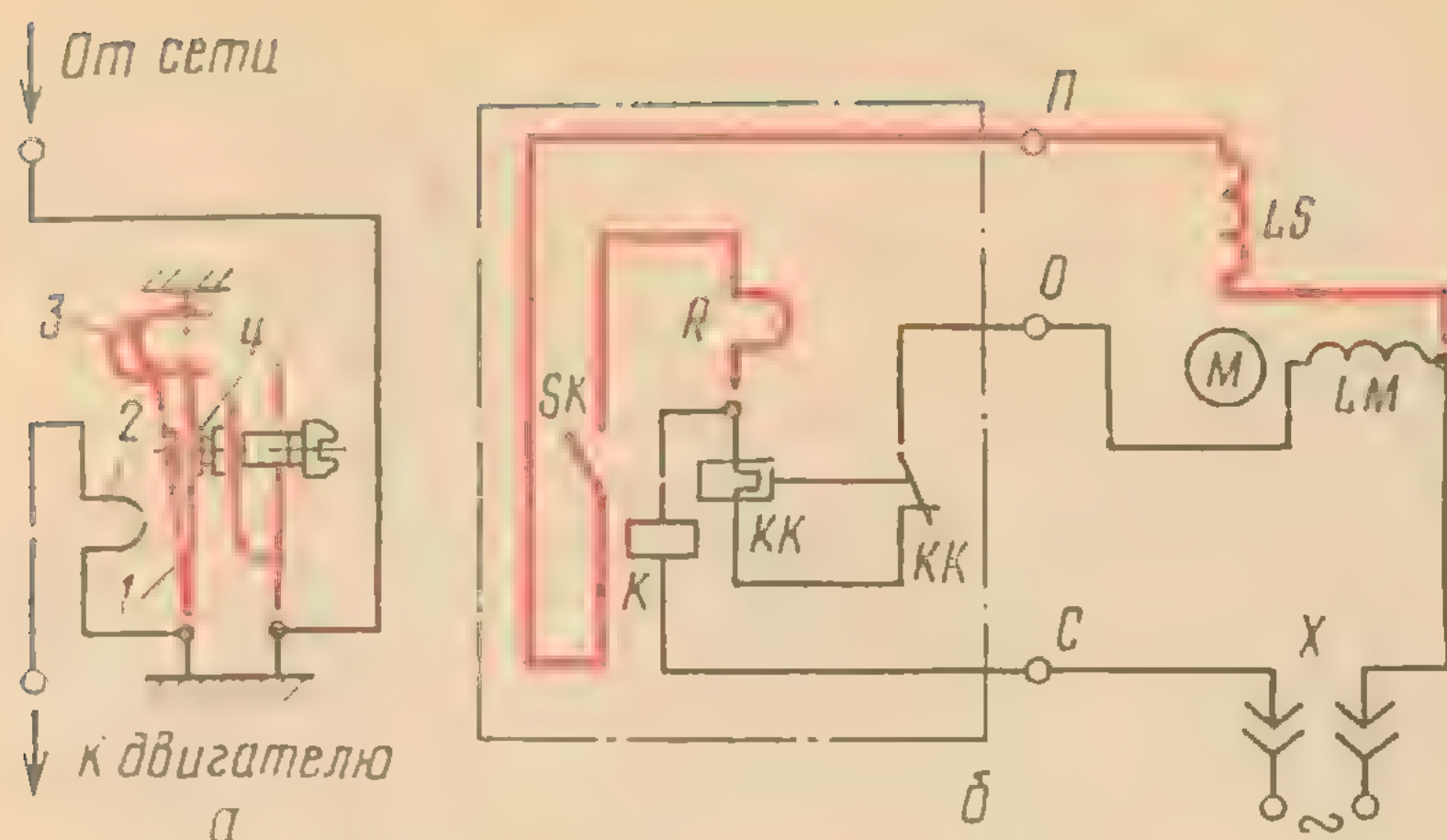


Рис. 27.2. Тепловое реле РТ-10 (а) и токовое комбинированное реле РТК-1 в схеме включения однофазного двигателя (б):

1 — биметаллическая пластина; 2 — нагревательный элемент; 3 — пружина мгновенного разрыва; 4 — контакты, размыкающие цепь нагрузки; К и SK — катушка и контакт пускового соленоидного реле; KK — тепловое реле; R — дополнительный нагреватель; П — контакт для подключения пусковой обмотки LS и пускового конденсатора; О — контакт для подключения основной рабочей обмотки LM; С — сеть; X — штепсельный разъем; М — ротор двигателя.

Защита однофазных двигателей. Тепловое реле РТ-10 (рис. 27.2, а) предназначено для защиты от тока перегрузки электроустановок переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц. Размыкание и самовозврат контактов 4 реле в замкнутое состояние осуществляются пружиной мгновенного разрыва 3 при изгибе термобиметаллического элемента 1, нагреваемого током перегрузки, и последующем его охлаждении. Номинальные токи установки — 1,9; 2,7; 3,3 и 4,3 А. Время срабатывания при токе, равном $1,35 I_n$, не более 30 мин. При токе $2 I_n$ — 20...60 с, при $8 I_n$ — от 1 до 7 с. Самовозврат при отключении тока $2 I_n$ и температуре окружающей среды $+40^\circ\text{C}$ — от 30 с до 10 мин.

Комбинированное токовое реле РТК-1 (рис. 27.2, б) предназначается для защиты однофазных электродвигателей типов ДБСМ, ДАО, ДГ, АОЛБ, применяемых в бытовых машинах. В одном корпусе смонтированы пусковое и защитное реле. Пусковое реле — соленоидного типа. При включении электродвигателя в сеть пусковой ток проходит по катушке К, которая втягивает сердечник, в результате чего замыкается контакт SK, включающий цепь пусковой обмотки LS. С увеличением частоты вращения двигателя ток уменьшается, сердечник реле выходит из катушки и контакт SK отключает пусковую обмотку. Защитное реле действует так же, как реле РТ-10, описанное выше. Для защиты электродвигателя от частых пусков предусмотрен дополнительный нагреватель.

Пускозащитное реле РПЗ-12 предназначено для защиты однофазных электродвигателей серии 4А. Принцип действия его такой же, как и реле РТК-1. У реле РПЗ-12 диапазон срабатывания охватывает токи от 0,19 до 14,7 А.

Влияние окружающей температуры на защиту. Очень часто асинхронные двигатели и их пускозащитная аппаратура эксплуатируются

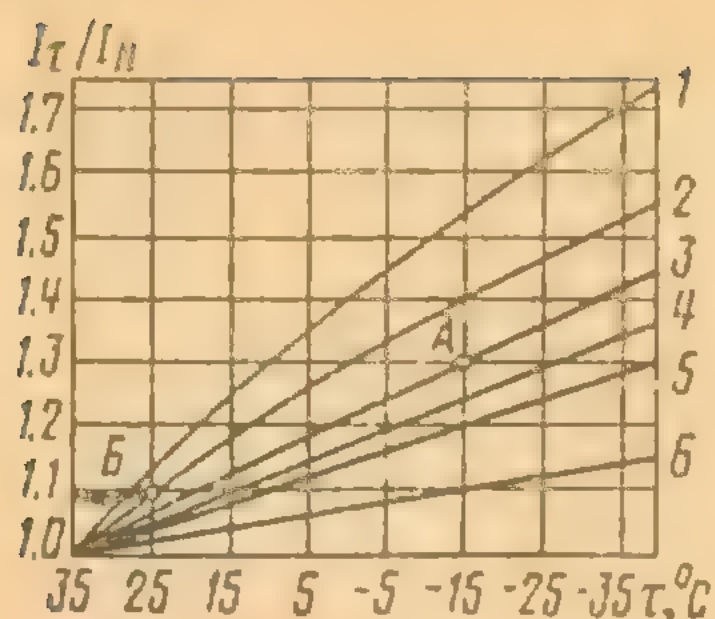


Рис. 27.3. Ориентировочная зависимость номинальных токов электродвигателя и нагревательного элемента от температуры окружающей среды:

I_{τ} — номинальный ток для данной окружающей температуры τ ; I_n — номинальный ток для температуры 35°C ; 1 — изоляция класса А; 2 — изоляция класса В; 3 — автомат типа АИИ50; 4 — реле типа ТРП; 5 — реле типов ТРА, ТРТ и ТРВ; 6 — реле типа ТРН.

в разных температурных условиях (например, зимой двигатель, установленный в животноводческом помещении, работает при положительной температуре, а его защитная аппаратура, находящаяся в тамбуре, — при отрицательной). На рисунке 27.3 приведены ориентировочные зависимости номинальных токов электродвигателя и нагревательного элемента от температуры окружающей среды.

У реле имеется разброс времени срабатывания. Реле ТРП с несменяемым нагревательным элементом не должно срабатывать в течение 20 мин при 1,05 номинального тока уставки и должно сработать в течение не более 10 мин после увеличения тока до 1,2 номинального тока уставки. Реле со сменными нагревателями не должно срабатывать в течение 50 мин при номинальном токе уставки и должно срабатывать в течение не более 10 мин после увеличения тока до 1,3 номинального тока уставки. Разброс же, наблюдающийся на характеристиках, значительно превышает указанные границы времени срабатывания и объясняется неточным подбором и плохим качеством монтажа нагревательных элементов.

Поэтому с целью надежного и своевременного автоматического отключения электродвигателей от сети при перегрузках тепловые реле нужно настраивать на специальном стенде. При этом исключается ошибка, возможная из-за допустимого (нормированного) разброса номинальных токов нагревательных элементов. Нагревательные элементы сами по себе достаточно просты для изготовления. Поэтому применение специального стенда позволяет рекомендовать электрикам самим подбирать и изготавливать нагревательные элементы с дальнейшей настройкой их на ток защищаемого электродвигателя.

27.4. СТЕНД ДЛЯ НАСТРОЙКИ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ И СУШКИ ОБМОТОК*

Элементы схемы стенда. Поскольку мощности электродвигателей, применяемых в сельском хозяйстве, сравнительно невелики, стенд для настройки тепловой защиты рассчитан на максимальные токи в диапазоне от 150 до 300 А (с учетом пусковых значений).

Эти токи можно получить, используя трансформаторы мощностью 0,25...0,5 кВ · А, например, типа ОСО-0,25 или ОСО-0,5 (однофазные, сухие, для целей освещения). На рисунке 27.4 приведена схема стенда для настройки защиты с использованием трансформатора

* Разработан автором в 1966 г. в МИИСПе.

ности (10...20 В · А) трансформатора *T1*. Назначение этого трансформатора — обеспечить безопасность работы обслуживающего персонала.

Если стенд предполагается использовать в помещении с сухим, хорошо изолирующим от земли полом, можно обойтись без трансформатора *T1*, установив вместо контактов *SK* зажимы 3 и 4, шунтируемые выключателем *S2*. Но тогда необходима сигнальная лампа *EL2*, чтобы было видно, что напряжение сети на стенд подано. Следует тщательно соблюдать правила техники безопасности, чтобы не оказаться под напряжением сети в месте подключения контактов управления *SQ* теплового реле *KK*.

Настройка тепловой защиты на стенде позволяет получить соответствующие характеристики защитных аппаратов путем имитирования пусковых токов и токов перегрузки электродвигателей и установки регулятора тока уставки в нужное положение, а также подгонки нагревательных элементов. При настройке защиты необходимо учитывать температуру окружающей среды.

Настройка тепловых реле прежде всего предполагает правильный выбор нагревательных элементов по номинальному току двигателя. Для этого пользуются специальными таблицами.

Порядок настройки защиты следующий. Подключают реле *KK*, как показано на рисунке 27.4. Замыкают рубильник *Q2* (шунтируют нагревательный элемент реле), а затем подают на стенд напряжение сети 220 В, включая рубильник (выключатель) *Q1*. При этом срабатывает промежуточное реле *K*, и напряжение поступает на первичную обмотку трансформатора *T2*. Затем, поворачивая рукоятку автотрансформатора или передвигая движок реостата *R*, устанавливают силу тока настройки реле по амперметру *PA2* (если ток настройки до 20 А) или по амперметру *PA1* (если ток настройки больше 20 А). В последнем случае амперметр *PA2* шунтируется рубильником *Q3*. После этого отключают выключатель *Q1* и размыкают рубильник *Q2*, а отсчет времени на электросекундомере устанавливают с нуля. Если в схеме стенда нет электросекундомера, то пользуются ручным секундомером.

Подготовив таким образом схему, включают сеть рубильником *Q1* (и одновременно секундомер) и рукояткой автотрансформатора *T3* или движком реостата *R* устанавливают заданный ток, так как при нагревании теплового элемента реле он будет уменьшаться. При срабатывании теплового реле размыкаются его контакты *SQ* в цепи катушки промежуточного реле *K*, отключается силовой трансформатор *T2*. Сигнальная лампа гаснет, электросекундомер прекращает отсчет времени (выключают ручной секундомер).

Условия настройки. При настройке тепловых реле следует стремиться, чтобы при токе, равном 5...7-кратному току двигателя, реле срабатывало за 11...9 с, а при 1,5-кратном — за 150...200 с, что будет соответствовать усредненной характеристике реле.

Выбор нагревательных элементов. При отсутствии нагревательных элементов заводского изготовления их можно сделать из нихромовой проволоки, наматываемой в виде спирали или змеевика (плоского), из ленты или пластины. Пластинчатые нагревательные элементы

Рис. 27.5. Усредненные защитные характеристики реле ТРН:
 1 и 2 — для реле (с холодного и горячего состояния) с заводскими нагревательными элементами; 3 и 4 — для реле с нагревательными элементами из трансформаторной стали (с холодного и горячего состояний), настроенных на стенде;
 $I_{ср}$ — ток срабатывания реле; I_y — ток тепловой установки

эффективнее, чем элементы из проволоки, поскольку обеспечивают хорошую передачу теплоты к плоской биметаллической пластине.

Пластинчатые нагревательные элементы могут быть выполнены из отожженной электротехнической стали.

Защитные характеристики реле ТРН с нагревательными элементами из электротехнической стали показаны на рисунке 27.5.

Благодаря настройке средние временные характеристики срабатывания с холодного и горячего состояния у реле ТРН (рис. 27.5, б) сближены почти в 3 раза.

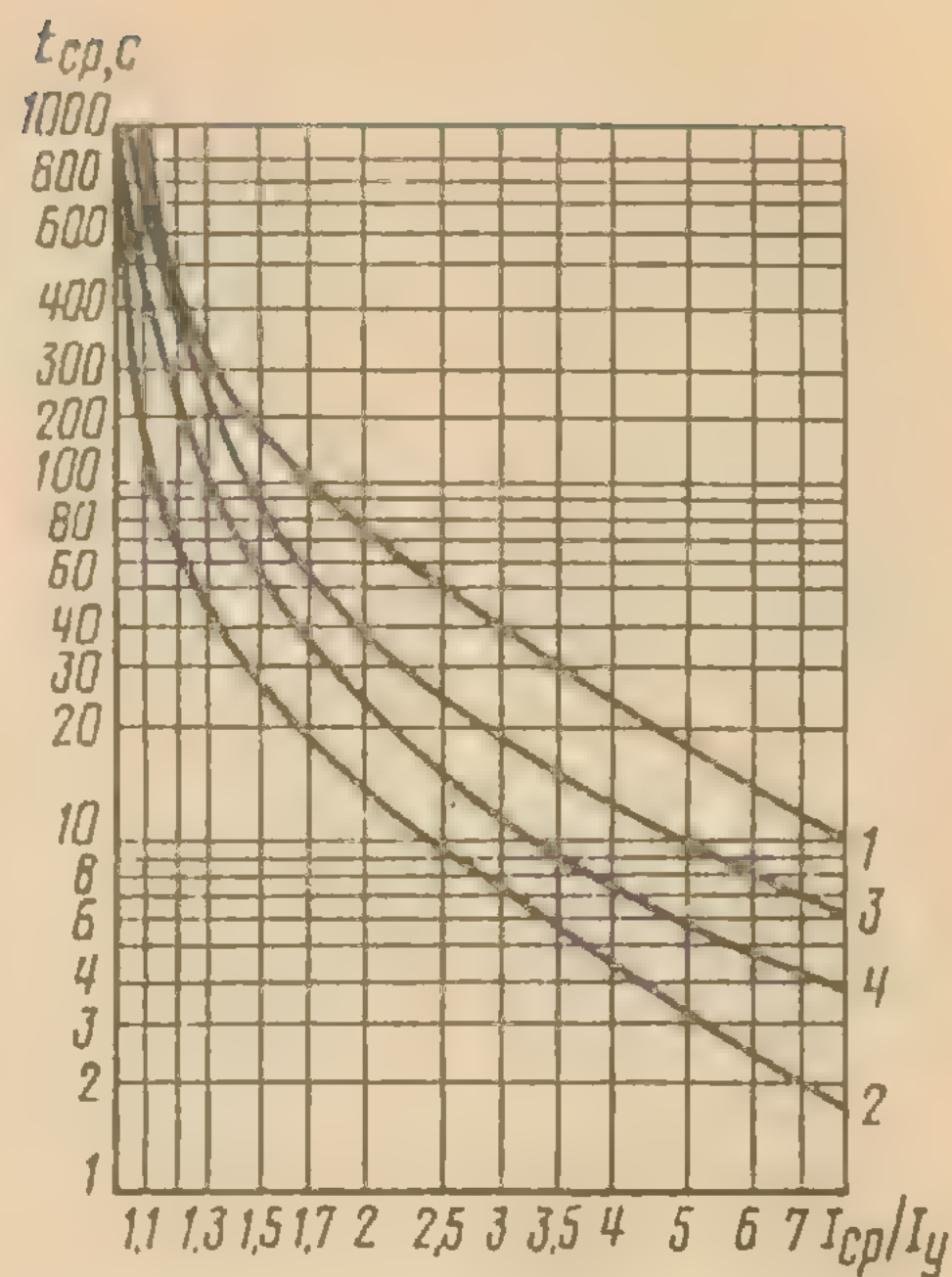
Пластинчатые нагревательные элементы в тепловом реле рекомендуется устанавливать так, чтобы они отстояли от биметаллической пластины на расстоянии 0,5...1,0 мм у ее неподвижного конца и 1,5...2 мм у ее свободного конца.

В таблицах 27.1 и 27.2 приведены данные, которыми можно воспользоваться при изготовлении нагревательных элементов тепловых реле.

При настройке тепловой защиты двигателей необходимо обязательно учитывать температуру окружающей среды у двигателя и у пускозащитной аппаратуры. Если электродвигатель и пускозащитный аппарат установлены в разных помещениях, то защита, кроме

27.1. Зависимость номинального тока нагревательных элементов от ширины полоски и толщины стали

Ширина нагревательного элемента, мм	Номинальный ток (А) при толщине стали		Ширина нагревательного элемента, мм	Номинальный ток (А) при толщине стали	
	0,35 мм	0,5 мм		0,35 мм	0,5 мм
3	4,0	13,2	10	16,0	22,3
4	6,0	14,5	11	17,5	23,2
5	7,5	15,8	12	19,0	24,1
6	9,0	16,4	13	21,0	25,2
7	11,0	18,8	14	22,0	26,2
8	13,0	20,1	15	23,5	27,1
9	14,5	21,3	16	25,0	28,0



27.2. Нагревательные элементы для реле ТРН из нихромовой проволоки (в виде плоского зигзага)

Номинальный ток, А	Диаметр проволоки, мм	Число зигзагов с шириной 10 мм и расстоянием между соседними поворотами 2 мм	Номинальный ток, А	Диаметр проволоки, мм	Число зигзагов с шириной 10 мм и расстоянием между соседними поворотами 2 мм
2,0	0,8	25	3,0	1,25	22
2,5	0,8	20	3,5	1,25	20

того, должна корректироваться не менее двух раз в год при смене сезонов.

27.5. УНИВЕРСАЛЬНЫЙ СТЕНД ЭЛЕКТРИКА
для обслуживания электродвигателей,
пускозащитной аппаратуры и других целей

Промышленность выпускает универсальный многоцелевой стенд (конструкции МИИСП*) и ряд его модификаций, предназначенных для проведения различных мероприятий по техническому обслуживанию электродвигателей мощностью до 75 кВт и пускозащитной аппаратуры.

Объем работ. На стенде можно не только проверять и настраивать тепловую и другую максимальную токовую защиту, подгонять нагревательные элементы в расцепителях автоматов и тепловых реле, калибровать плавкие вставки предохранителей, но и проверять и регулировать контактные системы низковольтных аппаратов, проверять контактные соединения в электрооборудовании и заземлениях.

Стенд позволяет проводить одновременную сушку обмоток большой группы электродвигателей (или одного двигателя до 150 кВт) непосредственно на месте и без их разборки. Причем контроль температуры ведется по одному двигателю, ток которого относительно номинального является наибольшим. Датчиком температуры служит сама обмотка. Стенд можно использовать также для сушки трансформаторов мощностью до 180 кВт · А, для дуговой сварки заземляющих и монтажных проводов током до 90 А, для определения начал и концов обмоток электрических машин, для зарядки аккумуляторов и при ремонте автотракторного оборудования.

В зимнее время стенд можно использовать для стартерного пуска автомобилей и тракторов.

Электрическая схема стенда показана на рисунке 27.6. В первичной цепи, которая включается в сеть 220 В, установлен автотрансформатор типа РНО, напряжение с которого в пределах от 0 до 240 В может подаваться в зависимости от положения переключателя *SI* или на первичную обмотку *W1* силового трансформатора *T2* (положение переключателя «Тр-р от сети»), или на зажимы розетки, обо-

* Разработан автором совместно с канд. техн. наук Н. В. Панариным.

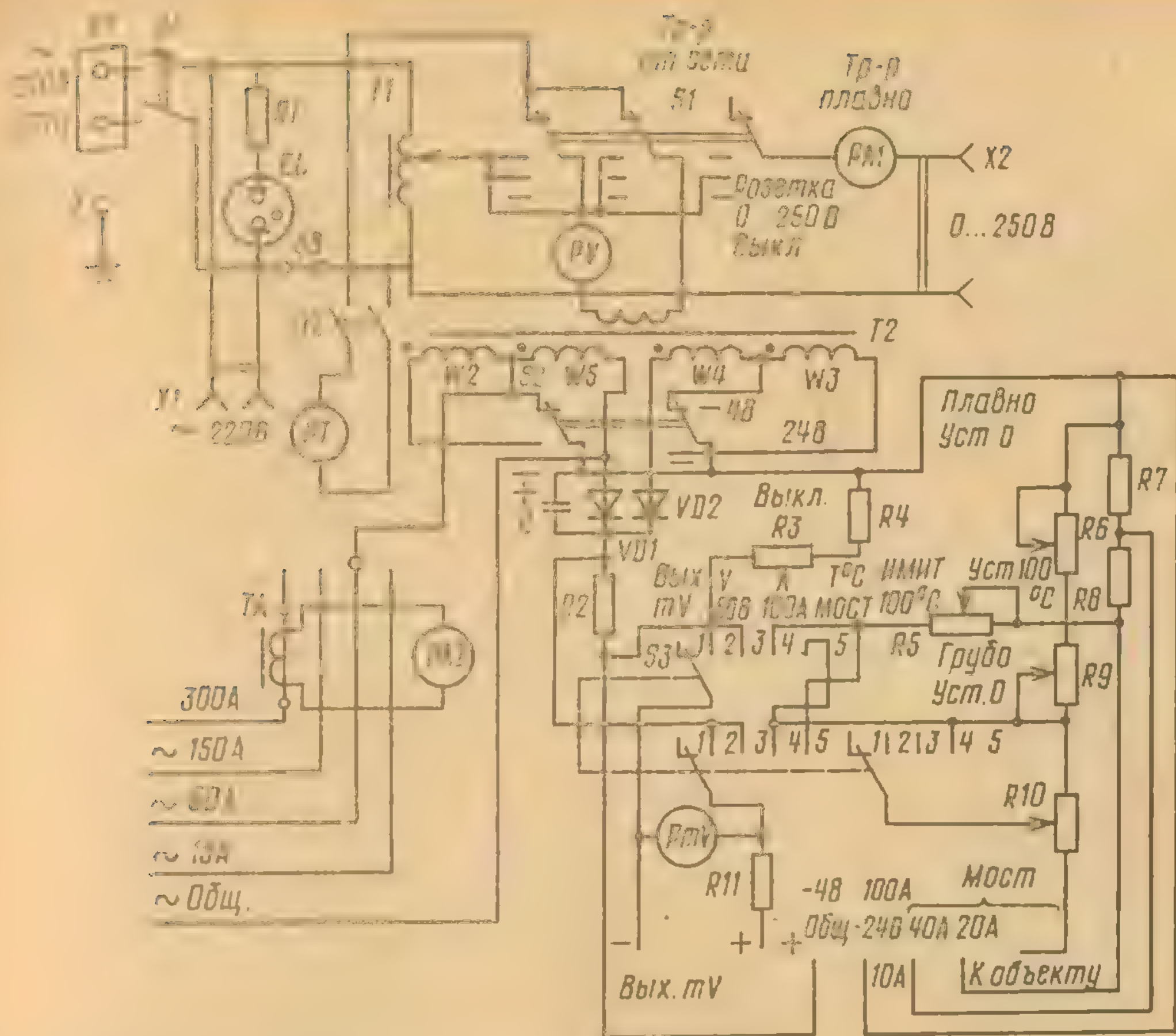


Рис. 27.6. Электрическая схема универсального стенда:

X1 — зажимы для подключения к сети; 3 — заземляющий контакт; QF — автоматический выключатель; EL — сигнальная лампа «напряжение включено»; R1 — сопротивление, ограничивающее ток лампы EL; SB — зажимы для подключения контактов теплового реле при настройке; T1 — автотрансформатор; T2 — силовой трансформатор; S1 — переключатель питания; S2 — переключатель напряжения постоянного тока; S3 — переключатель милливольтметра; X1 — розетка 220В; X2 — розетка для получения напряжения от 0 до 250 В; W1 — первичная обмотка силового трансформатора; W2, W3, W4 и W5 — вторичные обмотки; VD1, VD2 — диоды двухполупериодного выпрямителя; C — конденсатор; TA — трансформатор тока с четырьмя первичными обмотками.

значенной «0...250 В». При этом напряжение контролируют по вольтметру PV, а ток — по амперметру PA1.

Увеличение или уменьшение тока и напряжения во всех цепях при настройке защиты, сушке обмоток электродвигателей и других операциях достигается поворотом ручки автотрансформатора T1 в направлении, соответствующем указателю «меньше — больше».

При настройке тепловых и электромагнитных расцепителей реле и автоматов их подключают к зажимам «Переменный ток плавно: 15, 60, 150, 300 А». Многопредельность измерения в цепи переменного тока достигается при помощи трансформатора тока TA типа УТГ-5 с четырьмя первичными обмотками. Контакты тепловых реле при настройке подключают на зажимы «БК». Включают и выключают стенд выключателем QF с надписью «Вкл.-Выкл.». Схему стенда от короткого замыкания защищают предохранители с плавкой вставкой на 10 А или расцепители выключателя QF.



Рис. 27.7. Схема моста, образуемого элементами стенда и обмоткой электродвигателя.

Переключатель $S3$ при измерении тока ставят в положение 3, а при измерении напряжения — в положение 2. Для измерения падения напряжения при проверке контактов переключатель $S3$ ставят в положение 1, то есть в этом случае прибор используют как милливольтметр. На лицевой панели для этого предусмотрены зажимы «Вых. mV ».

При сушке обмоток милливольтметр используют как прибор для контроля температуры. Для этого переключатель $S3$ ставят в правое положение 4. Схема контроля температуры во время сушки обмоток двигателя работает следующим образом. Резисторы $R7$ и $R8$, $R6$ и $R9$, $R10$ и сопротивление обмотки электродвигателя составляют мостовую схему, где к одной диагонали подведено выпрямленное напряжение, а в другую через переменный резистор $R5$ и переключатель $S3$ включен милливольтметр PmV . Рассмотрим схему моста для случая, когда по условиям сушки обмотку электродвигателя включают на зажимы «Общ» и «20 А». Одним плечом моста (рис. 27.7) служит сопротивление обмотки электродвигателя, другим — резисторы $R7$ и $R8$. Эти два плеча включены между точками «Общ» и «20 А», то есть на источник питания. В диагональ измерения включен милливольтметр PmV с добавочным резистором $R5$. Изменения показаний милливольтметра будут пропорциональны изменениям сопротивления обмотки двигателя при нагреве, то есть температуре ее нагрева.

В начале сушки устанавливают определенный ток, протекающий через обмотки двигателя, меняя для этого напряжение на обмотке $W1$ трансформатора $T2$, а резисторами $R6$ и $R9$ фиксируют стрелку милливольтметра на нуле. Затем переключатель $S3$ переводят в положение «Имитация $100^{\circ}C$ », а резистором $R5$ устанавливают стрелку прибора на середину или конец шкалы. В первом случае вся шкала будет соответствовать превышению температуры на 100° , а во втором — на 50° . После этого переключатель $S3$ переводят в положение $T^{\circ}C/\text{мост}$.

Во вторичной цепи силового трансформатора предусмотрен также выпрямитель. Постоянный ток необходим для сушки обмоток машин с контролем их температуры, проверки контактных систем и соединений силовых цепей электрооборудования, настройки защиты, работающей на постоянном токе, а также для сварки монтажных и заземляющих проводов.

Выпрямитель собран на двух мощных кремниевых диодах VD , позволяющих получить выпрямленный ток до 200 А при напряжении 24 В.

Выпрямленный ток и напряжение измеряют при помощи милливольтметра PmV , шунта $R2$ на 100 А и добавочных резисторов $R3$ и $R4$. Пе-

27.6. ПРОВЕРКА НА СТЕНДЕ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ. СВАРКА ПРОВОДОВ

Плохое состояние силовых контактов в пускозащитной аппаратуре, а также переходных контактов в соединениях вызывает их перегрев, последующее быстрое окисление, а в дальнейшем приводит к выходу оборудования из строя. В соответствии с ГОСТом превышение температуры токоведущих частей над температурой окружающей среды 35° при номинальном токе не должно быть больше допустимых значений (например, для главных контактов магнитных пускателей 85° , для блок-контактов 50°).

В сельскохозяйственных помещениях с повышенной влажностью и агрессивной средой окисление нагретых контактов носит резко прогрессирующий характер. Очень часто причиной обрыва фазы в сельских электроустановках служит окисление и нарушение контакта у магнитных пускателей, автоматов, пакетных выключателей.

Контроль контактов. Наиболее приемлемым способом контроля контактных соединений следует считать измерение милливольтметром падения напряжения на них при пропускании постоянного тока от источника тока напряжением 2...4 В.

В нормальном состоянии падение напряжения на болтовом и заклепочном контактных соединениях для аппаратов с номинальным током до 300 А составит $2,5 \text{ мВ} \pm 0,5 \text{ мВ}$, свыше 300 А — менее 1,5 мВ.

Степень ухудшения контакта можно быстро определить на стенде. Состояние контактов магнитных пускателей и автоматов следует проверять одновременно с ремонтом силового оборудования, а состояние контактов автоматов — после половины гарантированного числа отключений предельных токов короткого замыкания.

При неудовлетворительном состоянии контактов их зачищают бархатным напильником или надфилем. После зачистки или ремонта контактных систем необходимо проверить качество их подгонки.

У аппаратов со скользящими контактами (рубильники, пакетные выключатели) падение напряжения ориентировочно составляет 10...20 мВ, а у аппаратов со стыковыми контактами (магнитные пускатели, автоматы) — до 70 мВ. Для контактов автоматов типов АП50 и АК50 допускается падение напряжения до 110 мВ.

При проверке контактов у автоматов с тепловыми расцепителями во избежание повреждения милливольтметра следует устанавливать ток, заведомо меньший тока расцепителя, или подводить его, минуя расцепитель. Ток в первом случае не должен быть ниже четверти номинального тока автомата, а падение напряжения следует привести к номинальному значению.

Контакты «нож — контактная стойка» регулируют, сжимая и разжимая стойку, с таким расчетом, чтобы усилие на ноже было значительным. Недостаточно сжатый клиновой контакт имеет большое переходное сопротивление. В медных рубильниках при сухом трении и подгорании образуются задиры, существенно ухудшающие состояние контакта. Зачищать контакты наждачной бумагой не рекомен-

дуются, так как наждачные зерна, проникая в металл, увеличивают переходное сопротивление. После зачистки бархатным напильником и проверки контакта контактирующие места смазывают техническим вазелином.

Падение напряжения на контактных соединениях аппаратов с номинальными токами больше 200 А можно измерять при токах ниже номинального, но не менее чем $0,25 I_n$. Полученные значения напряжения необходимо привести к номинальному значению тока по формуле

$$\Delta U = \Delta U_n I_n / I, \quad (27.9)$$

где ΔU_n — падение напряжения, измеренное при токе I_n ; I_n — номинальный ток аппарата.

Контакты должны быть проверены также на одновременность их замыкания, так как неодновременное замыкание вызывает их подгорание и оплавление. С этой целью последовательно с каждым разрывом включают лампочку к источнику 12 В. Затем выключатель медленно включают вручную до первого соприкосновения одной из контактных пар (загорается одна из лампочек). Это положение отмечают на направляющем устройстве. Вторую отметку наносят при загорании последней лампы. Одновременность замыкания регулируют в соответствии с инструкцией, прилагаемой заводом к аппарату. Поверхность соприкосновения контактов измеряют шупом, а вжим — динамометром или грузом.

Минимальное напряжение срабатывания электромагнитов проверяют при помощи автотрансформатора, а действие расцепителей автоматов — при помощи стенда электрика, а если стенда нет, то при помощи трансформатора тока.

Сварка. При ремонте и обслуживании электрооборудования можно пользоваться стендом для сварки током до 90 А с ПВ—0,15 (1,5 мин работы и 8...10 мин паузы).

Применять стенд только для сварочных работ и при токах выше указанных, не разрешается!

При сварке заземляющих конструкций и проводов токами выше 50 А во избежание выхода из строя автотрансформатора переключатель *S1* ставят в положение «*Tr-p от сети*» (рис. 27.6).

Сварку выполняют при помощи обычного электрододержателя и металлических электродов диаметром до 3 мм, предназначенных для сварки постоянным током.

Медные провода сваривают, пользуясь угольными электродами и специальными клещами, флюсом служит бура. На стенде можно сваривать встык одножильные медные провода диаметром до 4 мм, что весьма удобно при ремонте электрических машин и монтаже проводов. Шов получается очень прочным, а диаметр в месте сварки практически не превышает 1,1...1,2 диаметра провода.

Сварку проводов на переменном токе до 60 А при напряжении 6 В. Свариваемые провода зажимают рингами в специальных клещах. Провода соединяют встык, а между ними устанавливают ступенчатую латунную фольгу, по площади равную 2,3 площадью сечения про-

подп. Свариваемое место посыпают бурой. Затем включают стелы и увеличивают ток до тех пор, пока не расплавится фольга и не образуется шов одинакового с проводом диаметра.

27.7. ТЕМПЕРАТУРНАЯ ЗАЩИТА

Температурную защиту выполняют при помощи устройства встроенной температурной защиты (УВТЗ). В качестве датчиков температуры для устройства используют позисторы — полупроводниковые элементы, изменяющие свое сопротивление в зависимости от температуры окружающей среды. В цепи, в которую включен позистор, изменяется сила тока пропорционально изменению температуры (см. п. 19.3).

Позисторы встраивают внутрь лобовых частей обмотки электродвигателя в заводских условиях. Их подключают к внешнему устройству (рис. 27.8), состоящему из усилителя сигнала и электромагнитного реле, контакты которого находятся в цепи катушки магнитного пускателя.

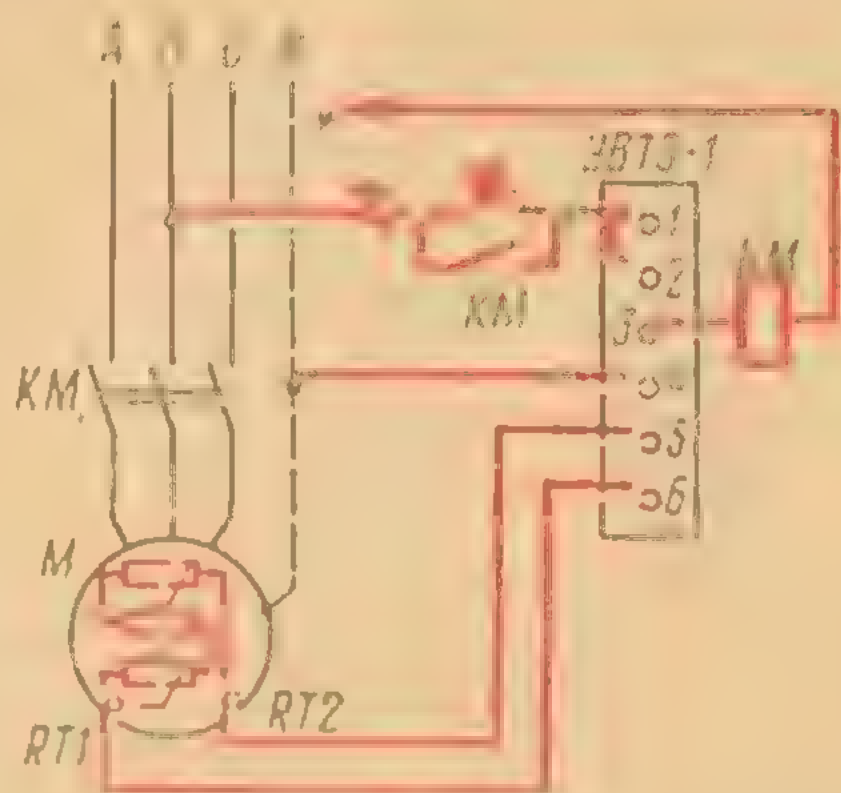
Температурная защита электродвигателей — прямая, а тепловая защита (от тока, превышающего номинальный ток в течение некоторого времени) — косвенная.

Укоренилось мнение, что температурная защита предпочтительнее. Но она имеет ряд серьезных недостатков: необходимо тщательно встраивать температурные элементы — датчики в обмотку двигателя; наличие инерционности этих элементов, что отрицательно проявляется при больших перегрузочных и пусковых токах (затяжных); для повышения чувствительности реле несколько элементов надо включать последовательно; двигатели со встроенной температурной защитой можно объединять только с пускателем и нельзя применять при ручном управлении. Вследствие этих обстоятельств температурная защита не получает широкого распространения.

В ряде стран предпочтение отдают тепловым реле. Для повышения надежности их работы совершенствуют их устройство таким образом, чтобы время-токовые характеристики реле и защищаемого двигателя были подобными, а поле рассеяния характеристик пограничного тока было по возможности уже. Это реле должно выдерживать кратковременную перегрузку, соответствующую току заторможенного электродвигателя.

Лишь в тех случаях, когда тепловые реле не могут обеспечить защиту двигателей, например при большом числе включений двигателя в час и с резкопеременной нагрузкой, а также при ра-

Рис. 27.8. Включение УВТЗ в схему управления однофазным электродвигателем. Концы обмоточный звездочкой, подключается к фазе А или С при катушке магнитного пускателя на 380 В или к нулевому проводу при катушке на 220 В.



боте их в окружающей среде с высокой температурой или в условиях с плохой вентиляцией обмоток (ток, потребляемый из сети, не превышает номинальный, но обмотка перегревается из-за недостаточной теплоотдачи — охлаждения), следует применять встроенную температурную защиту. В сельском хозяйстве в таких условиях могут оказаться 4...10% электродвигателей.

27.8. ЗАЩИТА ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ОТ РАБОТЫ НА ДВУХ ФАЗАХ

«Правила устройства электроустановок» допускают применение специальной защиты от работы на двух фазах (от потери фазы) лишь в порядке исключения для двигателей, защищенных только плавкими предохранителями, то есть необорудованными тепловой защитой. Хорошо отстроенное тепловое реле вполне надежно защищает электродвигатель от потери фазы, если нагрузка на валу не менее 65...70% номинальной и нагревательный элемент выбран по номинальному току электродвигателя. Если обмотки соединены в звезду, при обрыве фазы ток статора возрастает в 1,7...2 раза и составляет (1,2...1,4) $I_{н.дв.}$, что достаточно для надежного срабатывания реле.

Если двигатель работал при нагрузке, меньшей чем 50% номинальной, и произошла потеря фазы, то ток не превысит номинального и двигатель может продолжать работать. Потеря фазы при полной нагрузке может привести к «опрокидыванию» двигателя, то есть к его полному торможению. Запуск на двух фазах даже при

отсутствии нагрузки невозможен. Как в первом, так и во втором случае по обмоткам заторможенного двигателя будет проходить ток, равный примерно 87% пускового тока трехфазного режима. Тепловая защита сработает за 10...15 с и исключит перегрев обмоток.

Применяя правильно отстроенные автоматы и тепловые реле в магнитных пускателях, а также периодически проверяя их контактные системы, можно уменьшить вероятность появления подобных режимов работы электродвигателя и обеспечить надежную защиту.

В случае соединения обмоток в треугольник при работе двигателя на двух фазах токи в обмотках возрастают сильнее, чем токи в линейных проводах. С целью повышения чувстви-

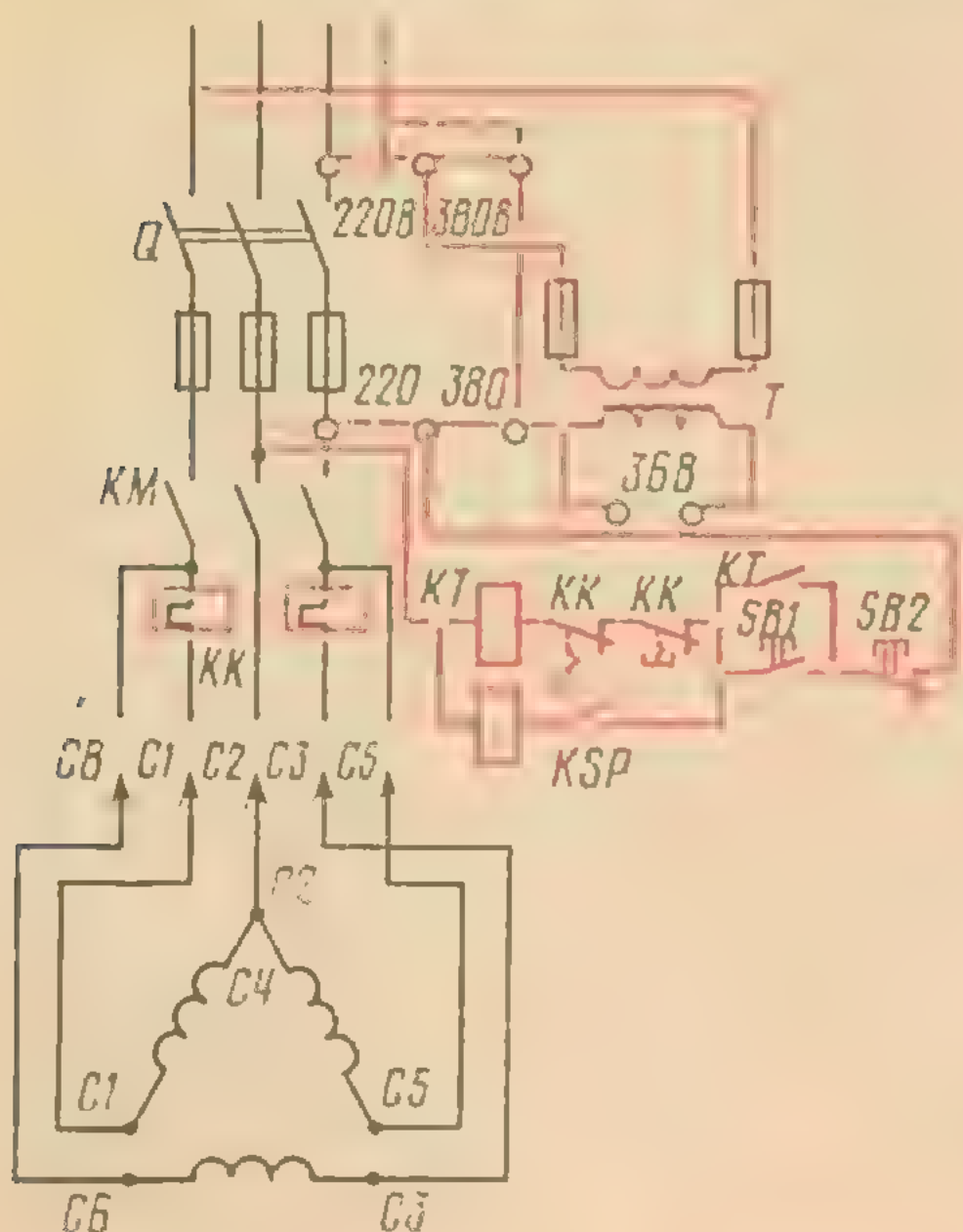


Рис. 27.9. Включение нагревательных элементов реле для повышения чувствительности защиты от работы на двух фазах при соединении обмоток электродвигателя в треугольник.

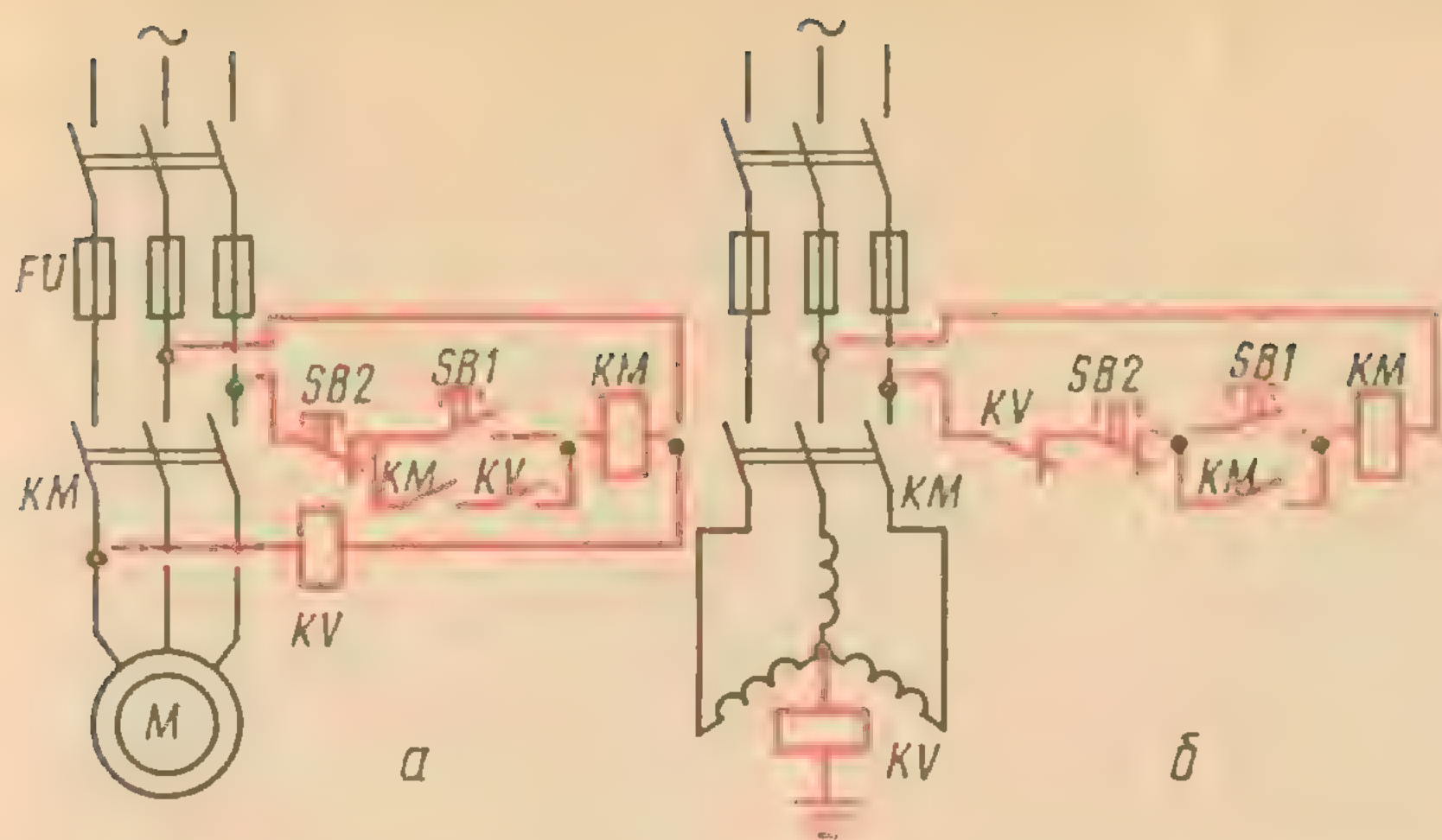


Рис. 27.10. Схема защиты от работы на двух фазах при помощи реле напряжения на 220(380) В (а) и на 12...48 В (б).

тельности защиты тепловые элементы могут быть включены так, как показано на рисунке 27.9.

При настройке защиты на водокачках необходимо иметь в виду, что при обрыве фазы ток электродвигателей погружных насосов увеличивается на 20...30%, а пускозащитная аппаратура, установленная в неотапливаемых помещениях, будет значительно загрублена зимой. Поэтому при настройке защиты следует принимать температурные поправки или при наступлении зимы установить регулятор тока уставки на 2...3 деления ниже. Подобным требованиям наиболее полно отвечает реле типа ТРН, в котором применен температурный компенсатор. Настройку защиты целесообразнее провести по рабочему току двигателя.

Если магнитный пускатель не оборудован хорошо отлаженной тепловой защитой, то для защиты электродвигателя от работы на двух фазах можно использовать схему с реле РП или РПУ, рассчитанным на линейное напряжение сети (рис. 27.10, а). Контакт этого реле включается в цепь катушки магнитного пускателя. При обрыве любой из фаз электродвигатель, если он имеет номинальную нагрузку, будет отключен. Недогруженный двигатель может не отключиться, хотя и не сгорит.

В практике применяют и схему, приведенную на рисунке 27.10, б. Между нулевой точкой обмотки электродвигателя, соединенной в схему «звезда», и нулевым проводом включают катушку реле на 12...48 В, а размыкающий контакт реле — в цепь обмотки магнитного пускателя.

Промышленность выпускает специальное фильтровое реле обрыва фаз марки ЕЛ-8.

27.9. ФАЗОЧУВСТВИТЕЛЬНАЯ ЗАЩИТА ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Традиционная тепловая защита при помощи настроенных тепловых реле хорошо защищает двигатель лишь от перегрузок по току,

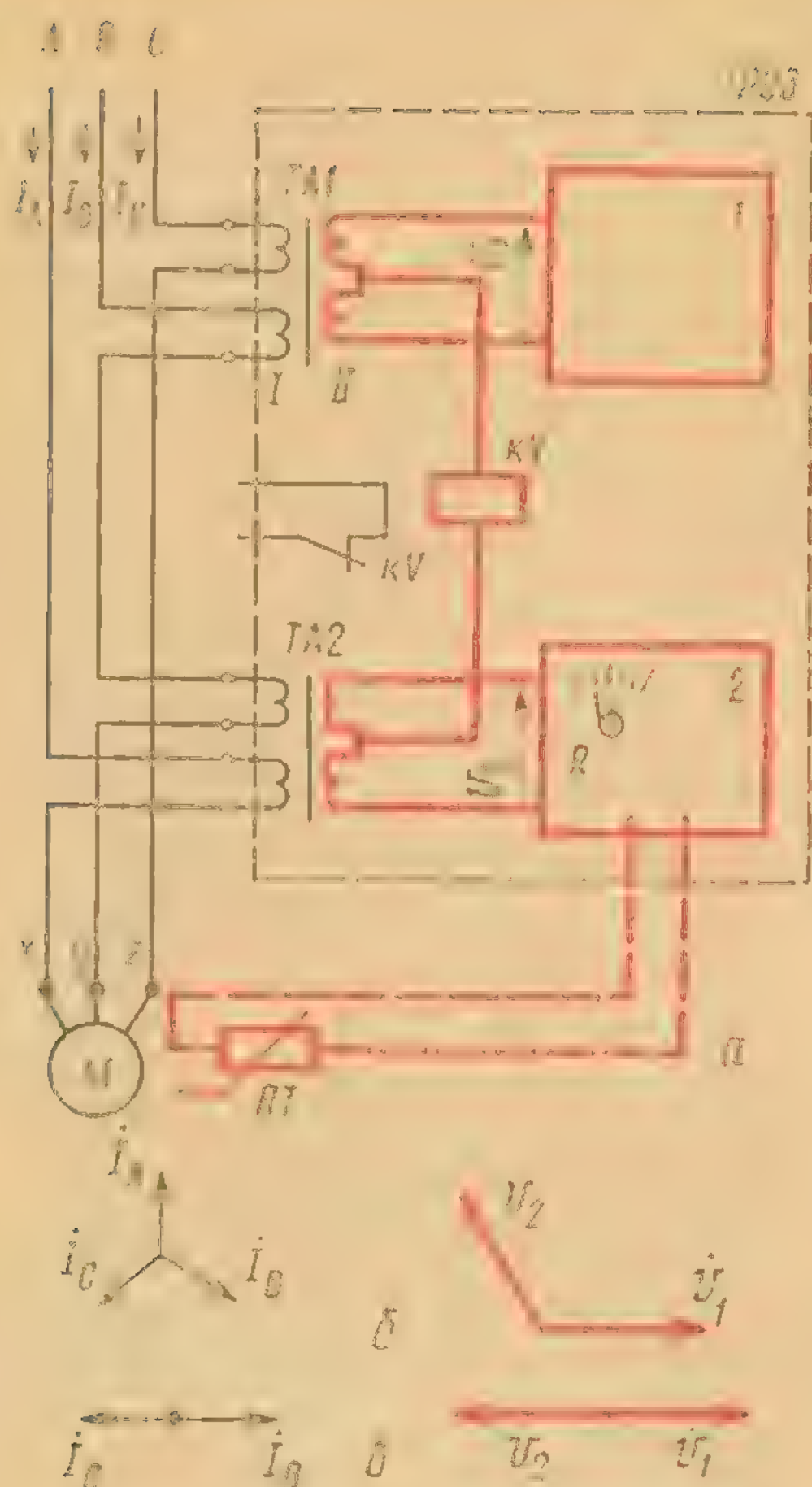


Рис. 27.11. Схема включения фазочувствительного защитного устройства ФУЗ:

1 — блок со схемой контроля угла сдвига фаз (защита от потери фазы); 2 — блок со схемой защиты от перегрузки по току; R — резистор регулирования уставок; RT — позистор, встраиваемый в лобовую часть обмотки защищаемого электродвигателя.

но ненадежно — при обрыве фазы, при включении двигателя с заторможенным ротором и вовсе не реагирует на нарушение охлаждения. Температурная защита при помощи устройств УВТЗ надежно работает при нарушении охлаждения и при перегрузках по току, но не защищает от потери фазы и при включении двигателя с заторможенным ротором (температура обмотки растет быстрее, чем нагревается резистор, встроенный в лобовую часть обмотки). Другими словами, ни та, ни другая защита не обладает универсальностью.

Более универсально при защите трехфазных электродвигателей разработанное в Латвийской сельскохозяйственной академии фазочувстви-

тельное устройство защиты ФУЗ. Его принцип действия можно уяснить из схемы, приведенной на рисунке 27.11, а. Оно состоит из двух фазовращательных трансформаторов тока ТА, у которых первичные обмотки 1 — сменные, имеющие от 1...2 витков (для двигателей с номинальным током 16...32 А) до 16...32 витков (1...2 А). Вторичные обмотки трансформаторов, между средними выводами которых включена катушка защитного реле К, выведены в схему 1 (контроля угла сдвига фаз между векторами напряжения $\vec{U}_1$ и $\vec{U}_2$ во вторичных обмотках трансформаторов тока) и схему 2 контроля за перегрузкой. В нормальном режиме угол сдвига фаз между $\vec{U}_1$ и $\vec{U}_2$ равен около 120° (рис. 27.11, б), а при обрыве фаз становится равным 180° (рис. 27.11, в), что вызывает срабатывание реле К, контакты которого размыкают цепь магнитного пускателя.

Ток срабатывания защиты от перегрузки регулируется при помощи резистора R в пределах от 0,65 до 1,35 $I_{ном}$. При надлежащей настройке эта защита срабатывает за 30...50 с, если перегрузка составляет 50%, и за 6...10 с при коротких замыканиях.

Для того чтобы обеспечить отключение электродвигателя при нарушении его охлаждения, в цепь защиты включается позистор RT , размещенный в лобовой части обмотки электродвигателя.

При выборе типа защиты трехфазного электродвигателя мощностью

до 20 кВт можно использовать рекомендации, приведенные в таблице 27.3.

27.3. Рекомендуемые способы защиты трехфазных электродвигателей мощностью до 20 кВт

Машины, механизмы	Характер нагрузки	Основные аварийные режимы	Рекомендуемая защита
Станки (токарные, фрезерные, сверлильные и др.)	Переменная	ОФ, ТП	Тепловые реле РТЛ, ПТТ, ТРН
Насосы:	Постоянная	ОФ, ЗР, (ПС)	ФУЗ-М, ФУЗ-И
центробежные	— » —	ОФ, ЗР, ПС	ФУЗ-И
погружные		ОФ, ТП, ЗР	ФУЗ-М, ТРН и др.
Транспортеры зерна	Слабо изменяющаяся		
Вентиляторы	То же	ОФ, ЗР	ФУЗ-М, ТРН, РТЛ и др.
Электрокалориферы	— » —	ОФ, ЗР (ПС) НО	ФУЗ-М, ФУЗ-И
Дробилки, измельчители	Резко переменная	ОФ, ТП, ЗР	УВТЗ, ТРН, РТЛ
Мельницы	То же	ОФ, ТП, НО	УВТЗ, ТРЛ, ТРН, ПТТ
Грануляторы	— » —	ОФ, ТП, ЗР, ПС	УВТЗ, ФУЗ-И

Примечание: ОФ — обрыв фазы, ТП — технологическая перегрузка, ЗР — заторможенный ротор, ПС — понижение сопротивления изоляции, НО — нарушение охлаждения.

Следует помнить, что использование даже самых современных устройств защиты электродвигателей может дать эффект только при технически грамотной их эксплуатации.

27.10. ОБЪЕМ ПЛАНОВО-ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ ОСМОТРОВ И РЕМОНТОВ ПУСКОЗАЩИТНОЙ АППАРАТУРЫ

Технические уходы и текущие ремонты для аппаратуры управления проводят одновременно с теми же мероприятиями для силового электрооборудования.

Объем работ в процессе технического ухода следующий. Снимают крышку или кожух аппарата, удаляют пыль и грязь (продувка, протирка). Копоть, сажу и масляные пятна удаляют обтирочным материалом, смоченным в бензине.

Затем проверяют надежность крепления аппаратов к основанию, целостность уплотнений кожухов, а также надежность заземления и присоединения силовых проводов и проводов цепи управления, подтягивают ослабевшие винты и гайки, зачищают подгоревшие контакты. Проверяют состояние проводов и их изоляции, при необходимости их заменяют или накладывают изоляционную ленту.

На ножах рубильников не должно быть раковин, подгоревших или окислившихся мест. Напильны и брызги металла при этом зачищают бархатным напильником, а слой окиси снимают, включая и вы-

ключая аппарат в обесточенном состоянии. Ножи рубильников должны замыкаться сравнительно легко, одновременно и без перекосов. Следует обратить внимание на состояние панели (трещины, поврежденные и выгоревшие места не допускаются).

Плавкие вставки должны соответствовать расчетным токам. Трещины и повреждения патронов и фибровых стенок недопустимы.

В пакетных выключателях и переключателях проверяют четкость работы фиксаторов, убеждаются в отсутствии трещин и обугливания колец пакетов.

В автоматических выключателях не допускаются трещины в корпусе и крышке, заедание рычагов и кнопок управления. С дугогасительных камер и контактов брызги металла снимают надфилем. При выгорании или износе до 0,5 мм металлокерамических накладок контактов автоматический выключатель заменяют. Текущий ремонт автоматических выключателей не проводят.

Магнитные пускатели проверяют на одновременность замыкания контактов, отсутствие перекосов контактной системы, легкость перемещений и отсутствие заеданий подвижной части магнитной системы. Катушки с обуглившейся или осыпающейся изоляцией заменяют.

Сопротивление изоляции катушки должно быть не менее 1 МОм. В противном случае изоляцию следует просушить. Катушки укрепляют на сердечнике при помощи гетинаксовых или текстолитовых клиньев.

Подгоревшие контакты зачищают, ослабевшие винты подтягивают. После замены или зачистки контакты проверяют щупом 0,05 мм. Щуп не должен занимать более $\frac{1}{3}$ площади контактной поверхности; смещение контактов по ширине должно быть не больше 1 мм.

При износе одного из контактов можно подогнуть контактные пластины, чтобы добиться одновременного замыкания всех контактов.

В деионной решетке сильно подгоревшие пластины и вышедшие из строя камеры заменяют новыми.

При замкнутом состоянии магнитной системы не должно быть дребезжания и чрезмерного шума. Следы коррозии мест касания подвижной и неподвижной частей магнитопроводов зачищают шаблоном вдоль листов магнитопровода и смазывают машинным маслом. У реверсивных двигателей следует проверить также механическую блокировку.

Тепловые реле магнитных пускателей проверяют и настраивают на стенде. Рычаг возврата реле должен легко и свободно передвигаться в пазах и возвращаться в исходное положение под действием пружины. Кнопки управления должны легко и надежно замыкать и размыкать электрические цепи.

Контрольные вопросы к главе 27. 1. В каких случаях следует применять для включения двигателя рубильник с предохранителями? Когда целесообразно использовать автоматические выключатели? Когда следует использовать магнитные пускатели? 2. Как выбрать плавкую вставку предохранителя и токовую уставку автоматического выключателя? 3. Как устроено тепловое реле? 4. Как включается тепловое и токовое реле для защиты однофазных электродвигателей в бытовых установках? 5. Расскажите о настройке тепловых реле, пользуясь схемой стенда

- электрика. 6. Что вы знаете о температурной защите? 7. Как может быть осуществлена защита трехфазных электродвигателей от работы на двух фазах? 8. Какие требования предъявляются при обслуживании пускозащитной аппаратуры? 9. Как работает фазочувствительная защита?

Глава 28. СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ И СПОСОБЫ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

28.1. ПЛАНИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Эффективность электрифицированных установок зависит от уровня их использования — числа часов работы в году, степени загрузки, средневзвешенного коэффициента мощности, степени автоматизации, надежности электроснабжения. Все эти факторы необходимо уметь оценивать и на основе результатов оценки планировать мероприятия по повышению эффективности использования электроэнергии, поиску новых мест ее приложения с учетом технологии производства, физиологии объектов, способов и средств механизации и автоматизации процессов.

Надежность электроснабжения оценивается ущербом, наносимым перерывами в подаче напряжения. Машинное доение коров, например, не допускает перерыва в подаче напряжения, так как ущерб при этом составляет от 0,07 до 0,8 руб. на одну корову в час. На механизированной свиноферме перерыв в электроснабжении свыше 3 ч дает убыток 0,01 руб. на каждую голову за каждый следующий час перерыва. При выключении электроосвещения бройлерного птичника более чем на 1 ч в темное время суток гибнет примерно 3% поголовья. При инкубации яиц перерыв в электроснабжении свыше 2 ч дает убыток 37 руб. на каждые 10 тыс. яйцемест в каждый следующий час перерыва, а при перерыве в 5...12 ч выход цыплят уменьшается на 3...10%.

По этой причине к первой категории электроснабжения относят следующие процессы: на крупных животноводческих фермах доение, сбор, охлаждение, первичную обработку и переработку молока, смешивание и раздачу кормов, водоснабжение, вентиляцию и дежурное освещение; при выращивании и откорме свиней подготовку и раздачу кормов для подсосных поросят, установки микроклимата в безоконных свинарниках с поголовьем более 6 тыс. голов под одной крышей, дежурное освещение; при откорме крупного рогатого скота подготовку и раздачу кормов для телят до 4-месячного возраста на выращивании, установки микроклимата, аварийное освещение; в птицеводстве установки кормоприготовления, раздачи кормов, поения, местного обогрева молодняка, сбора, приема и обработки яиц, инкубацию яиц, вентиляцию, технологическое освещение.

Потребители первой категории должны иметь резервные источники электроснабжения — дизельные электростанции типов АСДА (от 5 до 50 кВт), ПЭС (10...12 кВт), ДЭСМ (30...50 кВт), ДГМА (48...100 кВт) и др.

Для оценки эффективности режимов работы электроустановок пользуются коэффициентами спроса, заполнения суточного графика нагрузок, загрузки, использования мощности, средневзвешенным $\cos \varphi$, удельными нормами потребления электроэнергии. Эти показатели приводятся в таблицах 28.1...28.4.

28.1. Коэффициенты спроса и заполнения суточного графика на фермах

Объект	Коэффициент		Объект	Коэффициент	
	спроса	заполнения суточного графика		спроса	заполнения суточного графика
Кормоцех	0,25	0,3	Свиноводческая ферма	0,19	0,5
Молочнотоварная ферма	0,20	0,6	Свинарник	0,15	0,2
Коровник	0,29	0,3	Молокозавод	0,3	0,5

28.2. Показатели режимов работы электроустановок на объектах животноводства

Объект	Коэффициент		Средневзвешенный $\cos \varphi$
	загрузки	использования мощности	
Доильные установки	0,82...0,85	0,18...0,20	0,80...0,82
Кормораздатчики	0,44...0,50	0,01...0,014	0,68...0,75
Навозоуборочные транспортеры	0,46...0,48	0,01...0,03	0,70...0,73
Холодильные установки	0,60...0,64	0,10...0,18	0,75...0,80
Водонагреватели ВЭТ	1,0	0,40...0,45	1,0
Вентиляционные установки в свинооткормочниках	0,85...0,90	0,62...0,66	0,82...0,85
Молочное отделение (сепараторы, очистители, насосы)	0,80...0,83	0,04...0,05	0,80...0,83
Кормоцех для откормочных ферм	0,50...0,60	0,04...0,07	0,70...0,75
Коровник с молочным отделением	0,70...0,76	0,14...0,16	0,93...0,96
Свинарник с вентиляционными установками	0,53...0,56	0,10...0,12	0,73...0,80
Откормочник крупного рогатого скота	0,45...0,48	0,03...0,06	0,70...0,75
Молокозавод	0,70...0,80	0,11	0,80...0,82

Потребность в электроэнергии при планировании определяют путем умножения объема производства (поголовья, количества подлежащего переработке материала и т. п.) на удельные нормы потребления.

В таблицах 28.3 и 28.4 приведены ориентировочные нормы потребления электроэнергии на одну голову скота.

28.3. Годовое потребление электроэнергии на одну голову скота на фермах

Животноводческий объект	Норма годового потребления электроэнергии на одну голову, кВт · ч			
	освеще- ние	электро- механиза- ция	вентиля- ция	всего
ферма с привязным содержанием коров	97	296	80	473
ферма с беспривязным содержанием коров	97	90	80	267
Коровник с привязным содержанием	42	148	40	230
Коровник с беспривязным содержанием	42	90	40	154
Родильное отделение и профилакторий	12	—	20	32
Телятник	25	—	20	45
Ферма дорашивания и откорма крупного рогатого скота	22	25	—	50
Свиноматочная ферма	26	194	20	220
Свинооткормочная ферма	4	20	10	34
Комбикормовый цех	10	339	44	393
Овцеводческая ферма	0,2	3	—	3,2

28.4. Годовое потребление электроэнергии на одну голову скота на комплексах

Комплекс	Годовое потреб- ление электро- энергии на одну голову, кВт · ч
Молочный на 1200 коров с привязным содержанием	3270
Молочно-мясной на 800 коров с привязным содержанием	905
Молочный на 800 коров с привязным содержанием	843
Молочный на 1200 коров с беспривязным содержанием	690
Молочный на 1200 коров с боксовым содержанием	3485
Откормочный на 10 тыс. голов молодняка крупного рогатого скота (выращивание и откорм)	436
Откорм молодняка крупного рогатого скота:	
30 тыс. голов	14,3
20 тыс. голов	14,5
Свиноводческий с выращиванием и откормом:	
108 тыс. голов	124,3
54 тыс. голов	146,6
24 тыс. голов	183,3
12 тыс. голов	208
Племенная птицефабрика яичного направления:	
25 тыс. кур-несушек	122
50 тыс. кур-несушек	81

Показатели оптимального использования отдельных машин, применяющихся в животноводстве, приведены в таблице 28.5

Коэффициенты и показатели, приведенные в таблицах 28.1...28.5 — статистически получены на основании обработки наблюдательных данных при натурной обработке сведений из типовых проектов объектов сельского хозяйства. Эти коэффициенты позволяют судить о совер-

28.5. Оптимальная загрузка машин на животноводческих объектах

Наименование машины	Рекомендуемая мощность электродвигателя типа АО2, кВт	Продолжительность использования в году, ч	Оптимальная производительность машины, т/ч	Удельный расход электроэнергии на единицу продукции, кВт ч
<i>Кормоцех</i>				
Варочный котел ВКС-3М	3,0	100...150	1,5	2,5...2,2
Дробилка кормов:				
КДМ-2,0	30,0	600...700	3...3,5	8,4...8,1
ДКУ-1,0	13,0	700...750	1,2...1,5	12,6...12,0
Измельчитель кормов «Волгарь-5»	22,0	500...700	5,5	4,52
<i>Фермы крупного рогатого скота</i>				
Раздатчик кормов ТВК-80А	3,0	50...60	14,0	0,38
Транспортер уборки навоза ТСН-3,ОБ	2,2	250...300	4,0...5,5	0,74
Вакуум-насос РВН-40/350	3,0	1500...1600	11,1 л/с	0,27
<i>Свинофермы</i>				
Раздатчик кормов РКС-3000Б	2,2	300...350	13...14	0,18
<i>Зерноочистительный агрегат</i>				
Загрузочная нория НЗ-20	2,2	600...700	20	0,05
Триер БТ-10	1,5	100...150	10	0,20
Зерноочистительная машина ЗАВ-10	2,2	600...700	10	0,08
Выгрузной транспортер	1,1	600...700	10	0,11

шенстве технологии производства, о резервах средств электромеханизации, возможностях экономии энергии и т. д.

Так, коэффициент заполнения суточного графика (см. гл. 8) позволяет ответить на вопрос, каковы резервы дальнейшего развития потребления энергии на той или иной ферме.

Коэффициент спроса представляет собой отношение мощности, потребляемой на объекте всеми установками из сети в часы максимума графика нагрузки на том же объекте, к общей установленной мощности, являющейся суммой мощностей, указанных в паспортах оборудования. Низкий коэффициент спроса, как правило, — результат невысокого уровня организации электропотребления, плохой работы установок и т. д.

Коэффициент загрузки k_z рабочей машины представляет собой отношение среднеквадратической мощности за цикл работы $P_{ср.кв}$, определяемой по нагрузочной диаграмме, к потребной мощности P_n , которая указана в паспорте рабочей машины:

$$k_z = P_{ср.кв} / P_n . \tag{28.1}$$

Коэффициент использования мощности дает представление об уровне использования оборудования и об его резервах. Например, доильные машины при коэффициенте использования мощности, рав-

ном 0,2 (табл. 28.2), имеют 80%-ный резерв, то есть при круглосуточной работе можно обеспечить дойку еще стада коров, в 4 раза большего, чем имеющееся; водонагреватели могут дать горячей воды в 2 раза больше и т. д.

Средневзвешенный коэффициент мощности, например в часы максимума графика нагрузки, может быть определен по потребленной в эти часы активной W_a и реактивной W_p энергии ($W_p/W_a = \operatorname{tg} \varphi$, а

$$\cos \varphi = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \varphi}}.$$

Этот показатель позволяет судить о целесообразности компенсации реактивной мощности.

28.2 ОБЩИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПО ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ И МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ИХ ЭФФЕКТИВНОСТИ

Эффективность всякой электроустановки зависит в первую очередь от числа часов ее полезного использования в году: чем больше продолжительность ее производительной работы, тем больший достигается эффект, тем быстрее окупаются расходы, на нее затраченные. Но при этом необходимо исключить любые утечки энергии на потери теплоты, воды, воздуха в системах соответственно для обогрева, водоснабжения, вентиляции и т. д. Эти потери в конечном счете — бесполезно сгоревший уголь, нефть, торф, газ на электростанциях.

Экономия электроэнергии. Общим критерием, по которому можно судить о резервах экономии электроэнергии, является удельный вес энергетической составляющей в себестоимости продукции сельскохозяйственных предприятий. Снижения этой составляющей можно добиться общим совершенствованием технологии производства, повышением электровооруженности труда, ускорением темпов производства, постоянной разработкой и реализацией различных мероприятий по совершенствованию как технических, так и организационных сторон электрификации.

С целью экономии электроэнергии в сельских электроустановках энергетические службы хозяйств должны постоянно обращать внимание на следующее:

- 1) тщательный учет электроэнергии на конкретных объектах и установках;
- 2) высокий уровень технической эксплуатации электроустановок;
- 3) правильный подбор электродвигателей к рабочим машинам, замену более мощных двигателей на менее мощные в случае незагруженности установки;
- 4) отключение установок, работающих на холостом ходу;
- 5) компенсацию реактивного тока непосредственно у двигателей, если по состоянию электроснабжения требуется электродвигатель, на 1...2 ступени больший;
- 6) правильный выбор ламп и светильников и своевременную очистку их от пыли;

7) применение фотореле для включения уличного и дежурного освещения;

8) применение демпферных автоматических (пневматических) выключателей (типа АВ-2-А) для включения освещения в подъездах и на лестницах;

9) применение двухтарифных счетчиков;

10) снижение потерь теплоты в помещениях;

11) увеличение загрузки насосов, ликвидацию утечек воды в системе водоснабжения; введение оборотного водоснабжения;

12) улучшение систем вентиляции;

13) снижение максимума нагрузки и выравнивание графика нагрузки по часам суток.

Во всех случаях при повышении эффективности работы электроустановок нужно строго соблюдать правила устройства электрических установок, правила их технической эксплуатации, правила техники безопасности, правила использования электрической и тепловой энергии.

Эффективность экономии электроэнергии. Эффект от перечисленных выше мероприятий может быть определен по «Типовой методике определения экономической эффективности капитальных вложений». За основу расчета принимается срок окупаемости капитальных вложений

$$T = K / (I_1 - I_2), \quad (28.2)$$

где K — капитальные вложения, необходимые для осуществления мероприятий по снижению потерь энергии; I_1 — текущие ежегодные затраты до осуществления мероприятия, руб.; I_2 — то же, после осуществления мероприятия; $I_1 - I_2$ — ожидаемая экономия ежегодных затрат, получаемая в результате осуществления мероприятия, руб.

Величина, обратная сроку окупаемости, называется коэффициентом эффективности капитальных вложений p :

$$p = 1/T = (I_1 - I_2) / K. \quad (28.3)$$

Этот коэффициент показывает долю экономии, полученной в результате осуществления мероприятия, на 1 руб. капиталовложений. Для энергетики он принят равным $p = 0,15$. Это значит, что, если расчетное значение коэффициента эффективности будет больше 0,15, мероприятие экономически оправдано, капиталовложения окупятся менее чем за $1 : 0,15 = 6,7$ года. Если же расчетный коэффициент эффективности p окажется меньше 0,15, то проводить мероприятие нецелесообразно.

В ежегодные затраты I входят амортизационные отчисления, эксплуатационные расходы, которые примерно равны до и после модернизации, а также стоимость электроэнергии C . Поэтому $I_1 - I_2 \approx C_1 - C_2$, где C_1 и C_2 соответственно стоимость электроэнергии, потребляемой в год до и после осуществления мероприятия по ее экономии. Тогда коэффициент эффективности капиталовложений

$$p = (C_1 - C_2) / K = c \Delta W / K, \quad (28.4)$$

где ΔW — экономия электроэнергии, полученная в результате модернизации электроустановки, кВт · ч; c — стоимость 1 кВт · ч электроэнергии, руб.

28.3. ЭКОНОМИЯ ЭНЕРГИИ В БЫТУ. ЭКОНОМИЯ ЛАМП НАКАЛИВАНИЯ

Уменьшить потери энергии в сети можно, если не допускать снижения напряжения у потребителя путем регулирования напряжения подстанции или использования проводов с большей площадью сечения. Необходимо также соблюдать и другие меры: включать электроприборы только при необходимости; применять компактные или галогенные лампы там, где они экономичнее ламп накаливания; вовремя выключать освещение лестничных клеток; не загромождать в холодильнике горячих продуктов; сокращать время пребывания холодильников с открытыми дверцами; очищать систематически от пыли змеевик сзади холодильника; в многоквартирном доме следить за равномерным распределением нагрузок по фазам, так как при неравномерной нагрузке фаз возрастают потери; для теплоснабжения использовать аккумулирующий нагрев в часы провала графика нагрузки.

Правильная эксплуатация холодильников может дать экономию не менее 5% электроэнергии. Если своевременно выключать осветительные лампы и внедрять в быт галогенные лампы, а также встроенные фотоэлектронные выключатели в схемах лестничного освещения, можно получить экономию до 20% электроэнергии. Внедрение терморегуляторов может дать экономию до 20% энергии.

Промышленность ежегодно выпускает больше 1 млрд. ламп накаливания, расходуя на это большое количество специального электролампового стекла, различных металлов и сплавов, в том числе около 1000 т вольфрама. Поэтому важно найти способы продлить срок службы ламп накаливания. Этого можно добиться правильным выбором ламп для каждого конкретного потребителя, учитывая, что лампы выпускаются на напряжение 215...225 В, 220...230 В, 230...240 В, 235...245 В.

Если напряжение у потребителя отклоняется от среднего в большую сторону более чем на 5%, то нужно ставить ограничители напряжения или применять ручные или сенсорные регуляторы освещения. Для группового регулирования напряжения промышленность выпускает тиристорные ограничители напряжения ТОН-3 на 63 и 100 А. Их следует применять в мастерских, животноводческих объектах, в уличном освещении и т. д.

В холодной нити накала ток включения в 12...16 раз больше номинального. В спирали нити накаливания возникают динамические перегрузки, как в витках катушки; витки спирали сближаясь замыкаются и лампы перегорают. Поэтому очень важно напряжение на лампы подавать и снимать постепенно или ступенями, при этом срок их службы возрастает в 3...4 раза. Только при плавном включении срок службы увеличивается в 2...2,5 раза.

На основе симисторов выпускаются бытовые регуляторы освещения. Они рассчитаны на управление мощностью 300 Вт (механическое регулирование) и 240 Вт (сенсорное управление). Фазовое управление симистором осуществляется от собственного генератора, вырабаты-

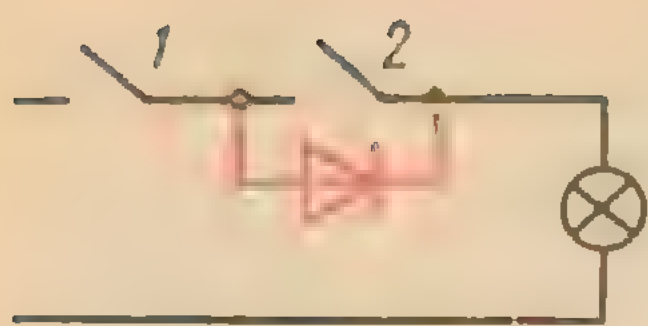


Рис. 28.1. Ступенчатое включение светильника.

вающего управляющие импульсы. При сенсорном управлении для включения регулятора освещения и установки фазы управляющих импульсов достаточно оператору коснуться рукой сенсорной пластины на регуляторе. Требуемый уровень освещения устанавливается при прекращении контакта между рукой и пластиной. Разрабатываются также регуляторы освещения, встраиваемые в светильник.

На рисунке 28.1 показана схема ступенчатого регулирования напряжения. Здесь используется двойной выключатель. Сначала цепь лампы замыкается выключателем 1 и через лампу протекает однополупериодный ток. Мощность лампы примерно в 4 раза меньше номинальной. Затем диод, выбранный по току лампы, замыкается выключателем 2. Лампа включена полностью. Могут быть использованы и другие схемы.

Применение ручных или сенсорных регуляторов освещения, выполненных на симисторах, а также других средств регулирования напряжения позволяет не только продлить срок службы лампы, но и уменьшить расход электроэнергии за счет выбора уровня освещенности в зависимости от конкретной ситуации.

28.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭКОНОМИИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛАМП С БОЛЕЕ ВЫСОКОЙ СВЕТОВОЙ ОТДАЧЕЙ

Промышленность выпускает источники света различного принципа действия с различным спектральным составом и разной световой отдачей. Часто, например, электрику хозяйства приходится решать вопрос о том, какие источники света — лампы накаливания или люминесцентные лампы — целесообразнее принять для освещения данного помещения. Если спектральный состав света не имеет значения, то следует сравнить годовые эксплуатационные расходы для возможных вариантов освещения.

Годовые эксплуатационные расходы могут быть подсчитаны по формуле:

$$И = A \frac{a}{100} + \frac{B}{L} Tn + cPT, \quad (28.5)$$

где A — стоимость оборудования и монтажа осветительной установки без учета стоимости ламп, руб.; a — норма амортизационных отчислений, %; B — цена лампы, руб.; L — срок службы лампы, ч; n — число ламп; c — стоимость 1 кВт·ч электроэнергии, руб.; P — присоединенная мощность осветительной установки, кВт; T — число часов использования установки в году.

Приведенная на рисунке 28.2 зависимость годовых эксплуатационных расходов от числа часов использования установки показывает, что, хотя первоначальные затраты (при $T=0$) на люминесцентное

освещение (ЛЛ) в несколько раз больше, оно обойдется дешевле, если продолжительность использования системы освещения не менее 300...350 ч в год (за счет меньшего расхода энергии).

Для облучения растений в теплицах применяют различные источники. Поскольку растения воспринимают излучаемый спектр по-разному, для сравнения условий облучения пользуются коэффициентами перевода световых единиц в единицы физиологически активного излучения. Этот коэффициент, выраженный в ваттах на метр квадратный (Вт/м²) и эквивалентный освещенности в 1 лк, соответствует удельной мощности физиологически активного излучения A источника (табл. 28.6).

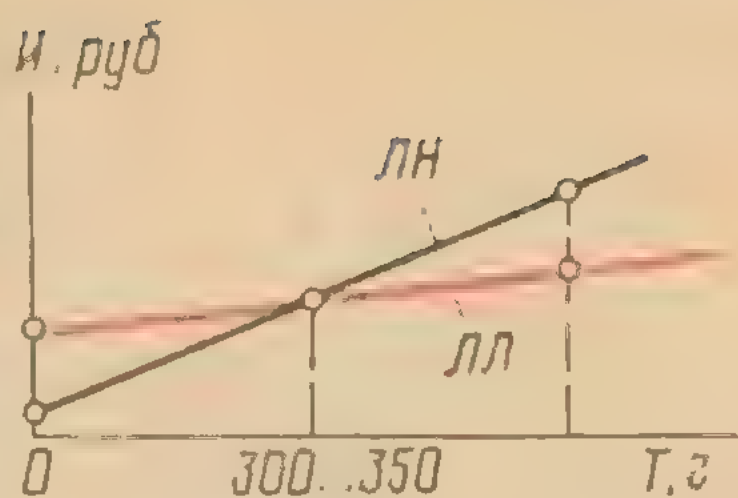


Рис. 28.2. Сравнение эксплуатационных расходов на светильники с лампами накаливания ЛН и люминесцентными лампами ЛЛ

28.6. Сравнение различных источников света в светокультуре

Лампы	A , Вт / лм	C , лм / Вт	η , %
Накаливания, мощностью 300...500 Вт	$5,91 \cdot 10^{-3}$	14...19	8...11
Люминесцентные дневного света	$4,03 \cdot 10^{-3}$	40...50	16...20
Люминесцентные белого света	$3,55 \cdot 10^{-3}$	50...60	18...21
ДРЛ	$4,00 \cdot 10^{-3}$	50...55	20...22
Ксеноновые	$5,65 \cdot 10^{-3}$	22...30	12...17
ЛОР	$7,00 \cdot 10^{-3}$	20...30	14...21
Натриевые ДНаТ	$(3,5...4) \cdot 10^{-3}$	125...130	44...52

Чтобы сравнивать эффективность источников по потребляемой из сети электроэнергии, удобнее применять показатель их эффективности для светокультуры. Этот показатель можно представить как энергетический КПД (%):

$$\eta = \frac{A}{B} 100 = AC 100, \quad (28.6)$$

где A — удельная мощность физиологически активного излучения (полезная) источника, Вт/лм; B — удельная мощность источника, идущая на образование светового потока в 1 лм, Вт/лм; $C = 1/B$ — светоотдача источника, лм/Вт.

При этом предполагаются равными все прочие факторы — стабильность напряжения, идентичность светораспределения арматурой светильника и др.

В таблицу 28.6 сведены результаты определения энергетического КПД или КПД физиологически активной радиации для некоторых источников света. Переводной коэффициент для натриевых ламп высокого давления ДНаТ, содержащих в горелке, кроме натрия, также пары ртути и аргон, принят ориентировочно.

Как видно из таблицы, КПД натриевых ламп в светокультуре примерно в 5 раз больше, чем ламп накаливания, в 3 раза больше,

чем люминесцентных ламп, и примерно в 2,5 раза больше, чем ламп ДРЛ. Это значит, что для создания равнозначных потоков физиологически активной радиации мощность, потребляемая из сети при использовании натриевых ламп, будет меньше соответственно в 5; 3 и 2,5 раза.

Если учесть, что в осветительных установках с лампами ДРЛ удельная мощность принимается равной 250 Вт/м^2 , то при использовании натриевых ламп она составит 100 Вт/м^2 и т. д. То есть при замене ламп ДРЛ лампами ДНаТ экономия мощности составит 150 Вт/м^2 , а экономия электроэнергии ($\text{кВт} \cdot \text{ч/м}^2$) за сезон — $150t \cdot 10^{-3}$, где t — число часов использования осветительных установок в теплицах в течение года.

Если первоначальные затраты у ламп ДРЛ и ламп ДНаТ будут примерно равны и срок службы этих ламп также примерно равен, то разница в годовых эксплуатационных расходах будет равна стоимости сэкономленной энергии.

28.5. СНИЖЕНИЕ ПОТЕРЬ В СЕТЯХ, ТРАНСФОРМАТОРАХ, ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

Снижение потерь на нагрев. Наиболее точно определить потери в проводах трехфазной линии можно путем измерения (в течение суток) силы тока и падения (потери) напряжения, чтобы затем определить теряемую мощность как

$$\Delta P_n = 3I\Delta U \cdot 10^{-3}, \quad (28.7)$$

Здесь I — ток в одной из фаз, А; $\Delta U = (U_n - U_k) / 2$, где U_n — напряжение между фазами в начале линии, U_k — то же, в конце линии.

Эти потери можно приблизительно определить и по формуле:

$$\Delta P_n = 1,1nql^2 \frac{L}{q_n} \cdot 10^{-3}, \quad (28.8)$$

где 1,1 — коэффициент, учитывающий сопротивление переходных контактов, скрутку жил и способ прокладки линии; n — число фаз в линии; L — длина линий, м; q_n — площадь поперечного сечения провода, мм^2 ; q — удельное сопротивление материала проводов при температуре 20°C ; I — среднее значение тока нагрузки, А.

Экономии электроэнергии можно добиться заменой проводов на провода с большей площадью поперечного сечения или на провода с меньшим удельным сопротивлением, а также сокращением их длины. Эта экономия составит:

$$\Delta W = 0,003 \cdot I^2 \left(\frac{q_1 L_1}{q_1} - \frac{q_2 L_2}{q_2} \right) t, \quad (28.9)$$

где I , q , L , q — то же, что и выше, с индексом 1 до реконструкции сети, и с индексом 2 после реконструкции; t — время, за которое подсчитывается экономия, ч.

Потери электроэнергии в трансформаторах (двухобмоточных) можно вычислить по формуле:

$$\Delta W_a = \Delta P_x t_n + \Delta P_k k_z^2 t_{\text{раб}}, \quad (28.10)$$

где ΔP_x — потери холостого хода трансформатора; t_n — полное число часов работы трансформатора; ΔP_k — потери короткого замыкания; $t_{\text{раб}}$ — число часов работы трансформатора с номинальной нагрузкой; k_z — коэффициент загрузки трансформатора при номинальной нагрузке в сети, равный отношению мощности трансформатора при данной нагрузке к полной его мощности.

Улучшение $\cos \varphi$. Экономии электроэнергии можно здесь достигнуть путем компенсации реактивного тока при помощи подключаемых к трансформатору батарей конденсаторов. Если на подстанции параллельно работают два или три трансформатора, то рассчитывают также мощности, при потреблении которых целесообразно иметь включенным 1, 2 или 3 трансформатора.

При преобладании в сети силовой (двигательной) нагрузки наибольшей экономии электроэнергии можно достигнуть компенсацией реактивной мощности (улучшением коэффициента мощности). В главе 6 показано, как снижаются потери в сети на нагрев проводов при улучшении коэффициента мощности при использовании конденсаторов для компенсации реактивного тока.

Наиболее эффективной в отношении разгрузки от потребляемой данным энергоприемником реактивной мощности как питающей сети, так и трансформаторов на подстанции (а следовательно, и сетей высшего напряжения) является индивидуальная компенсация, когда батарея конденсаторов подключается непосредственно у энергоприемника, например на станции или блоке управления электродвигателем. Основным недостаток этой схемы — малое время использования конденсаторов лишь при включении в работу данного электродвигателя.

Эта схема может найти широкое применение при массовом выпуске недорогих малогабаритных конденсаторов для индивидуальной компенсации. Учеными предложены схемы комплектования батареями конденсаторов станций управления двигателями различной мощности, прежде всего наиболее распространенными в сельском хозяйстве электродвигателями мощностью от 0,6 кВт (емкость на фазу 7...10 мкФ) до 7,5 кВт (80...100 мкФ). Таких электродвигателей в парке сельскохозяйственных электроустановок до 75%.

Для индивидуальной компенсации реактивной мощности электродвигателей и других электроприемников целесообразно наладить выпуск специальных серий малогабаритных конденсаторов.

Следует отметить, что при использовании индивидуальной компенсации открываются возможности для практически безаварийной их эксплуатации, так как станет возможным выбирать для ответственных потребителей электродвигатель на одну-две ступени большей мощности, чтобы установка не отключалась при понижениях напряжения в сети, а также осуществлять небольшой подогрев обмоток электродвигателя при его остановке, чтобы исключить отсыревание изоляции.

В настоящее время широко применяется групповая или централизованная компенсация, когда батареи конденсаторов подключаются к шинам распределительных пунктов в производственных помещениях или к шинам трансформаторных подстанций. При этом не разгруженными от реактивной мощности остаются сети от места подключения батарей до энергоприемников. Если централизованная компенсация осуществляется на стороне высшего напряжения на подстанции, то не разгруженным от реактивной мощности остается и трансформатор.

Для групповой и централизованной компенсации выпускаются косинусные конденсаторы типа КМ (косинусный с пропиткой минеральным маслом), КС (пропитка синтетическими жидкостями) и др. В обозначении конденсаторов, например КМ1-0,22-4,5-3У3, КМ2-0,22-9-3У3, указаны: первая цифра — габарит (1 или 2), затем напряжение (0,22 кВ), мощность (4,5 или 9 квар), затем цифра 3 или 2 означает трехфазное или однофазное исполнение, У3 умеренный климат третьей категории.

При использовании групповой или централизованной компенсации важно исключить потери энергии в сети и трансформаторе подстанции, возникающие при ситуации, когда нагрузка в распределительной сети 380/220 В отсутствует, а батареи конденсаторов включены. В этом случае они заряжаются и разряжаются на обмотку трансформатора, вызывая потери на нагрев обмоток трансформаторов и сети высшего напряжения. Поэтому необходимо автоматическое регулирование подключенной емкости в зависимости от реактивного тока со стороны электроприемников. Это достигается при использовании устройства регулирования мощности конденсаторных батарей типа АРКОН-1. Автоматическое одноступенчатое включение конденсаторных батарей осуществляется выключателем типа ВАКО. При компенсации реактивной мощности эффект получают не только за счет экономии электроэнергии, бесполезно затрачиваемой на нагрев проводов сети, но и за счет улучшения режимов пуска. Благодаря использованию конденсаторов уменьшаются толчки тока в сети по силе и времени.

Снижение силы тока ΔI , потребляемого электродвигателем из сети, при номинальной нагрузке и улучшении коэффициента мощности равно

$$\Delta I = \frac{P \eta 10^3}{\sqrt{3} U} \left(\frac{1}{\cos \varphi_1} - \frac{1}{\cos \varphi_2} \right), \quad (28.11)$$

где P , η , U — паспортные значения мощности (кВт), КПД и напряжения (В); $\cos \varphi_1$, $\cos \varphi_2$ — коэффициент мощности соответственно паспортный и при подключении конденсаторов для компенсации реактивного тока.

Примерная экономия электроэнергии (без учета снижения потерь в обмотках трансформатора и т. д.) равна

$$\Delta W = 3 \Delta I^2 R l 10^3, \quad (28.12)$$

где R — сопротивление каждого провода от трансформатора или ввода до двигателя; l — число часов работы электродвигателя в году.

Загрузка двигателей. Экономии электроэнергии и повышения эффективности работы электродвигателей можно добиться также увеличением загрузки рабочих машин, при этом увеличивается объем полезной работы в единицу времени, снижается удельный расход энергии на переработку продукта; установкой автоматов, отключающих двигатели от сети при холостом ходе рабочих машин, например, в межоперационные паузы; заменой незагруженных двигателей двигателями меньшей мощности. В последнем случае можно считать, что если средняя нагрузка двигателя равна 45% номинальной мощности, то замена его меньшим по мощности всегда целесообразна и проверочных расчетов не требуется. При нагрузке двигателя на 70% и более замена его на менее мощный, как правило, нецелесообразна. При нагрузке электродвигателя в пределах от 45 до 70% номинальной мощности необходимо решить, что более целесообразно: заменить электродвигатель менее мощным или осуществить компенсацию реактивной мощности.

28.6. КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ЭКОНОМИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА, ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ВЕНТИЛЯЦИИ

В системах электрообогрева экономии электроэнергии можно добиться путем улучшения теплоизоляции установок или помещений, снижением потерь на инфильтрацию — унос теплоты через несовершенные строительные конструкции, окна и двери. Потери электроэнергии, эквивалентные потерям теплоты через стены, пол, потолок и окна, могут быть определены по формуле:

$$\Delta W = c k F \Delta t t 10^{-3}, \quad (28.13)$$

где c — коэффициент инфильтрации, равный единице для сплошных стен и пола (без щелей), достигающий 1,2...1,3 для недостаточно плотно заделанных окон; k — коэффициент теплопотерь через ограждение, Вт/(м² · °С); F — площадь элемента ограждения — стены, потолка, пола, окна, м²; Δt — разность между внутренней и наружной температурой, °С; t — время, за которое подсчитываются потери, ч.

Коэффициент k теплопотерь для разных ограждений приведен ниже.

Материал ограждения	Коэффициент тепло- потерь, Вт/(м ² · °С)
Кирпичная стена толщиной 11,5 см (неоштукатуренная)	3,65
То же, толщиной 23 см	2,7
То же, толщиной 28 см (оштукатуренная, пол- лая)	2,0
Бетонная стена толщиной 10 см	3,65
То же, толщиной 14 см	3,1
Стекло одинарное	5,7
Стекло двойное	2,8
Потолок в паз из досок толщиной 2,5 см	2,85
Земляной пол без покрытия	1,9

Расчет, как правило, ведут для каждого элемента ограждения, а затем результат суммируют.

Большая экономия теплоты достигается благодаря автоматизации нагревательных установок, как это было показано в главе 24.

Расход электроэнергии (кВт · ч) в системе водоснабжения может быть определен как

$$W = \frac{kQ\gamma Ht}{102\eta_1\eta_2}, \quad (28.14)$$

где k — коэффициент запаса мощности электродвигателя, равный 1,2...1,3; Q — подача насоса, л/с; γ — плотность жидкости, кг/л; H — полный напор с учетом высоты всасывания, (м), МПа (1 МПа = 100 м вод. ст.); η_1, η_2 — КПД насоса и передачи; t — продолжительность работы, ч.

Анализируя эту формулу, можно сказать, что расход электроэнергии в системе можно снизить повышением КПД насосов и передачи, снижением коэффициента загрузки (запаса мощности), сокращением потерь воды, уменьшением сопротивления трубопроводов.

Чтобы сократить расход электроэнергии в вентиляционных системах, проводят следующие мероприятия: заменяют старые вентиляторы новыми, более экономичными, имеющими более высокий КПД; используют более экономичные способы регулирования подачи вентиляторов при помощи шиберов на рабочих местах; вместо регулирования изменением давления применяют многоскоростные электродвигатели; отключают вентиляцию на время различных перерывов на обед, пересменку и т. д.; устраняют различные дефекты в системах воздухоподачи; внедряют автоматическое управление вентиляционными установками и т. д.

Контрольные вопросы к главе 28. 1. Какие сельскохозяйственные потребители относят к первой категории электроснабжения? 2. Как можно определить ожидаемое потребление электроэнергии? 3. Какие меры обеспечивают экономию электроэнергии в отдельных электроустановках? 4. Как подсчитать эффект от мероприятий по экономии электроэнергии? 5. Как выбрать более экономичные источники света? 6. Как подсчитать экономию электроэнергии от компенсации реактивной мощности? 7. Какие вы знаете косвенные меры экономии электроэнергии?

Глава 29. ЗАЗЕМЛЕНИЯ И ЗАНУЛЕНИЯ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ. МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ

29.1. ЗАЗЕМЛЯЮЩИЕ УСТРОЙСТВА И ИХ ЗАЩИТНОЕ ДЕЙСТВИЕ. ЗАНУЛЕНИЕ

Роль заземления. Многие электрические установки в сельскохозяйственном производстве работают в весьма неблагоприятных условиях (атмосферные воздействия, значительное содержание агрессивных паров, газов, пыли, повышенная влажность, вибрации и др.), которые пагубно сказываются на состоянии изоляции. Естественно, в таких условиях увеличивается вероятность появления на корпусах машин,

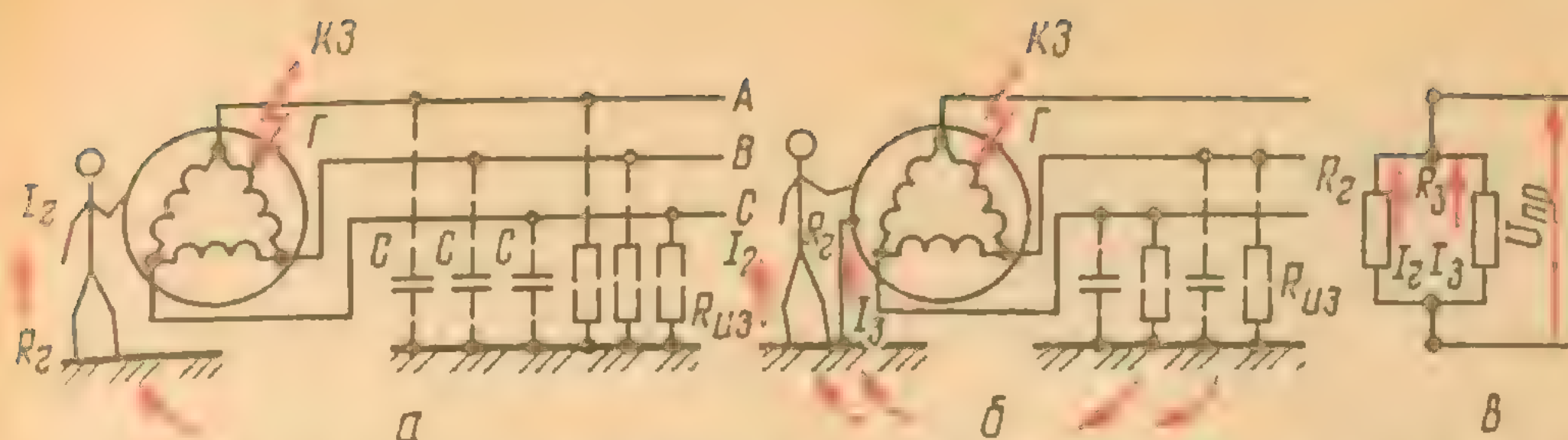


Рис. 29.1. Цепи токов при различных вариантах прикосновения человека к корпусу электроустановки:

а — корпус не заземлен; б — корпус заземлен; в — схема замещения для рисунка б; $R_{из}$ — сопротивление изоляции сети; $R_ч$ — сопротивление человека с учетом переходного сопротивления от ног к земле; R_3 — сопротивление растеканию заземления; КЗ — место короткого замыкания на корпус.

трансформаторов, генераторов и других электрических аппаратов и приборов потенциала, в ряде случаев представляющего собой большую опасность для обслуживающего персонала.

Для обеспечения безопасности людей и животных необходимо выполнять заземляющие устройства, к которым следует надежно подключать металлические части электроустановок и корпуса электрооборудования, могущие оказаться под напряжением вследствие нарушения изоляции.

Защитная роль заземляющего устройства может быть объяснена схемами, приведенными на рисунке 29.1. Здесь схематично показано замыкание фазы А на корпус в генераторе Г электростанции электро-стригального агрегата. Обмотка генератора соединена в треугольник. Сеть электростригального агрегата, выполненная шланговым проводом, имеет сравнительно большую емкостную связь с землей. Но, кроме емкостной связи С с землей, в каком-либо двигателе (а их общее число достигает нескольких десятков) может быть неисправна изоляция, например, вследствие повышенной влажности. Если человек прикоснется к корпусу генератора, изолированному от земли (рис. 29.1, а), что равносильно прикосновению к фазе А, он окажется включенным в электрическую цепь: фаза А (на корпусе) — тело человека — земля — емкость и сопротивление изоляции между землей и фазами В и С. Если же общее сопротивление этой цепи будет таким, что ток через тело человека окажется равным или больше 0,05 А, то несчастный случай может окончиться смертельным исходом.

Напряжение прикосновения $U_{пр}$. Человек оказался включенным здесь на фазное напряжение — между фазой А и искусственной нулевой точкой, созданной емкостями С и сопротивлениями утечки $R_{из}$. Особенно опасным будет случай, когда в сети произошло замыкание на землю и второй фазы. Тогда человек окажется включенным на линейное напряжение.

В случае, когда корпус генератора Г (трансформатора) заземлен (рис. 29.1, б), ток поврежденной фазы пойдет в землю по двум параллельным путям: заземлению и телу человека, причем ток через

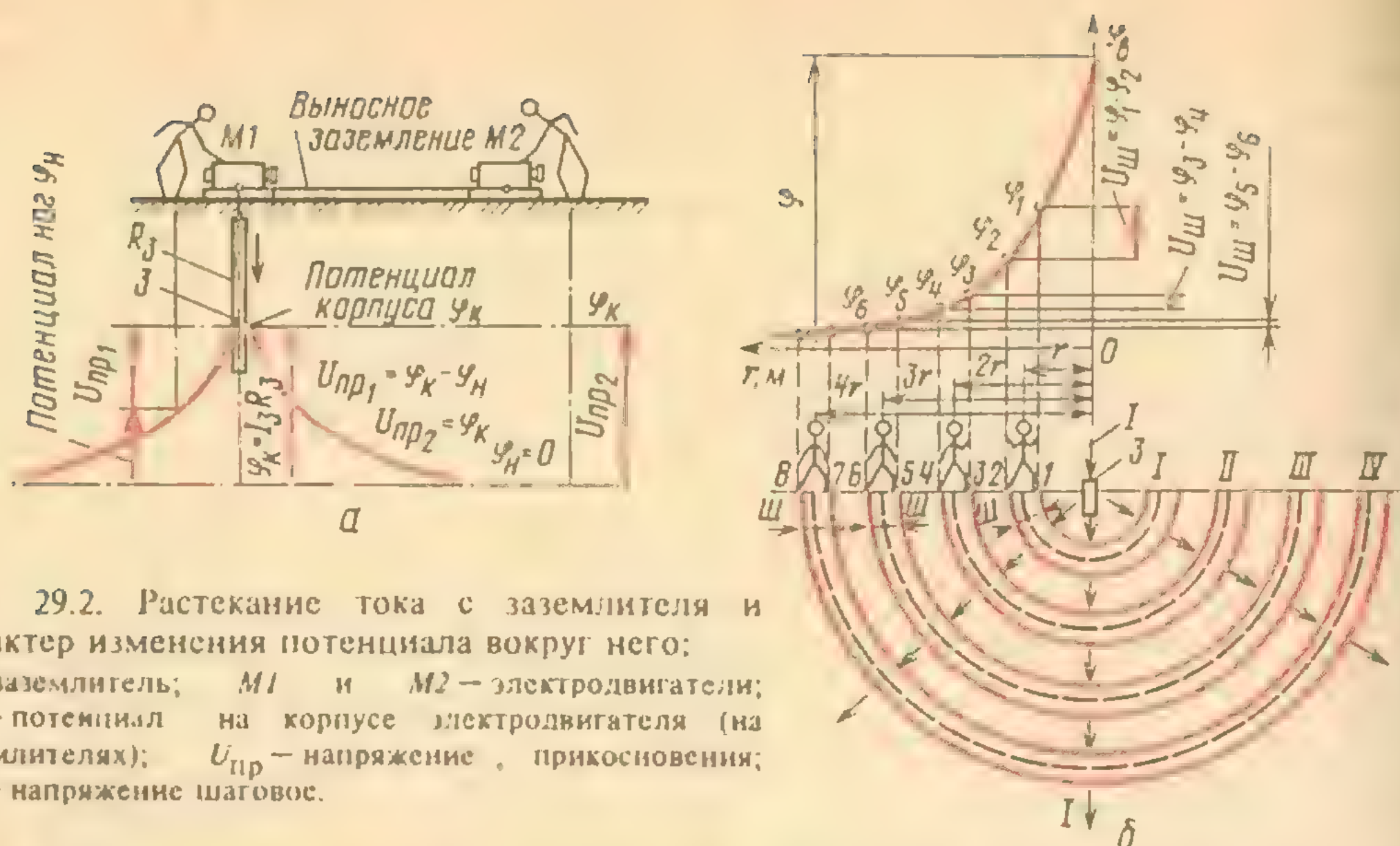


Рис. 29.2. Растекание тока с заземлителя и характер изменения потенциала вокруг него: З — заземлитель; M1 и M2 — электродвигатели; φ_k — потенциал на корпусе электродвигателя (на заземлителях); $U_{пр}$ — напряжение прикосновения; $U_{ш}$ — напряжение шаговое.

телo человека будет во столько раз меньше тока через заземление, во сколько раз сопротивление его тела плюс переходное сопротивление ноги — земля R_4 будет больше общего сопротивления R_3 заземляющего устройства. Напряжение на теле человека (рис. 29.1, в)

$$U_{пр} = I_4 R_4 = I_3 R_3. \quad (29.1)$$

Это напряжение называется *напряжением прикосновения*.

На рисунке 29.2, а показаны два случая: один из двигателей M1 находится непосредственно в зоне заземления, а второй M2 — на некотором расстоянии от заземления (для этого двигателя заземление является выносным).

Напряжение прикосновения в первом случае значительно меньше, чем во втором, поскольку в первом случае коэффициент прикосновения k , равный отношению $k = U_{пр} / U_k = U_{пр} / (I_3 R_3)$, значительно меньше единицы, а во втором — равен единице.

Таким образом ток через тело человека, касающегося двигателя M2 (рис. 29.2, а), из формулы (29.1)

$$I_{ч2} = I_3 R_3 / R_4,$$

а через тело человека, касающегося двигателя M1,

$$I_{ч1} = \frac{I_3 R_3}{R_4} k,$$

где k — коэффициент прикосновения.

Шаговое напряжение. На рисунке 29.2, б показан характер растекания тока с заземлителя и формирование шаговых напряжений.

Ток с заземлителя З растекается во все стороны равномерно. Сила тока, проходящего через элементы сферы I, II, III, IV, одинаковая, условно равная I . На любых двух соседних точках, взятых в радиальном направлении от заземлителя, ток I создаст падение напряжения $U = IR$, где R — сопротивление участка сферы между

взятыми точками. Чем дальше от заземлителя взяты точки с одинаковым расстоянием между ними (например, средняя длина шага человека), тем меньше напряжение между этими точками.

Представим себе четырех человек, идущих в направлении к заземлителю. Ноги первого человека находятся в точках 1 и 2, второго — в точках 3 и 4, третьего — 5 и 6, четвертого — 7 и 8. Длину шага каждого человека примем одинаковой, равной $ш$. Пусть расстояние от первого человека до заземлителя равно r , от второго до заземлителя — $2r$, от третьего — $3r$, от четвертого — $4r$. Найдем и сравним *шаговые напряжения*, то есть напряжения между ступнями каждого из людей, находящихся на разных расстояниях от заземлителей.

Напряжение между каждой парой точек — 1 и 2, 3 и 4 и т. д. — может быть подсчитано по формуле:

$$U_{ш} = IR_i = I\rho ш / S_i, \quad (29.2)$$

где ρ — удельное сопротивление земли; $ш$ — длина шага; $S_i = 2\pi r_i^2$ — площадь сечения проводника (участка сферы земли); r_i — расстояние (радиус) от центра сферы — заземлителя до середины рассматриваемой пары точек.

Подставляя значение S_i в равенство (29.2), получим:

$$U_{ш} = I\rho ш / (2\pi r_i^2), \quad (29.3)$$

то есть шаговое напряжение убывает обратно пропорционально квадрату расстояния от заземлителя.

Если для первого человека, находящегося на расстоянии r от заземлителя, шаговое напряжение составляет $U_{ш1}$, то для второго $U_{ш2} = U_{ш1} / 4$, для третьего $U_{ш3} = U_{ш1} / 9$, для четвертого $U_{ш4} = U_{ш1} / 16$.

Если шаговые напряжения представить как разности потенциалов в рассматриваемых точках по отношению к потенциалу удаленной точки земли (от 20 м у одиночного заземлителя и далее и от 40 м от заземляющего контура и далее), равному нулю, то можно построить график, наглядно показывающий, как убывает потенциал точек земли с удалением от заземлителя, а также найти напряжение (как разность потенциалов) между любыми двумя точками на поверхности земли. Этот график построен в верхней части рисунка 29.2, б. Полный потенциал заземлителя по отношению к удаленным точкам земли равен ϕ вольт. Потенциалы точек 1, 2, 3 и т. д. соответственно равны ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 и т. д. И соответственно шаговые напряжения $U_{ш}$ равны разности потенциалов тех точек, где находятся ступни человека.

Заземляющие устройства. Описанный выше тип заземлений называют *защитным*. Защитное заземление — надежное средство снижения потенциала на корпусах и других металлических нетоковедущих частях до безопасного значения.

Рабочее заземление — это заземление нейтралей генераторов, трансформаторов, фазы при использовании земли в качестве рабочего провода и т. д.

Заземление молниезащиты служит для отвода в землю тока молнии от разрядников и молниеотводов.

Заземлителем называют металлический проводник (стержень, полосу и т. п.), электрически соединяющий заземляемую деталь электроустановки с землей. Заземляющее устройство (контур) состоит из ряда заземлителей, электрически соединенных между собой металлической полосой, проводом, лентой и т. п.

Основная электрическая характеристика заземлителя или заземляющего контура — это *сопротивление растеканию тока*.

Сопротивление заземления при протекании тока замыкания на землю 50 Гц называется *стационарным*. При протекании импульсного тока при разряде молнии *импульсное* сопротивление заземления может быть больше стационарного, если заземлитель протяженный. При тщательных расчетах заземлителей это обстоятельство должно учитываться импульсным коэффициентом.

Если при устройстве заземления из нескольких заземлителей сопротивление каждого из них отдельно взятого, равно R_1 , то общее сопротивление всего устройства R_2 при числе n заземлителей $R_2 = R_1/n$ будет лишь тогда, когда заземлители находятся на расстоянии не менее 20 м друг от друга и их взаимное влияние ничтожно.

Если же заземлители расположены ближе и каждый из них находится в сфере растекания тока с других заземлителей, то на общее сопротивление контура значительное влияние оказывает взаимозащраивание, которое объясняется взаимодействием электрических полей, образуемых токами, растекающимися с заземлителей.

Рисунок 29.3, а иллюстрирует явление взаимозащраивания и распределение потенциалов вокруг устройства. Взаимозащраивание отдельных заземлителей в устройстве учитывается *коэффициентом использования* заземлителей, который всегда меньше единицы. Его

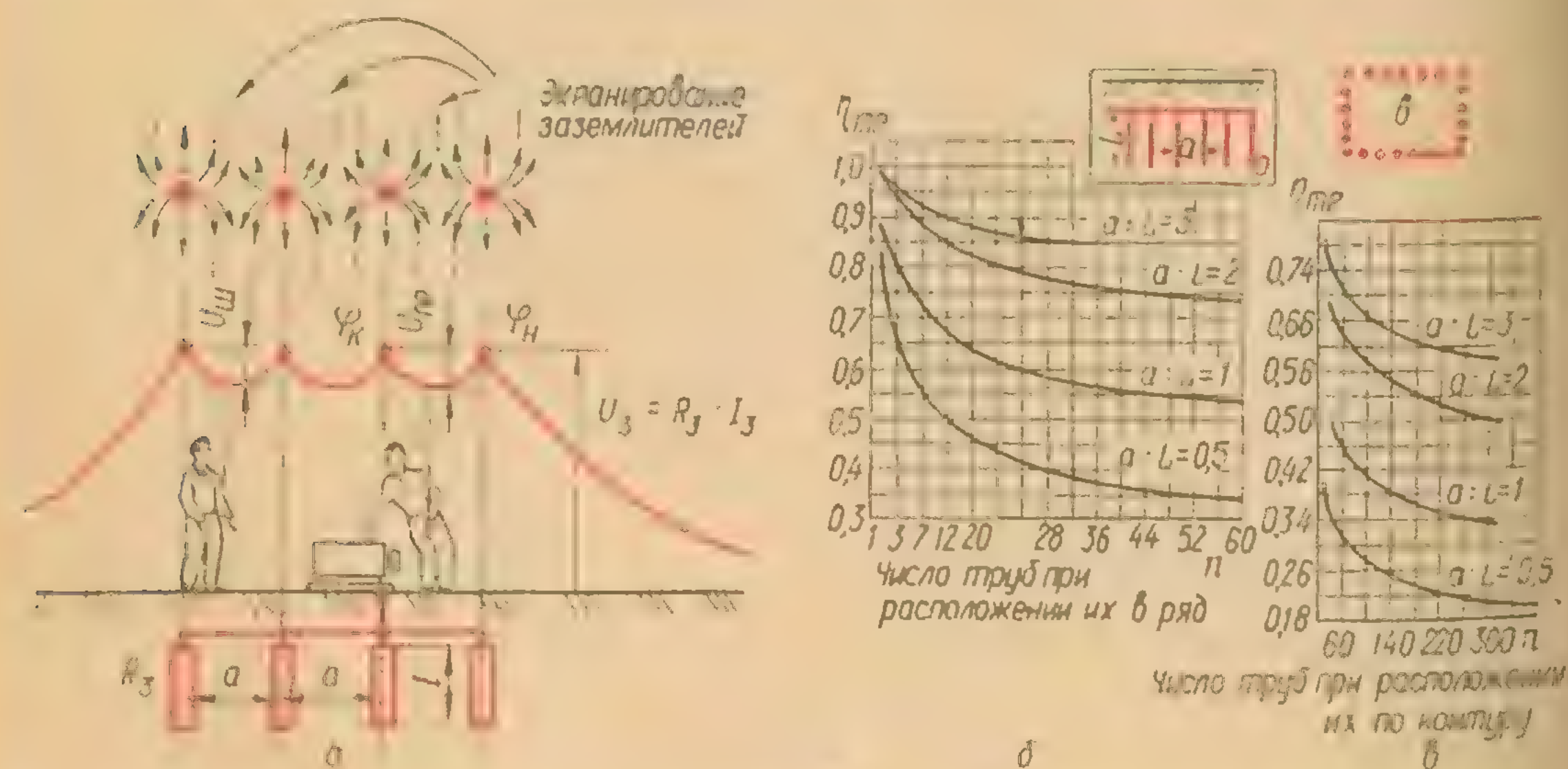


Рис. 29.3. Взаимозащраивание и распределение потенциала в заземляющем устройстве (а) и кривые для определения коэффициента использования заземлителей в устройстве при расположении их в ряд (б) или по контуру (в).

значение принимают в результате анализа кривых, построенных по экспериментальным данным (рис. 29,3 б и в).

Общее сопротивление R_y устройства, состоящего из n заземлителей, при условии, что сопротивления всех заземлителей, равны между собой,

$$R_y = R_s / (\eta n), \quad (29.4)$$

где R_s — сопротивление растеканию отдельного заземлителя; n — число заземлителей в устройстве; η — коэффициент использования заземлителей, взятый по экспериментально построенным кривым или найденный в справочниках.

Зануление — основная мера защиты от поражения электрическим током в электроустановках напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью источника питания в случае прикосновения к металлическим корпусам электрооборудования и металлическим конструкциям, оказавшимся под напряжением вследствие повреждения изоляции сети или электроустановок.

Занулением называется преднамеренное электрическое соединение металлических частей, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземленной нейтралью источника питания посредством нулевых защитных проводников. При этом не требуется предусматривать дополнительное заземление зануленных элементов электроустановок. Нулевой же провод может иметь *повторные заземления*.

Всякое замыкание токоведущих частей на зануленные части превращается таким образом в однофазное короткое замыкание, что приводит к отключению аварийного участка сети.

29.2. ТРЕБОВАНИЯ К ЗАЗЕМЛЕНИЯМ И ЗАНУЛЕНИЯМ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

Требования к заземлениям. Потребительские сети напряжением до 1000 В имеют заземленную нейтраль и зануленные корпуса электрооборудования. Замыкание одной из фаз на корпус в электроустановке должно приводить к перегоранию предохранителя или отключению другого аппарата защиты.

При изолированной нейтрали, если одна из фаз получила хорошее соединение с землей, то есть произошло однофазное короткое замыкание, все токоприемники могут продолжать нормально работать, однако человек, прикоснувшийся к одной из оставшихся фаз, оказывается под действием линейного напряжения сети. А в нормальном режиме сети с изолированной нейтралью, но при значительной ее протяженности из-за большой емкости по отношению к земле человек, коснувшийся фазы, окажется под фазным напряжением. То есть степень опасности остается такой же, как и в сети с глухозаземленной нейтралью.

Поэтому «Правилами устройства электроустановок» эксплуатация четырехпроводных сетей напряжением до 1000 В с изолированной нейтралью запрещена.

Кроме того, воздушная линия, отъединенная от земли, будет

сохранять и накапливать электростатический заряд, который затем при достаточно высоком потенциале может вызвать пробой изоляции на корпус или искровой разряд в местах, где расстояние между проводами и заземленными предметами наименьшее. Например, в жилом помещении сельского типа при грозовых разрядах в линии будут индуцироваться значительные волны перенапряжения, которые представляют опасность для людей, сельскохозяйственных животных, зданий и сооружений. Заземление нейтрали позволяет предотвратить нежелательные последствия подобных явлений.

Значения сопротивлений растеканию заземлителей тесно связаны с предельно допустимыми напряжениями прикосновения. Если напряжение прикосновения разделить на сопротивление тела человека, то получится сила тока через тело человека. При токе 15...20 мА человек не может самостоятельно оторваться от токоведущих частей, ток 50 мА считается опасным для жизни, а ток 100 мА является безусловно смертельным. Исходя из предельно допустимого тока 50...100 мА и возможного минимального сопротивления тела человека в пределах от 1000 до 650 Ом, принято, что максимально допустимое значение напряжения прикосновения в помещениях без повышенной опасности поражения током не должно превышать 65 В. В жарких, сырых и тесных помещениях напряжение прикосновения не должно быть выше 36 В, а в условиях особо опасных (например, при работе в котлах, баках и т. п.) — 6...12 В.

В установках выше 1000 В (6, 10, 20, 35 кВ), присоединенных к сетям, в которых ток замыкания на землю больше 500 А, максимально допустимое сопротивление растеканию защитного заземления составляет 0,5 Ом. В тех же установках, но с малыми токами замыкания на землю (менее 500 А) сопротивление растеканию заземления должно быть не более 10 Ом и удовлетворять равенству

$$I_z R_z \leq U_k = 250 \text{ В или } 125 \text{ В,} \quad (29.5)$$

где R_z — наибольшее значение сопротивления растеканию заземляющего устройства в течение года; U_k — напряжение, принимаемое равным 250 В, если защитное заземление используется только для установки с напряжением 1000 В и выше, и 125 В, если данное заземляющее устройство служит одновременно и для заземления установок напряжением до 1000 В; $I_z = U(35/l_k + 1/l_v)/350$ — расчетный ток замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью; U — напряжение высоковольтной сети; l_k и l_v — соответственно длина кабельной и воздушной сетей.

В электроустановках напряжением до 1000 В (мачтовые подстанции, сельские электростанции и т. п.) с изолированной или заземленной нейтралью сопротивление растеканию заземляющего устройства не должно быть больше 2 Ом в электроустановках напряжением 660/380 В, 4 Ом в электроустановках 380/220 В и 8 Ом в электроустановках 220/127 В. Это сопротивление должно быть обеспечено с учетом использования естественных заземлителей, а также заземлителей повторных заземлений нулевого провода воздушных линий напряжением до 1000 В при числе отходящих линий не менее двух. Но сопротивление искусственного заземлителя не должно быть более 15 Ом для установок 660/380 В, 30 и 60 Ом для установок соответ-

ственно 380/220 и 220/127 В. Указанные значения можно повысить лишь в том случае, если удельное сопротивление земли более 100 Ом·м, в р/100 раз, но не более чем в 10 раз.

Заземлению подлежат железобетонные и металлические опоры линий напряжением 35 кВ, а также линий от 3 до 20 кВ, но только в населенных местностях. В электроустановках подлежат заземлению: 1) станины и кожухи электрических машин и трансформаторов, выключателей и других аппаратов; 2) приводы электрических аппаратов; 3) вторичные обмотки измерительных трансформаторов; 4) каркасы распределительных щитов и щитов управления, металлические конструкции открытых распределительных устройств, стальные трубы электропроводок, металлические оболочки кабелей и т. п.

Не подлежат заземлению: 1) арматура подвесных и штыревых изоляторов на деревянных опорах и конструкциях, за исключением крюков и штырей в распределительных сетях 380/220 В, где заземление предусматривается для защиты от атмосферных перенапряжений (см. п. 30.5); 2) недоступная для прикосновения арматура опорных и проходных изоляторов, установленных на заземленных металлических опорах; 3) рельсовые пути, выходящие за пределы электрических станций и подстанций, и т. п.

По условиям надежности действия защиты от однофазных замыканий в сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью следует применять трансформаторы со схемой соединения обмоток «звезда — зигзаг» при мощности до 250 кВ·А включительно и со схемой «треугольник — звезда» при мощности 400 кВ·А и выше.

Заземление ручного инструмента. Особое значение имеет проблема безопасности ручных электрических машин (электроинструмента) бытового назначения. Насчитывается уже более 200 типов таких инструментов. Особенно тщательно надо соблюдать технику безопасности при работе в мастерских, под навесом и т. п. со сверлилками, рубанками, пилами, долбежниками и т. д. Эти машины должны выпускаться I, II и III классов защиты. К I классу относятся машины, у которых хотя бы одна доступная для прикосновения деталь отделена от частей, находящихся под напряжением, только основной рабочей изоляцией. Машины должны иметь заземление, шнур с заземляющей жилой и штепсельное соединение с заземляющей вилкой. К III классу относят машины с напряжением до 42 В.

Бытовой электроинструмент в основном относится ко II классу защиты. Здесь все детали, доступные для прикосновения, отделены от токоведущих частей двойной или усиленной изоляцией. Двойная изоляция — это, во-первых, изоляция обмоточных проводов, пазовая изоляция, лаки, компаунды, а, во-вторых, дополнительная изоляция — пластмассовый корпус, пластмассовая втулка, изолирующая пакет ротора от вала двигателя. Усиленная изоляция используется там, где нельзя сделать дополнительную изоляцию: в выключателях, штепсельных вилках, щеткодержателях и т. п.

Другие меры по обеспечению безопасности — это исключение возможности случайного прикосновения к элементам, находящимся

под напряжением, исключение возможности электрического удара от разряда конденсатора, встроенного в машину, сведение к минимуму вероятности механической травмы, ограничение вредного воздействия шума и вибрации.

Требования к занулению. В качестве нулевых защитных проводников могут быть использованы нулевые рабочие проводники, специально предусмотренные проводники (четвертая или третья жила кабеля или провод сети, стальные полосы и т. п.), стальные трубы электропроводки, алюминиевые оболочки кабелей, металлические конструкции зданий, металлические кожухи шинопроводов, все трубопроводы, проложенные открыто, кроме трубопроводов для горючих и взрывоопасных смесей, канализации, центрального отопления и бытового водопровода. По проводимости (сопротивлению) все перечисленные заземлители нулевых проводов должны удовлетворять требованиям ПУЭ. Устанавливать разъединяющие приспособления в цепях нулевых проводников запрещается, кроме тех случаев, когда одновременно отключаются и все токоведущие провода в установке.

Для зануления однофазных бытовых электроплит следует делать ответвление от нулевого рабочего проводника (шины) этажного щитка на вводе, выполняемое отдельным проводом, площадь сечения у которого такая же, как у фазного. Этот провод должен подключаться к нулевому рабочему проводнику перед счетчиком до отключающего аппарата.

При занулении трехфазных электроплит не разрешается использовать нулевой рабочий проводник в качестве зануляющего рабочего проводника.

Для зануления светильников, вводы в которые выполняются защищенным проводом или незащищенными проводами в трубе (металлорукаве) или при скрытой проводке, делают ответвление от нулевого рабочего проводника внутри светильника. При вводе в светильник открытых незащищенных проводов для зануления корпуса светильника следует использовать гибкий провод (ответвление), присоединяемый с одной стороны к нулевому рабочему проводу на неподвижной опоре, а с другой — к заземляющему винту корпуса.

Если питание к энергоприемникам подводится по воздушным линиям, то для зануления коммутационных аппаратов, устанавливаемых снаружи зданий (животноводческие помещения, склады и пр.), следует устраивать перемычку между нулевым рабочим проводом и заземляющим болтом на корпусе аппарата (ответвление от нулевого рабочего проводника).

В наружных установках и во взрывоопасных помещениях для зануления нужно использовать свободную жилу кабеля или свободный провод воздушной сети, присоединяемые к нулевому рабочему проводнику в ответвительной коробке, а в помещениях класса В-1 — в ближайшем групповом щитке.

С целью выравнивания потенциала во всех помещениях и наружных установках, где выполнено зануление, все металлические конструкции трубопровода, корпуса оборудования и т. п. должны быть присоединены к сети зануления.

29.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РАСТЕКАНИЮ ЗАЗЕМЛИТЕЛЕЙ

В качестве заземлителей применяют стальные трубы, угловую сталь, стальные полосы.

Сопротивление растеканию трубчатого заземлителя (Ом) определяют по упрощенной формуле:

$$R_{\text{тр}} = 0,009 \varrho / l_{\text{тр}} . \quad (29.6)$$

Сопротивление заземлителя из угловой стали 50×50 мм длиной 2,5 м определяют по приближенной формуле:

$$R_{\text{уг}} \approx 0,000032 \varrho , \quad (29.7)$$

а из угловой стали 60×60 мм той же длины по формуле:

$$R_{\text{уг}} \approx 0,00003 \varrho . \quad (29.8)$$

Сопротивление заземлителя из полосы или проволоки

$$R_{\text{п}} \approx 0,0002 \varrho / l , \quad (29.9)$$

где ϱ — удельное сопротивление грунта; l — длина проволоки или полосы, м.

Значения удельных сопротивлений грунтов изменяются в очень широких пределах в зависимости от типа почвы, ее влажности, времени года и т. д. (табл. 29.1). Удельное сопротивление грунта можно узнать, если трубчатый заземлитель определенных размеров забить в землю и измерить его сопротивление растеканию. Затем, решив формулу (29.6) относительно ϱ , можно найти его значение для данного грунта.

Если удельное сопротивление грунта измерено для данного района, то при расчетах полученное удельное сопротивление должно быть умножено на поправочный коэффициент. Этот коэффициент учитывает изменение удельного сопротивления грунта в зависимости от времени года, ибо удельное сопротивление в сильной мере колеб-

29.1. Значения объемного удельного сопротивления различных грунтов

Грунт	Удельное сопротивление грунта ϱ , Ом · м	
	предельные значения	рекомендуемое значение для предварительных расчетов
Песок	100...1000	700
Супесь	150...400	300
Пашенная земля, смешанный грунт (глина, известь, щебень)	20...180	100
Суглинок	40...150	100
Глина	10...70	40
Торф	10...30	20

лется в зависимости от влажности грунта и особенно от степени его промерзания. Эти коэффициенты называются *повышающими климатическими коэффициентами* (табл. 29.2).

29.2. Повышающие климатические коэффициенты

Заземлители	Глубина заложения, м	K_1	K_2	K_3
Поверхностные	0,5	6,5	5,0	4,5
	0,8	3,0	2,0	1,6
Углубленные (трубы, угловая сталь, стержни)	Верхний конец на глубине около 0,8 м от поверхности земли	2,0	1,5	1,4

Если сопротивление измеряли при большой влажности грунта (при большом количестве выпавших осадков), берут коэффициент K_1 , если при средней влажности — коэффициент K_2 , при сухом грунте — K_3 .

В тех случаях, когда сопротивление растеканию $R_{\text{ест}}$ естественного заземления больше, чем требуемое R_1 , необходимо добавить искусственное заземление сопротивления R_n . Сопротивление растеканию искусственного дополнительного заземления определяют по формуле:

$$R_n = R_3 R_{\text{ест}} / (R_{\text{ест}} - R_3). \quad (29.10)$$

Порядок определения сопротивления растеканию заземления примерно следующий.

Если есть водопроводная сеть или другой естественный заземлитель, то измеряют сопротивление растеканию при помощи измерителя заземлений. Затем ведут расчеты в следующем порядке.

1. Устанавливают требуемое сопротивление заземления в соответствии с ПУЭ.

2. По формуле (29.10) определяют сопротивление заземлителя R_n , который должен быть выполнен в дополнение к имеющемуся естественному заземлителю.

3. Определяют расчетное удельное сопротивление грунта с учетом повышающих коэффициентов (табл. 29.1 и 29.2). Если есть результаты замеров удельного сопротивления почвы в течение года, то принимают наибольшее замеренное (рассчитанное по замерам контрольного заземлителя).

4. По формулам (29.6...29.8) определяют сопротивление одного вертикального электрода R_3 .

5. Определяют примерное число вертикальных электродов с учетом коэффициента использования (рис. 29.3), как

$$n = R_1 / (\eta R_n). \quad (29.11)$$

6. Рассчитывают сопротивление растеканию соединительных R_1 полос — электродов и уточняют общее сопротивление заземляющего устройства и число вертикальных электродов, пользуясь выражением

$$1/R' = 1/R_1 + 1/R_n,$$

откуда

$$R'_3 = R_f R_H / (R_f - R_H). \quad (29.12)$$

7. Уточняют число вертикальных электродов n с учетом коэффициента использования.

29.4. ОСОБЕННОСТИ УСТРОЙСТВА ЗАЗЕМЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 380/220 В

Главная особенность устройства заземлений электрических приборов и аппаратов, работающих у потребителя, заключается в том, что для каждого отдельного аппарата или прибора не выполняют заземление, а используют зануление. Оно должно обеспечивать перегорание плавкой вставки предохранителя в фазном проводе при металлическом замыкании данной фазы на корпуса приборов и аппаратов.

На рисунке 29.4, а приведена схема зануления металлического корпуса выключателя абажура лампы и корпуса двигателя.

Для надежного срабатывания предохранителя FU при однофазном замыкании должно удовлетворяться следующее условие:

$$I_K = U_\phi / (R_0 + R_\phi) \geq k I_{\text{н.т. БСТ}} = 3 I_{\text{н. БСТ}}, \quad (29.13)$$

а при налични автомата

$$I_{\kappa} = U_{\phi} / (R_0 + R_{\phi}) \geq k I_{\text{откл. двт}} = 1,5 I_{\text{н}}, \quad (29.14)$$

где I_k — ток короткого замыкания в поврежденной фазе; R_0 — сопротивление нулевого провода; R_ϕ — сопротивление фазного провода; U_ϕ — фазное напряжение; $I_{н.вст}$ — номинальный ток плавкой вставки предохранителя; $I_{пл.вст}$ — ток плавления вставки; $I_{откл.авт}$ — ток срабатывания максимального реле автомата.

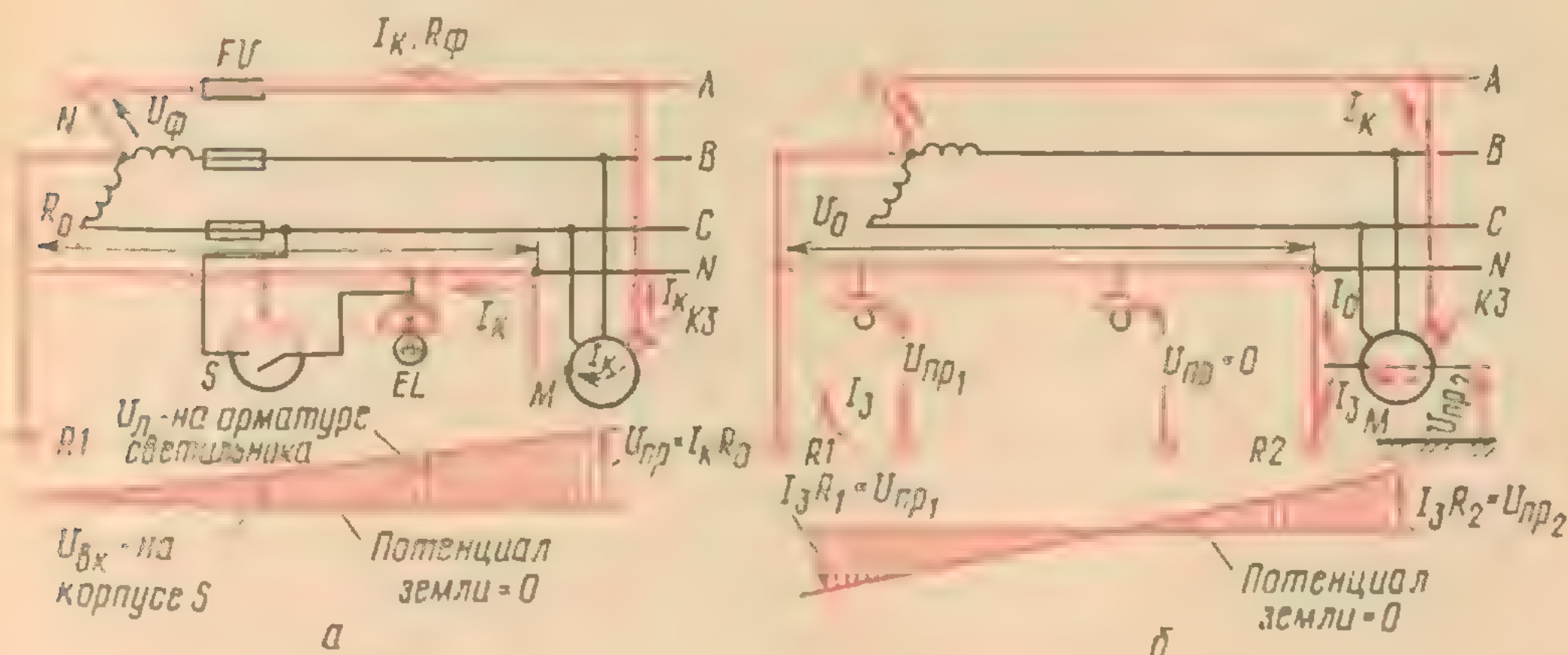


Рис. 29.4. Схема зануления корпусов выключателя S , светильника EL и двигателя M : а — в схеме имеется только одно основное заземление R_1 ; б — в схеме имеется основное R_1 и дополнительное R_2 зазем. чия, R — сопротивление нулевого провода, U — напряжение на нулевом проводе; $U_{пр}$ — напряжение прикосновения.

Напряжение на корпусе по отношению к земле в этом случае

$$U_{\text{пр}} = I_{\text{к}} R_0 = U_{\text{ф}} R_0 / (R_0 + R_{\text{ф}}), \quad (29.15)$$

где $I_{\text{к}}$ — ток короткого замыкания; R_0 — сопротивление нулевого провода; $R_{\text{ф}}$ — сопротивление фазного провода.

Если площадь сечения нулевого провода составляет 50% площади сечения фазного, то есть $R_0 = 2R_{\text{ф}}$, то выражение (29.15) можно переписать следующим образом:

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{ф}} R_0 / \left(R_0 + \frac{R_0}{2} \right) = (2/3) U_{\text{ф}}. \quad (29.16)$$

Следовательно, если фазное напряжение $U_{\text{ф}} = 220$ В, то напряжение прикосновения $U_{\text{пр}} = 147$ В.

При равенстве сопротивлений нулевого и фазного проводов напряжение прикосновения $U_{\text{пр}} = 110$ В.

Для улучшения условий безопасности в электроустановках выполняют повторные заземления (рис. 29.4, б). В этом случае ток замыкания на корпус будет возвращаться в источник по нулевому проводу и повторному заземлению R_2 . Ток через землю

$$I_3 = U_0 / (R_1 + R_2), \quad (29.17)$$

где U_0 — падение напряжения в нулевом проводе.

Напряжение прикосновения, или напряжение нейтрали по отношению к земле, в начале линии

$$U_{\text{пр1}} = U_0 R_1 / (R_1 + R_2) = I_3 R_1, \quad (29.18)$$

а напряжение прикосновения у двигателя

$$U_{\text{пр2}} = U_0 R_2 / (R_1 + R_2) = I_3 R_2. \quad (29.19)$$

Таким образом, если нулевой провод имеет сопротивление, равное сопротивлению фазного провода (тогда $U_0 = 110$ В), а сопротивления растеканию заземлений равны между собой, то есть

$$R_1 = R_2 = R, \quad (29.20)$$

то напряжение прикосновения

$$U_{\text{пр1}} = U_{\text{пр2}} = U_0 R / 2R = 55 \text{ В}. \quad (29.21)$$

В точке нулевого провода, расположенной в середине между заземлителями, потенциал относительно земли равен нулю.

Повторные заземления нулевого провода нужно выполнять на концах воздушных линий или ответвлений длиной более 200 м, а также на вводах в здания, электроустановки которых подлежат заземлению. Если электроустановки размещаются вне зданий, то ближайший повторный заземлитель на линии должен быть не далее

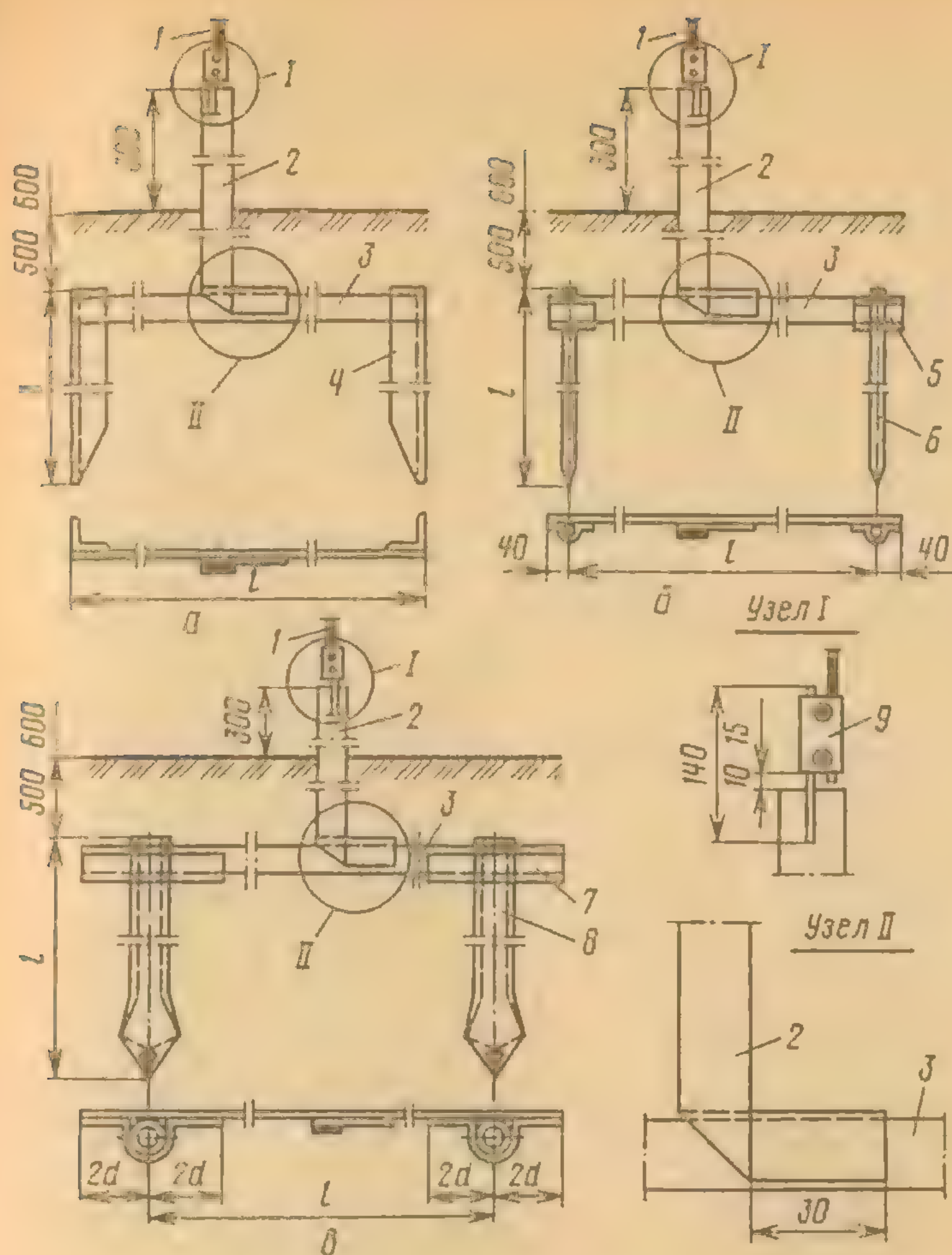


Рис. 29.5. Устройство заземлителей:

а — из уголковой стали; б — из стержней; в — из труб; г — соединение заземляющего спуска на опоре; 1 — заземляющий спуск; 2 — заземляющий проводник; 3 — заземляющая полоса 4×40 (Ст3); 4 — заземлитель из уголка; 5 — скоба для приваривания стержня; 6 — заземлитель из стержня; 7 — скоба для приваривания трубы; 8 — заземлитель из трубы; 9 — плашечный зажим..

чем в 100 м (считая вдоль линии), а если требуется по условиям молниезащиты, то и чаще (см. главу 30).

Для повторных заземлений нужно в первую очередь использовать естественные заземлители, например железобетонные опоры и молниезащитные заземления.

Общее сопротивление заземляющих устройств всех повторных заземлений нулевого провода каждой воздушной линии должно быть не более 5 Ом при напряжении 660/380 В, 10 и 20 Ом при напряжениях соответственно 380/220 и 220/127 В. Сопротивление каждого из повторных заземлений 15, 30 или 60 Ом соответственно в линиях 660/380, 380/220 и 220/127 В. При удельном сопротивлении земли более 100 Ом·м допускается повысить указанные значения сопротивлений заземляющих устройств, но не более чем в 10 раз (в $\rho/100$ раз).

На рисунке 29.5 показано устройство двухстержневых заземлителей из уголковой стали (а), из стержней (б) и труб (в), а также соединение заземляющего провода сваркой или плашечными зажимами (г).

**29.5. КЛАССИФИКАЦИЯ ПОМЕЩЕНИЙ ПО СТЕПЕНИ ОПАСНОСТИ
ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ,
ПО УСЛОВИЯМ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
И ДОПУСТИМЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК**

По степени опасности поражения людей электрическим током помещения подразделяются на следующие три категории.

1. Помещения с повышенной опасностью: сырые, жаркие, с проводящей пылью и токопроводящими полами (металлическими, земляными, железобетонными и т. п.), а также те, в которых человек может одновременно прикоснуться к металлическим конструкциям, имеющим соединение с землей, и к металлическим конструкциям электродвигателей и других электрических аппаратов.

2. Помещения особо опасные: особо сырые или с химически активной средой, а также те, в которых сочетаются два или более условий повышенной опасности.

3. Помещения без повышенной опасности: в них отсутствуют условия, создающие повышенную и особую опасность.

«Правилами устройства электроустановок» принята следующая классификация помещений (см. также табл. 20.3).

1. Сухие: относительная влажность в них не превышает 60% (жилые помещения, конторы, клубы, некоторые производственные отапливаемые помещения).

2. Влажные: здесь относительная влажность не превышает 75%, пары или конденсирующаяся влага выделяются лишь временно и притом в небольших количествах (неотапливаемые помещения, сени жилых домов, склады, подсобные помещения мастерских и др.).

3. Сырые: в них относительная влажность длительно превышает 75%.

4. Особо сырые: тут относительная влажность близка к 100%. Потолок, стены, пол и предметы в помещении покрыты влагой (общественные кухни, бани, прачечные, уборные, помещения для запаривания кормов, овощехранилища, скотные дворы, птичники, теплицы, молокоперерабатывающие предприятия, моечные в мастерских и др.).

5. Жаркие: температура длительно превышает 30°C.

6. Пыльные: в них по условиям производства выделяется технологическая пыль в таком количестве, что она может оседать на проводах, проникать внутрь машин, аппаратов и т. п.

7. Помещения с химически активной средой: здесь по условиям производства постоянно или длительно содержатся пары или образуются отложения, действующие разрушающе на изоляцию и токоведущие части электрооборудования (скотные дворы, конюшни, телятники и т. д.).

8. Взрывоопасные помещения и наружные установки: в них по условиям технологического процесса могут образоваться взрывоопасные смеси горючих газов или паров с воздухом или другими газами — окислителями, а также горючих пылей и волокон с воздухом (нефтебазы, нефтехранилища и др.).

9. **Пожароопасные помещения и наружные установки:** здесь хранятся или применяются горючие вещества (мельницы, молотильные сарай, зернохранилища, овины, скотные дворы, конюшни, амбары и др.).

В зависимости от вида и состояния помещений принята весьма условная классификация напряжений.

Малое напряжение 12 В используется для ручных светильников и электрифицированного ручного инструмента в помещениях с повышенной опасностью и особо опасных при очень неблагоприятных условиях: теснота, неудобное положение работающего (лежа, сидя, прислонившись к металлическим массам и т. д.), а также постоянное соприкосновение с металлическими заземленными предметами (работа в котле, в силосной башне с остатками силоса и т. д.).

Малое напряжение 42 В применяют для ручных переносных и стационарных светильников, расположенных ниже 2,5 м над полом, и электрифицированного ручного инструмента в помещениях с повышенной опасностью или особо опасных при отсутствии отмеченных выше неблагоприятных условий.

Малое напряжение получают при помощи переносных трансформаторов или машинных преобразователей. Использовать для этой цели автотрансформаторы недопустимо, так как в данном случае остается электрическая связь цепи малого напряжения с сетью напряжением 220/380 В. Применение малых напряжений — весьма эффективная мера безопасности, но она не может быть широко использована вследствие невозможности передачи больших мощностей на малом напряжении и на значительные расстояния. Поэтому для местного освещения в помещениях особо опасных и с повышенной опасностью, а также для подключения ручного инструмента используются трансформаторы напряжением 12...42 В (преобразователи частоты и напряжения со вторичным напряжением 42 В).

Низкое напряжение до 70 В применяется в электросварочных агрегатах.

Напряжение 380/220 В при заземленной нейтрали рекомендуется использовать для стационарного освещения во всех помещениях, а также для электропривода и других технических целей.

Для каждого из электрических устройств устанавливают нормы сопротивления изоляции (п. 25.5).

Необходимо следить за исправностью кожухов и корпусов электрических аппаратов (рубильников, выключателей, переходных коробок и т. д.).

Токоведущие части, которые по условиям работы не могут быть изолированы, но находятся в зоне возможного прикосновения обслуживающего персонала (например, выводы обмоток трансформатора, установленного на полу помещения, задняя сторона электрического щита управления на электростанции и т. д.), необходимо ограждать. Стенки ограждения должны находиться на расстоянии не менее 35 см от токоведущих частей при напряжении до 380 В и на расстоянии 60 см при высоком напряжении (до 35 кВ).

В целях безопасности нужно широко пользоваться специальными предупредительными плакатами.

29.6. ЗАЩИТНОЕ ОТКЛЮЧЕНИЕ

Защитное отключение предназначается для отключения электроустановки (например, электродвигателя) от сети при появлении опасного потенциала на корпусе.

Одна из распространенных схем отключения установки при появлении опасного потенциала на корпусе показана на рисунке 29.6, а. Здесь используется электромагнитное реле напряжения, катушка 1 которого включена между корпусом электродвигателя (или другого аппарата) и заземлением, а размыкающие контакты 2 введены в цепь катушки магнитного пускателя KM . В реле встроены также кнопка 3 и резистор 4, который подключен одним концом к фазе сети. Кнопка 3 служит для проверки действия защитного реле: при ее нажатии катушка реле оказывается включенной на напряжение между фазой и землей и защита должна разорвать цепь тока. В условиях эксплуатации появление потенциала на корпусе установки вызывает срабатывание реле и отключение магнитного пускателя.

На рисунке 29.6, б приведена схема включения асимметричного реле (асимметра) типа РА-74/2 для защиты человека от поражения током (например, при работе с ручным инструментом, получающим питание от источника тока с изолированной нейтралью). Конденсаторы C равной емкости (по 0,25 мкФ), создают искусственную нулевую точку. Между нулевой точкой и заземлением (корпусом машины) включают катушку 1 электромагнитного реле. В случае прикосновения человека к токоведущей части установки или корпусу, на который замкнула фаза, ток замыкания пройдет к нулевой точке через катушку реле и вызовет его срабатывание, то есть отключение установки. Реле здесь может быть выбрано на срабатывание при токах замыкания, равных 10...20 мА. Такая схема не может быть применена в системах с заземленной нейтралью, так как она не обеспечит безопасности при замыкании на землю (большая часть тока в месте замыкания пройдет в нейтраль через ее заземление, а не через реле защиты).

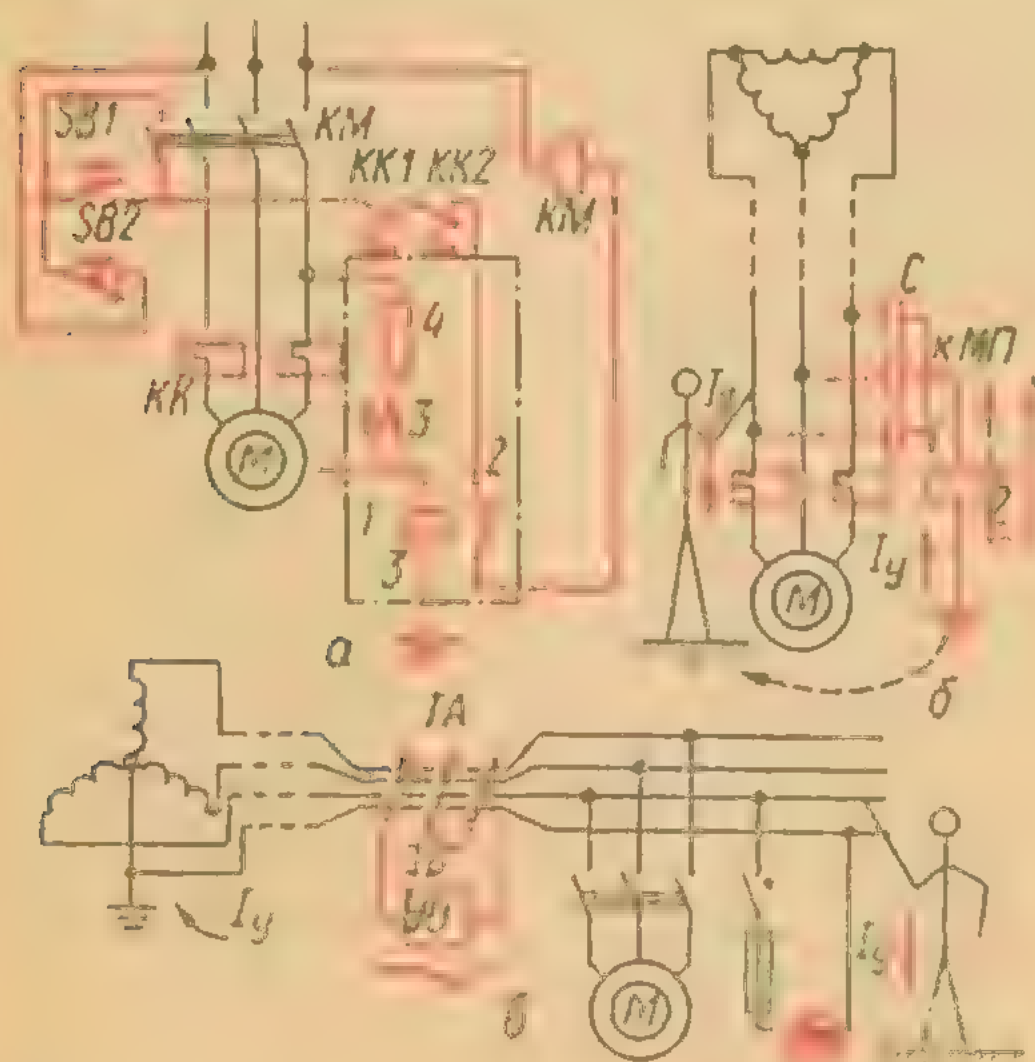


Рис. 29.6. Схемы защитного отключения: а — с электромагнитным реле, которое включено между корпусом установки и заземлением, выполненным отдельно от заземления корпуса; б — с реле, включенным между искусственной нулевой точкой, образованной тремя конденсаторами C , и заземлением; в — с реле, включенным во вторичную обмотку трансформатора тока $ТА$, первичной обмоткой которого служат все четыре провода сети: 1 — катушка реле; 2 — размыкающие контакты; 3 — кнопка проверки действия защитного устройства; 4 — резистор; KM — магнитный пускатель; $ТА$ — трансформатор тока нулевой последовательности; $УО$ — устройство отключения; I_y — ток утечки.

На рисунке 29.6, а показана схема с кабельным трансформатором тока нулевой последовательности типа ТЗЛ, ТЗ, ТФ или др. В устройствах защитного отключения в сетях 380/220 В трансформатор тока представляет собой катушку, охватывающую все четыре провода (три фазных и нулевой), которые все вместе и служат первичной обмоткой трансформатора тока. При нормальной работе электроприемников сумма токов, протекающих по всем проводам, равна нулю, общий магнитный поток также равен нулю, поэтому и ЭДС во вторичной обмотке трансформатора тока отсутствует. При возникновении тока утечки на землю, например при прикосновении человека к токоведущей части установки через его тело пройдет ток I , замыкания на землю. Этот ток создаст магнитный поток небаланса в трансформаторе тока, и подключенное ко вторичной обмотке устройство отключения УО сработает, а его контакты отключат установку (реле РУД, С-901 и др.). Работа таких защит не зависит от схемы соединения сети и может применяться в сетях напряжением до 1000 В и выше.

29.7. ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ

Индивидуальные средства защиты могут быть весьма условно разделены на три основные группы.

1. Средства, предотвращающие случайное прикосновение к частям установки, находящимся под напряжением (временные ограждения; плакаты; предостерегающие надписи; приборы, устанавливающие, что напряжения в установке нет; временные заземления и т. п.).

2. Изолирующие средства, защищающие человека от поражения электрическим током, когда он касается частей электроустановки, находящихся под напряжением (изолирующие перчатки, боты, галоши, подставки и коврики, изоляция инструмента, изолирующие штанги, клещи и др.).

3. Средства, защищающие от действия электрической дуги (защитные очки; брезентовые рукавицы; специальный костюм).

По степени надежности индивидуальные изолирующие средства защиты подразделяются на основные и дополнительные. К основным относят такие средства защиты, изоляция которых выдерживает рабочее напряжение установки. Дополнительные средства усиливают действие основных средств.

В электроустановках с напряжением выше 1000 В основными средствами защиты являются штанги и клещи, а дополнительными — диэлектрические перчатки, боты, коврики и изолирующие подставки.

В электроустановках напряжением до 1000 В основными средствами защиты являются диэлектрические перчатки, изолирующие рукоятки, указатели напряжения, а дополнительными — изолирующие подставки, коврики, дорожки, галоши и т. п.

При работе на необесточенных электроустановках необходимо одновременно (совместно) применять соответствующие основные и дополнительные средства защиты.

Штанги и клещи изготавливают на различные напряжения. При их

использовании необходимо строго придерживаться инструкции. Штанги и клещи предназначены для использования во внутренних устройствах. В сырую погоду в наружных установках применяют специальные оперативные штанги, соответствующие особым техническим требованиям.

Для выполнения операций с однополюсными разъединителями в установках 10 и 35 кВ, а также для определения напряжения (по искре или посредством навинчиваемого на штангу указателя высокого напряжения в закрытых электроустановках) предназначены изолирующие универсально-оперативные штанги серии ШО. Штанги серии ШИ служат для выявления дефектных подвесных в гирлянде или склеенных в колонке опорных изоляторов, находящихся под напряжением, для снятия набросков с высоковольтных линий электропередач и контроля соединений на линиях и подстанциях. Они применяются в закрытых помещениях или наружных установках (в сухую погоду) напряжением 35, 110 и 220 кВ. Штанги заземления серии ШЗП предназначены для наложения переносных заземлений на отключенные части электрооборудования открытых установок класса напряжения от 10 до 220 кВ (соответственно типа ШЗП-10, ШЗП-35 и т. д.) только в сухую погоду.

Резиновые коврики изготавливают из специальной резины с рифленной поверхностью. Наименьший размер коврика $0,75 \times 0,75$ м. Выпускаются также резиновые дорожки с минимальной шириной 0,75 м.

Изолирующие подставки представляют собой деревянный настил из планок, опирающийся на ножки или фарфоровые изоляторы. Металлические детали даже для соединения деревянных планок использовать нельзя. Наименьшие размеры подставок $0,75 \times 0,75$ м. Расстояние между планками не более 2,5 см. Высота изоляторов не менее 10 см.

Переносное временное заземление выполняют из медных проводов с площадью сечения не менее 25 мм². Эти провода сначала соединяют с заземлителями, а затем штангой закрепляют их на шинах или проводах линии. На концах проводов заземления имеются специальные зажимы с приспособлениями для работы штангой.

Перед использованием средства защиты внимательно осматривают и очищают от пыли. Особое внимание обращают на клеймо, удостоверяющее пригодность средства защиты, а также на дату испытания средства защиты. Средства защиты непроверенные, без клейма о годности или с клеймом «пробито» нужно немедленно изъять. Проверяют средства защиты в специальных лабораториях, результаты испытаний оформляют протоколом.

Изолирующие штанги и клещи испытывают не менее чем трехкратным напряжением один раз в год в установках с постоянным дежурным персоналом, один раз в два года в установках без постоянного дежурного персонала, а в ряде случаев при частом использовании — один раз в 6 месяцев.

Резиновые перчатки, боты и галоши проверяют один раз в 6 месяцев, изолирующие подставки — один раз в 3 года.

Основное условие безопасности обслуживающего персонала в электроустановках — исключение возможностей случайного прикосновения к токоведущим частям. Для этого необходимо поддерживать изоляцию в хорошем состоянии, ограждать все токоведущие неизолированные элементы установки, а также располагать токоведущие неизолированные части на высоте, недоступной без специальных приспособлений.

С целью обеспечения безопасности обслуживающего персонала широко используется *двойная изоляция* (см. п. 29.2). Двойной изоляцией снабжают, в частности, переносные ручные лампы с пластмассовой рукояткой, ручной инструмент в пластмассовом корпусе и др.

Не допускается заменять плавкие вставки под напряжением. Категорически запрещается определять наличие напряжения на элементах установки, прикасаясь к ним руками. Для этой цели нужно использовать двухполюсный токоискатель типа ТИ-2, однополюсный указатель напряжения до 1000 В типа УНН, представляющие собой приборы со встроенной в них неоновой лампой и добавочным сопротивлением, или, наконец, контрольную лампу.

Для распознавания назначения различных частей электрооборудования в электроустановках их маркируют и окрашивают в разные цвета. Токоведущие фазы окрашивают в желтый, зеленый и красный цвета, а проводники защитного заземления — в черный цвет. Заземляющие, нулевые провода и шины окрашивают в фиолетовый цвет с черными полосами через каждые 150 мм.

Чтобы предупредить персонал о включенном или выключенном состоянии различных элементов в электрической установке, пользуются сигнализацией. Надежным средством защиты персонала от прикосновения к токоведущим частям, находящимся под напряжением, является блокировка.

Помещения закрытых и территория открытых высоковольтных электроустановок должны быть недоступны для посторонних. Ключи от их ограждений хранятся у дежурного, который выдает их под расписку лицам административно-технического персонала, имеющим разрешение на осмотр, а также руководителям ремонтных и монтажных работ при одновременном оформлении допуска по наряду.

Ремонтные работы в сетях низкого напряжения при снятом напряжении ведут два электромонтера одновременно, с тем чтобы в случае попадания одного из них под напряжение второй мог прийти ему на помощь. Для предупреждения ошибочных включений напряжения на линию или в электроустановку, где ведутся ремонтные работы, необходимо между ножами отключенного рубильника прокладывать изолирующий материал, вынимать плавкие вставки предохранителей и вывешивать плакат «Не включать, работают люди».

Если рубильник находится вне поля зрения работающих, то после отключения установки необходимо наложить заземление на участке,

где ведутся ремонтные работы. Время начала и конца работы регистрируют в дежурном журнале.

Работа под напряжением в электроустановке допускается лишь в том случае, когда отключение установки вызовет серьезное нарушение технологического процесса или приведет к браку выпускаемой продукции. Эту работу проводит специально обученный электрик под наблюдением инженера или техника с соблюдением всех мер предосторожности: с использованием ковриков и изолирующих подставок, резиновых перчаток и галош, инструмента с изолированными ручками и т. д.

29.9. ОКАЗАНИЕ ПЕРВОЙ ПОМОЩИ ПОСТРАДАВШЕМУ ОТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА

Освобождение пострадавшего от тока. Прежде всего пострадавшего необходимо освободить от действия тока, уложить его на спину; проверить, дышит ли он (по подъему грудной клетки, по отклонению нитки, полоски бумаги, полнесенных ко рту или носу пострадавшего); проверить пульс (на лучевой артерии у запястья или на сонной артерии на шее); определить состояние зрачка (узкий или широкий; широкий зрачок указывает на резкое ухудшение кровоснабжения мозга). Все это должно занять не более 15...20 с. Одновременно необходимо вызвать врача.

Освобождая пострадавшего от тока, следует соблюдать соответствующие меры предосторожности. Самое надежное — отключить установку рубильником, если он находится в непосредственной близости. В противном случае можно перерубить провода топором или лопатой с изолирующей сухой рукояткой. Можно набросить на провода предварительно воткнутый в землю неизолированный проводник и тем самым сделать короткое замыкание, которое вызовет отключение электроустановки.

Если невозможно быстро отключить токоведущие части, которых касается пострадавший, или снять с них напряжение, то следует отделить его от токоведущих частей. При этом прикосновение к телу пострадавшего может быть опасным для спасающего. В установках напряжением 380/220 В оторвать пострадавшего от токоведущих частей можно, надев рукавицы, обернув свою руку сухой одеждой, а также пользуясь в качестве рычага сухой доской или палкой. Встав на сверток сухой одежды (костюм, пальто), сухую доску, табуретку, стул и т. п. и изолировав себя таким образом от земли, можно действовать одной рукой.

Когда нельзя отключить установку с напряжением выше 1000 В, при отделении пострадавшего от тока нужно надеть изолирующие боты, диэлектрические перчатки и действовать изолирующей штангой или клещами.

Когда пострадавший находится на высоте, прежде чем снять напряжение в сети или отделить человека от сети, нужно предотвратить или обезопасить его падение.

Искусственное дыхание и массаж сердца. Если после освобождения от тока пострадавший дышит и пульс у него есть, его следует

удобно уложить, укрыть, создать приток свежего воздуха, обеспечить полный покой и ждать прибытия врача.

Если пострадавший не дышит или дышит очень редко и судорожно, делают искусственное дыхание.

При прекращении дыхания и остановке сердечной деятельности у пострадавшего быстро наступают необратимые явления в нервных клетках головного мозга, которые управляют жизненно важными функциями организма. Помощь пострадавшему должна быть оказана как можно скорее, поскольку даже самое малое промедление может оказаться причиной гибели человека.

Для приведения пострадавшего в чувство рекомендуется пользоваться двумя основными приемами:

1) делать искусственное дыхание, ритмично вдывая воздух в рот или нос пострадавшего;

2) искусственно поддерживать кровообращение, ритмично надавливая на переднюю стенку грудной клетки. Этим приемом, называемым наружным (закрытым, непрямым) массажем сердца, выталкивают кровь из его полостей в кровеносные сосуды и таким образом способствуют сохранению достаточного кровотока в организме при отсутствии самостоятельной сердечной деятельности.

Помощь обычно оказывают два человека. Но если спасающий один, то он должен поочередно проводить искусственное дыхание и массаж сердца в таком порядке. Сначала, если дыхание и пульс отсутствуют, нужно немедленно сделать пострадавшему два-три глубоких вдувания воздуха в рот или нос, затем проверить, не появился ли у него пульс. Если пульс отсутствует, искусственное дыхание необходимо продолжить.

Искусственное дыхание по методу «рот в рот» лучше делать, пользуясь приспособлением, показанным на рисунке 29.7. Оно состоит из двух отрезков резиновой или гибкой пластмассовой трубки 1 и 4 диаметром 8...12 мм, длиной 60 и 100 мм, натянутых на металлическую или твердую пластмассовую трубку 2 длиной 40 мм и овального фланца 3 из плотной резины, натягиваемого на трубку 2 между отрезками 1 и 4.

Пострадавшего укладывают на спину, рот очищают от посторонних предметов и слизи (платком, краем рубашки) и в него закладывают трубку: взрослому — конец 100 мм длиной, а ребенку или подростку — 60 мм. При этом необходимо проследить, чтобы язык у пострадавшего не запад назад и не закрыл дыхательное горло и чтобы туда попал конец трубки (но не в пищевод!). Количество поступающего воздуха в легкие пострадавшего при использовании этого способа в 4 раза больше, чем при старых способах искусственного дыхания.

При отсутствии этого приспособления воздух нужно вдывать пострадавшему непосредственно изо рта в рот, как показано на рисунке 29.7, б.

Если одновременно с искусственным дыханием нужно проводить наружный массаж сердца (когда оно не работает), воздух следует

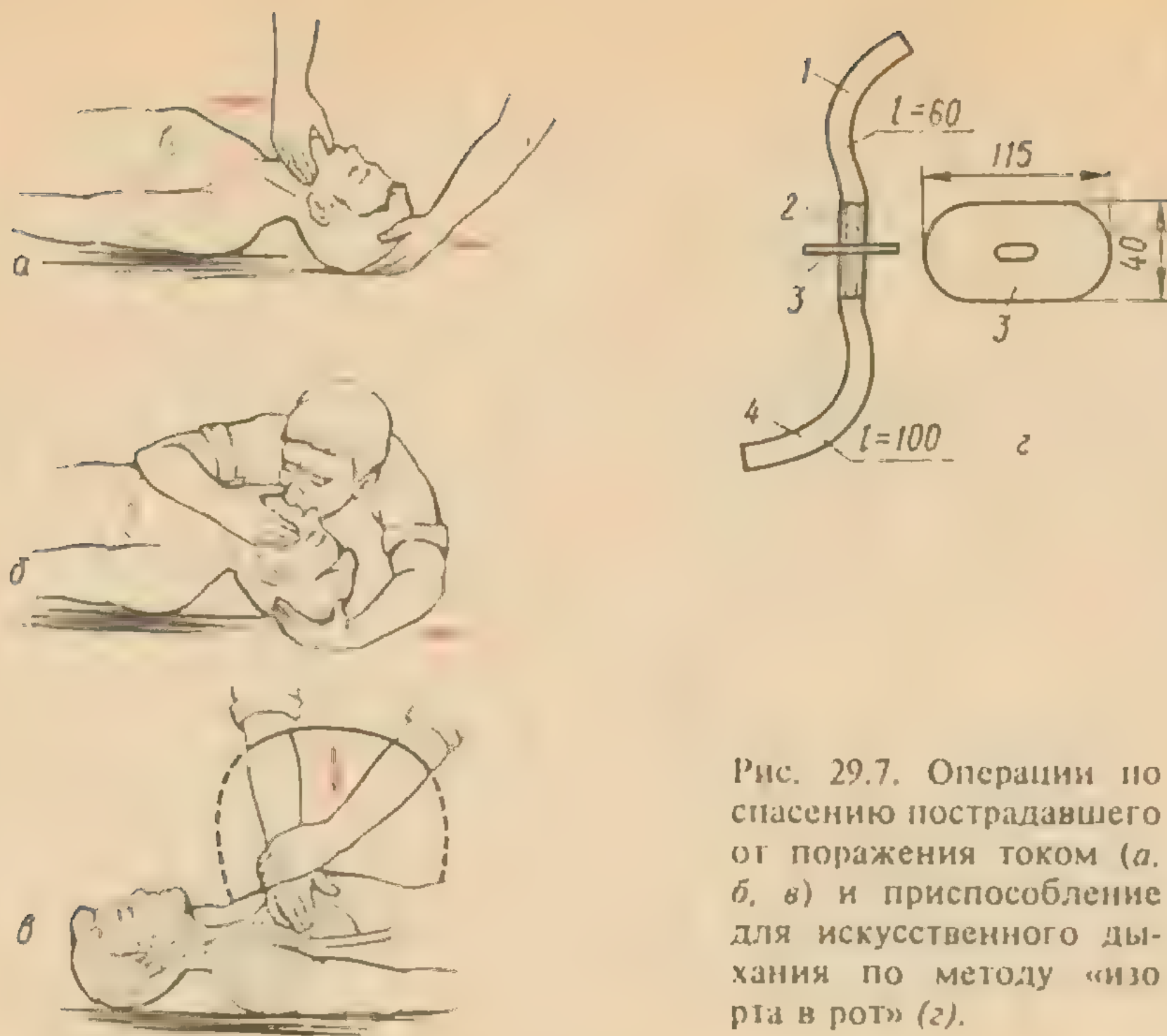


Рис. 29.7. Операции по спасению пострадавшего от поражения током (а, б, в) и приспособление для искусственного дыхания по методу «изо рта в рот» (г).

вдувать в момент прекращения надавливания на грудную клетку или прерывать массаж на время «вдоха» (примерно на 1 с).

Для проведения непрямого массажа сердца у пострадавшего обнажают грудную клетку, расстегивают или снимают одежду. Ладонь у запястья накладывают на нижнюю часть грудины (рис. 29.7, в), ладонь второй руки кладут поверх первой. Ритмично надавливают 60...70 раз в минуту. Соотношение этих «сердечных толчков» к числу вдуваний должно быть равным 5:1 или 6:1. Надавливание на грудину смещает ее вниз (к спине) в сторону позвоночника. Сердце таким образом сдавливается, и из его полостей выжимается кровь в кровеносные сосуды.

Пострадавшему крайне необходимо вдувать воздух во время паузы через 5...6 надавливаний.

Следует остерегаться надавливания на окончания ребер во избежание их перелома. Ни в коем случае нельзя надавливать ниже края грудины на мягкие ткани, так как можно повредить расположенные в брюшной полости органы, и в первую очередь печень.

При правильном проведении искусственного дыхания и массажа сердца у пострадавшего появляются следующие признаки оживления: цвет лица приобретает розовый оттенок, появляются самостоятельные дыхательные движения, которые становятся все более и более равномерными; суживаются зрачки.

Прекращать оказание первой помощи следует лишь после появления у пострадавшего самостоятельного дыхания и достаточно устойчивой работы сердца. Слабые вдохи даже при наличии пульса следует поддерживать, вдувая воздух. Если дыхание есть, а пульс долго не появляется (признак фибрилляции сердца), необходимо продолжать меры

по оживлению до прибытия врача или доставить пострадавшего в медицинское учреждение, оказывая помощь в машине.

В случае поражения человека грозовым разрядом нужно принять все необходимые меры первой помощи, о которых было сказано выше.

Следует помнить, что своевременная, умелая и хорошо организованная помощь — залог спасения жизни человека.

Контрольные вопросы и задания к главе 29. 1. Показать на схеме, как может появиться потенциал на корпусе электроустановки? 2. Объясните по рисунку и схеме защитную роль заземления корпуса электродвигателя при прикосновении к нему человека. 3. Дайте определение защитному, рабочему и молниезащитному заземлениям. 4. Как формируется шаговое напряжение по мере удаления от заземлителя? 5. Как происходит взаимное экранирование заземлителей? 6. Какие требования предъявляются к заземлениям и занулениям в электроустановках? 7. Когда выполняются повторные заземления и каким требованиям они должны удовлетворять? 8. Рассчитайте сопротивление растеканию заземлителя из уголкового стали 50×50 мм длиной 2,5 м (грунт глинистый). 9. Дайте определение сухим, влажным, сырым и особо сырым помещением. 10. Расскажите о действии защитного отключения. 11. Перечислите основные средства индивидуальной защиты.

Глава 30. МОЛНИЕЗАЩИТА В СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВКАХ

30.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Большой вклад в исследования атмосферного электричества внесли отечественные ученые М. В. Ломоносов (1711...1766 гг.) и Г. В. Рихман (1711...1753 гг.), который сконструировал для этих целей первый в истории науки электроизмерительный прибор «электрический указатель».

Грозовой разряд оказывает электромагнитные, тепловые и механические (ударные) воздействия на объекты.

Во время разряда возникает сильное электромагнитное поле, которое индуцирует напряжение в проводах электрической сети, наружных радиоприемных антеннах, металлических конструкциях. Перенапряжения в сетях, возникшие от прямого удара молнии в линию или индуктированные при разряде молнии, называются *атмосферными перенапряжениями*. Они распространяются на все участки электрической сети и являются одной из основных причин повреждений и аварийных отключений электроустановок. При отсутствии надежной защиты от атмосферных перенапряжений могут быть выведены из строя электрические аппараты на подстанциях или электростанциях, токоприемники у потребителя и т. д. Не следует забывать о той пожарной опасности, которую представляет молния.

Попадание молнии в строение, в дерево и в другие объекты может вызвать поражение людей, находящихся внутри этих объектов или около них. Это происходит в результате появления высоких потенциалов между частями объекта, к которым прикасается человек, или между объектом, которого человек касается, и землей, на которой он стоит, и, наконец, между двумя точками земли, на которых находятся ступни человека.

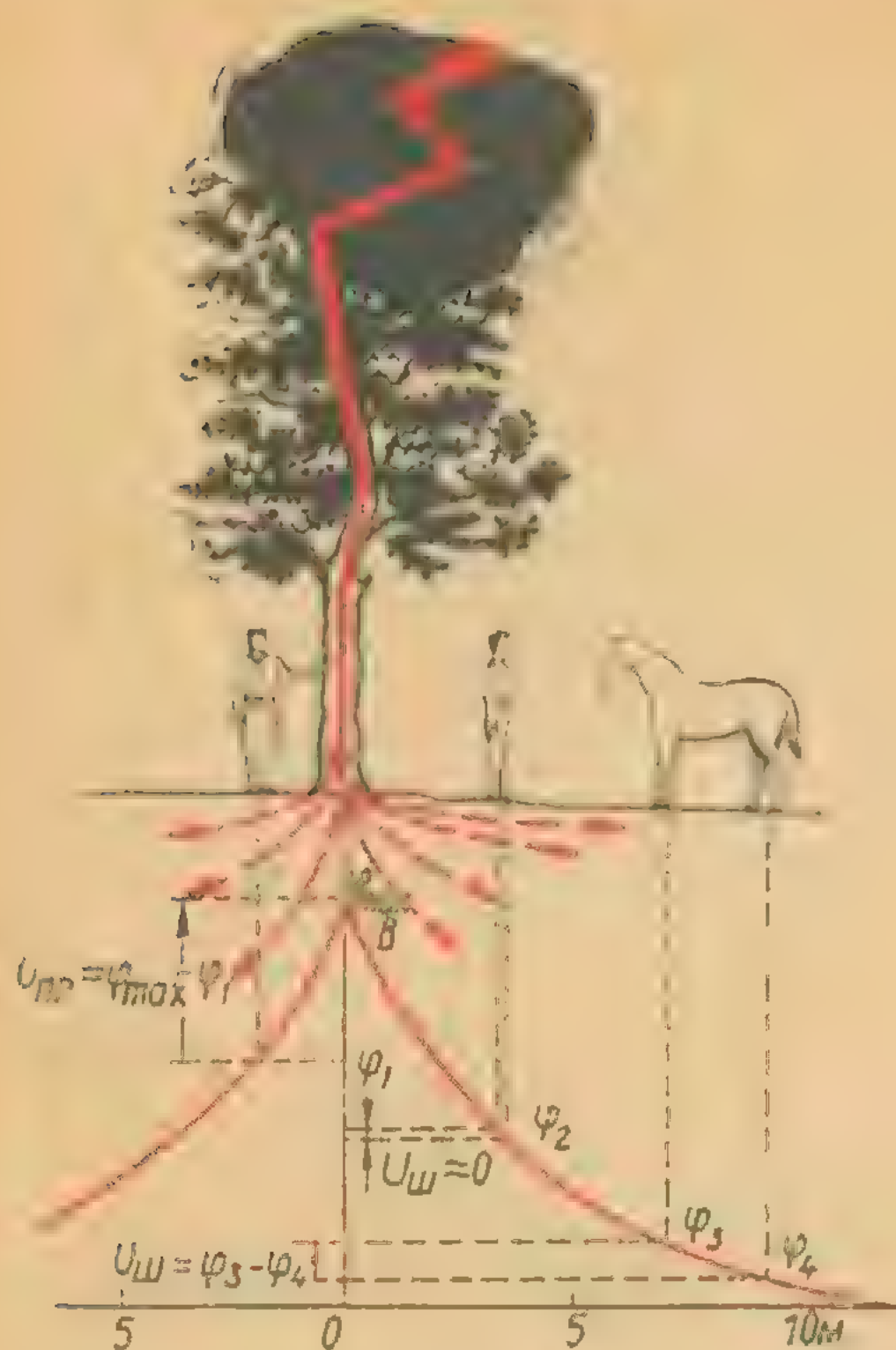


Рис. 30.1. Зона поражения при ударе молнии в дерево.

Рассмотрим случай попадания молнии в дерево и картину потенциалов на земле вокруг него (рис. 30.1). Во время грозового разряда электрический ток молнии проходит через ствол дерева и растекается во все стороны от дерева в земле, как это показано стрелками. Протекая по дереву и в земле, ток создает падение напряжения на сопротивлении дерева и на сопротивлении земли. Потенциал дерева может достигать сотен тысяч или даже миллионов вольт. Между деревом и точками на земле, находящимися на расстоянии 20...40 м от дерева, происходит падение этого потенциала от нуля. На диаграмме внизу рисунка 30.1 по вертикали отложен потенциал, а по горизонтали — расстояние от дерева в метрах. Характер кривой такой же, как и для случая с заземлителем.

Если человек стоит под деревом и касается его, то он окажется под напряжением, равным примерно 30% полного потенциала дерева в момент разряда (см. рис. 30.1). Оно может достигать десятков и даже сотен тысяч вольт. Рука человека лежит на стволе дерева (потенциал φ_{max}), ноги находятся в точке земли, имеющей потенциал φ_1 . Напряжение прикосновения $U_{\text{пр}} = \varphi_{\text{max}} - \varphi_1$. Под действием этого напряжения через тело человека проходит ток. Если человек не касается дерева, остается возможность его поражения шаговым напряжением. В 10...15 м от дерева шаговое напряжение уже не представляет опасности для жизни людей.

Человек, стоящий справа, спиной к дереву, держит ноги вместе, и его шаговое напряжение близко к нулю. Лошадь находится дальше от дерева, но ее положение более неблагоприятное, так как ее передние ноги находятся на окружности потенциала φ_3 , а задние — на окружности потенциала φ_4 . Шаговое напряжение, под которым оказалась лошадь, $U_{\text{ш}} = \varphi_3 - \varphi_4$.

Точно так же опасно находиться вблизи молниезащитных заземлителей и токоотводов. Поэтому возле них необходимо делать предупреждающие надписи.

В сельской местности большую опасность во время грозы может представить занос высоких потенциалов в помещение по воздушным проводам, антенным вводам и др. Поэтому при грозе следует избегать прикосновения к элементам электропроводки (выключателям, розеткам, патронам, бытовым приборам и т. п.) и к телефонам.

30.2. МОЛНИЕЗАЩИТА СТРОЕНИЙ В СЕЛЬСКОЙ МЕСТНОСТИ

Число гроз в том или ином районе зависит от географического положения, климатических условий, времени года, рельефа местности. Наибольшее число гроз в нашей стране приходится на июнь, июль, август. По количеству наблюдаемых в году гроз территория Советского Союза разделена на *сильногрозовые* (грозовых дней в году 30 и более), *грозовые* (от 10 до 30 грозовых дней в году) и *слабогрозовые* (не более 10 грозовых дней в году) районы. Молниезащите подлежат сельские строения в сильногрозовых и грозовых районах. В слабогрозовых районах (главным образом, северных) устраивать молниезащиту зданий не обязательно.

Степень вероятности поражения молнией определенного объекта зависит от его, высоты, рельефа местности, свойства грунта, материала здания. Поэтому вопрос об устройстве молниезащиты надо решать после выяснения, как часто бывают грозовые разряды на данном участке.

Конструкции молниеотводов. Для защиты строений от прямых ударов молнии применяют молниеотвод (громоотвод), который состоит из трех основных частей (рис. 30.2): молниеприемника 1, воспринимающего удар молнии, токоотвода 2, соединяющего молниеприемник с заземлителем, и заземлителя 3, который отводит молнию в землю. Опора молниеотвода представляет собой мачту из деревянных или стальных конструкций. В качестве опоры могут быть использованы деревья, высокие сооружения (башни, вышки и т. п.).

Молниеприемники, изготовляемые из стальных стержней, труб, уголковой стали и т. д., площадь сечения около 100 мм^2 , устанавливают выше стоек не менее чем на 15 см и не более чем на 2 м. Токоотводы 2 делают из стальной проволоки диаметром больше 6 мм или ленты с площадью сечения $25...30 \text{ мм}^2$. Молниеприемник и токоотвод обычно соединяют сваркой. Токоотвод прокладывают вплотную к опоре или стене здания, а от легковоспламеняющихся крыш (соломенных, тростниковых, щепяных и т. д.) — на расстоянии 10...15 см по деревянным держателям. Молниеприемники и токоотводы следует окрашивать устойчивой краской во избежание их ржавления.

Заземление выполняют из уголковой стали, труб, круглой или полосовой стали и т. п. с таким расчетом, чтобы его сопротивление составляло 10...20 Ом. Заземлители располагают на расстоянии не менее 0,5...0,8 м от фундамента защищаемого здания, в стороне от дверей, а при защите животноводческих помещений это расстояние должно быть 4...5 м. В глинистом, суглинистом и супесчаном грунте двух заземлителей длиной 2,5 м из уголковой стали (40×40 или $50 \times 50 \text{ мм}$) или труб (диаметром 40...60 мм) оказывается достаточно, чтобы получить сопротивление растеканию заземления 15...20 Ом. В песчаном грунте следует взять три заземлителя. Наиболее целесообразно располагать заземлители на расстоянии не менее 3...6 м друг от друга.

В местах с постоянно влажными верхними слоями грунта и там, где трудно забить трубы, выполняют протяженные (горизонтальные)

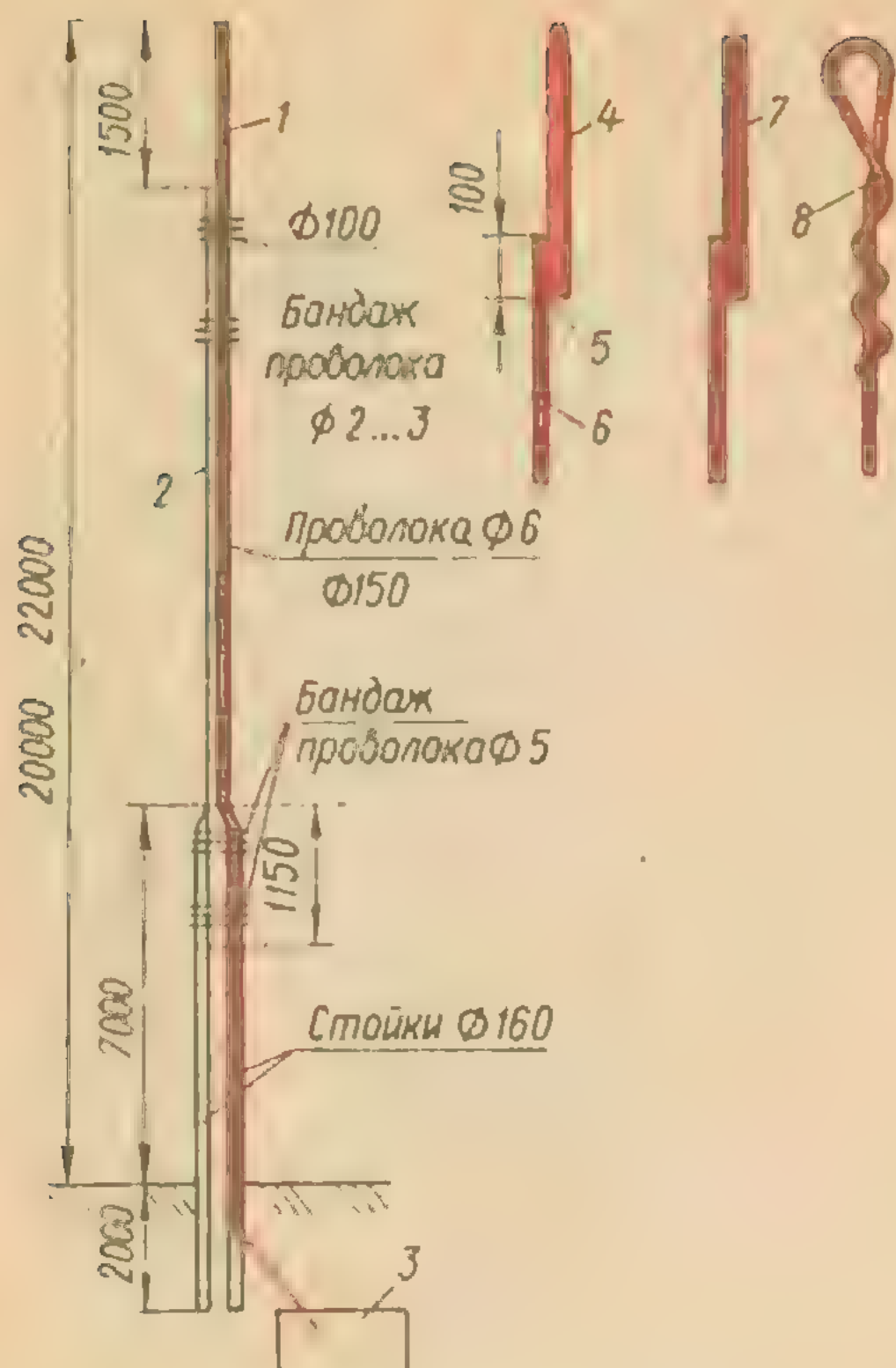


Рис. 30.2. Конструкция молниеотвода:
1 — молниеприемник; 2 — токоотвод; 3 — заземлитель; 4 — молниеприемник из трубы; 5 — сварка; 6 — молниеотвод; 7 — молниеприемник из уголка; 8 — молниеприемник из проволоки диаметром 6...10 мм.

заземлители из полосовой или круглой стали длиной 30...40 м.

Заземление молниеотвода (токоотвода) можно выполнить тем же проводом, что служит молниеотводом (одним куском). Для этой цели необходимо вырыть траншею глубиной около 1 м и уложить горизонтально в нее провод. Длина горизонтальной части должна быть не менее 2 м для глины, 4 м для суглинка, 6 м для чернозема, 8 м для супеска, 12...15 м для песка. Провод при этом должен быть стальным или медным диаметром 4 мм. Можно использовать и полосу (ленту) из металла толщиной 1,5...2 мм и шириной не менее 7...8 мм.

При выполнении заземления из пластин их следует устанавливать вертикально. Если пластина одна и длина ее a (м), ширина b (м), то должно быть удовлетворено следующее условие $\sqrt{ab} \geq 3$ м. Если пластин несколько, их общая площадь должна быть примерно равна площади квадрата со стороной 2,5...3 м.

Для измерения сопротивления растеканию служат измерители заземлений (гл. 11). Однако для этой цели можно воспользоваться методом вольтметра и амперметра (рис. 30.3). Для большей безопасности при измерении применяют трансформатор, вторичное напряжение которого 12...42 В.

Расстояние между испытуемым заземлением R , и дополнительным электродом $R_{доп}$ должно быть 40...60 м, а между R , и зондом, к которому подключается вольтметр, не менее 20...25 м. Сопротив-

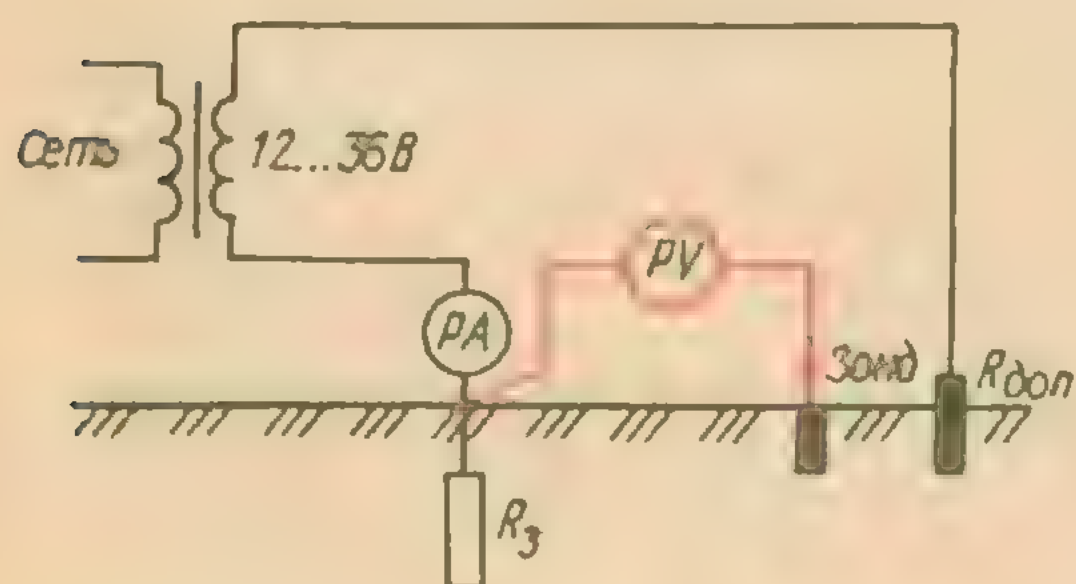


Рис. 30.3. Метод вольтметра и амперметра при измерении сопротивления растеканию заземлителя.

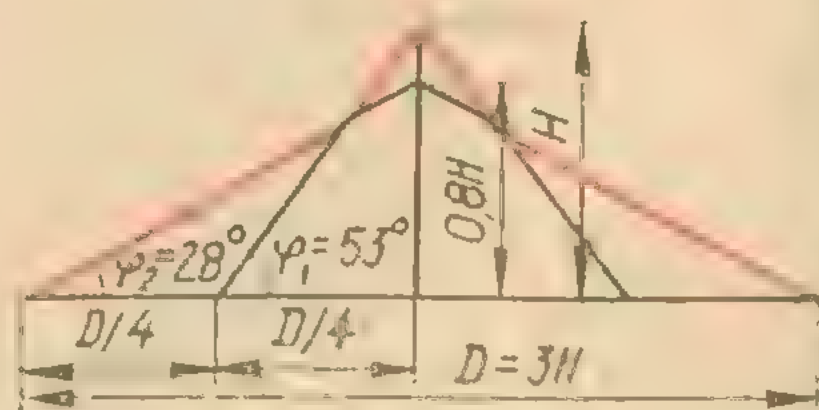


Рис. 30.4. Защитная зона одиночного молниеотвода.

ление растеканию дополнительного электрода, назначение которого — создать цепь для измерительного тока через испытуемое заземление, может быть порядка десятков омов. Зонд — стальной стержень с заостренным концом — позволяет получить в измерительной схеме точки с нулевым потенциалом.

Защитная зона одиночного стержневого молниеотвода. Вокруг одиночного стержневого молниеотвода образуется зона защиты, имеющая форму двойного конуса (рис. 30.4). Если высота молниеотвода H , то диаметр нижнего основания зоны защиты $D = 3H$. Если объект полностью расположен в зоне защиты молниеотвода, то прямой удар молнии практически не сможет поразить его.

При устройстве молнисотвода для защиты объекта необходимо проверить, будет ли эффективной грозозащита при выбранной высоте молниеотвода. Это делают графически (рис. 30.5): у основания защитной зоны строят контур защищаемого объекта в том же масштабе, что и молниеотвод. Затем проверяют, находятся ли в зоне защиты все детали объекта по высоте. С этой целью вычерчивают план объекта и зоны защиты на различных уровнях. На рисунке 30.5 эти уровни приняты на высоте конька крыши (сечение боковой проекции плоскостью I) и на уровне карниза крыши (сечение боковой проекции плоскостью II). На плане видно, что конек крыши вписывается в окружность I , полученную в сечении зоны защиты на высоте конька, а карниз вписывается в окружность II .

Высоту одиночного стержневого молниеотвода можно определить исходя из плана и боковой проекции объекта.

Для этой цели на плане описывают окружность I , внутри которой должны разместиться наиболее высоко расположенные детали объекта. Затем след плоскости окружности I наносят на боковой проекции объекта (отрезок AB). Под углом 53° к нему проводят линию AB до пересечения с перпендикуляром, восстановленным из центра окружности I . Полученный отрезок BC в масштабе проекций объекта представляет собой высоту молниеотвода над коньком здания.

Далее проверяют зону защиты выступающих деталей объекта. Для этой цели на перпендикуляре BD находят точку E на уровне $0,8$ общей высоты DB . В эту точку под углом 28° к горизонтали проводят линии FE и GE , которые при вращении их вокруг оси BD образуют зону защиты молниеотвода высотой DB .

Защитная зона двойного молниеотвода. Двойные молниеотводы устанавливают для защиты объектов значительной длины (например, скотных дворов, мастерских и т. д.).

На рисунке 30.6 показано, как определяют зону защиты двойного молниеотвода. Боковые зоны защиты молниеотводов M_1 и M_2 строят аналогично предыдущему. Затем из точки A , лежащей посередине между

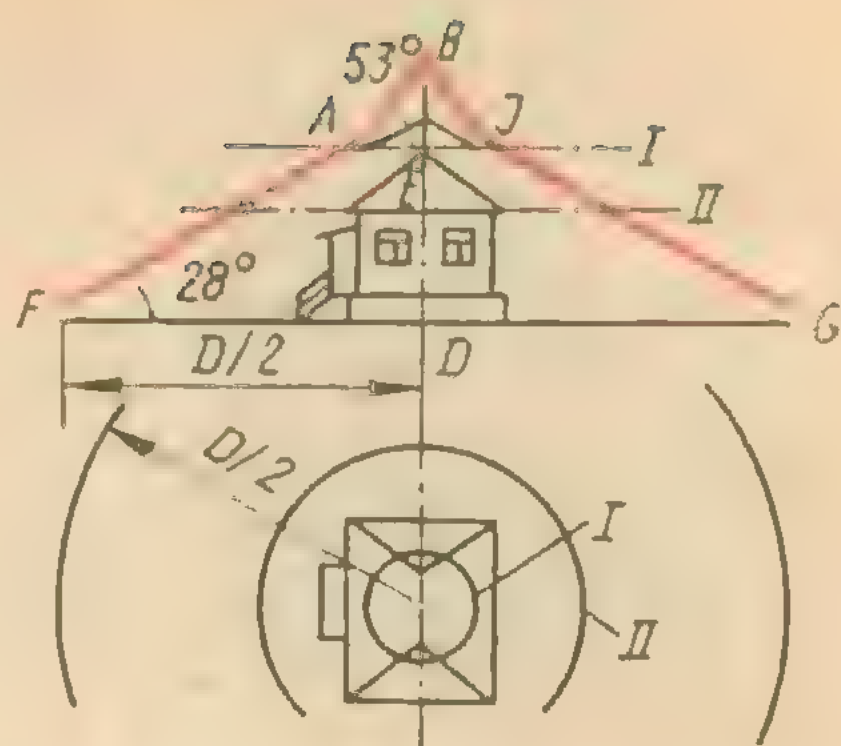


Рис. 30.5. Проверка эффективности грозозащиты здания.

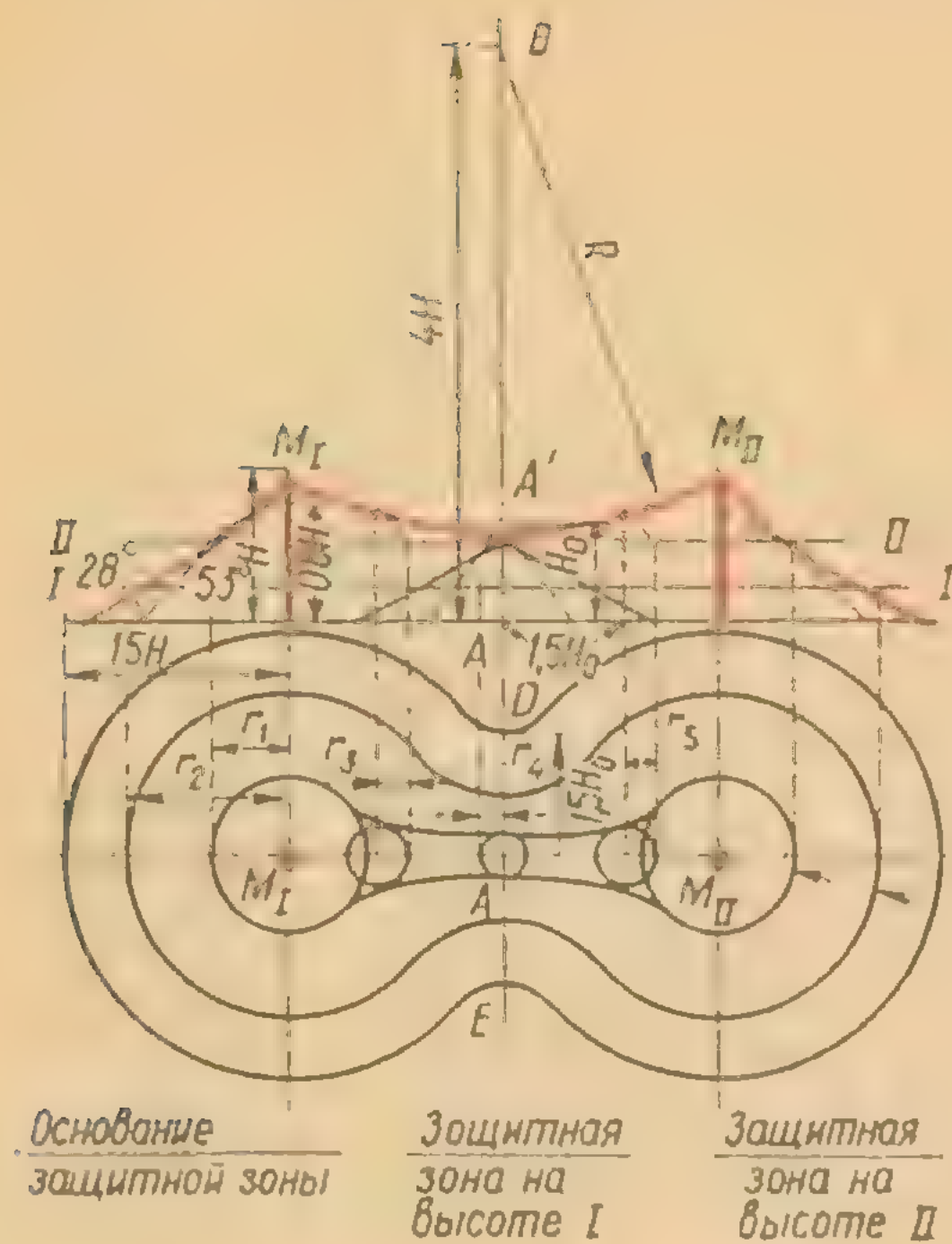


Рис. 30.6. Зона защиты двойного молниеотвода.

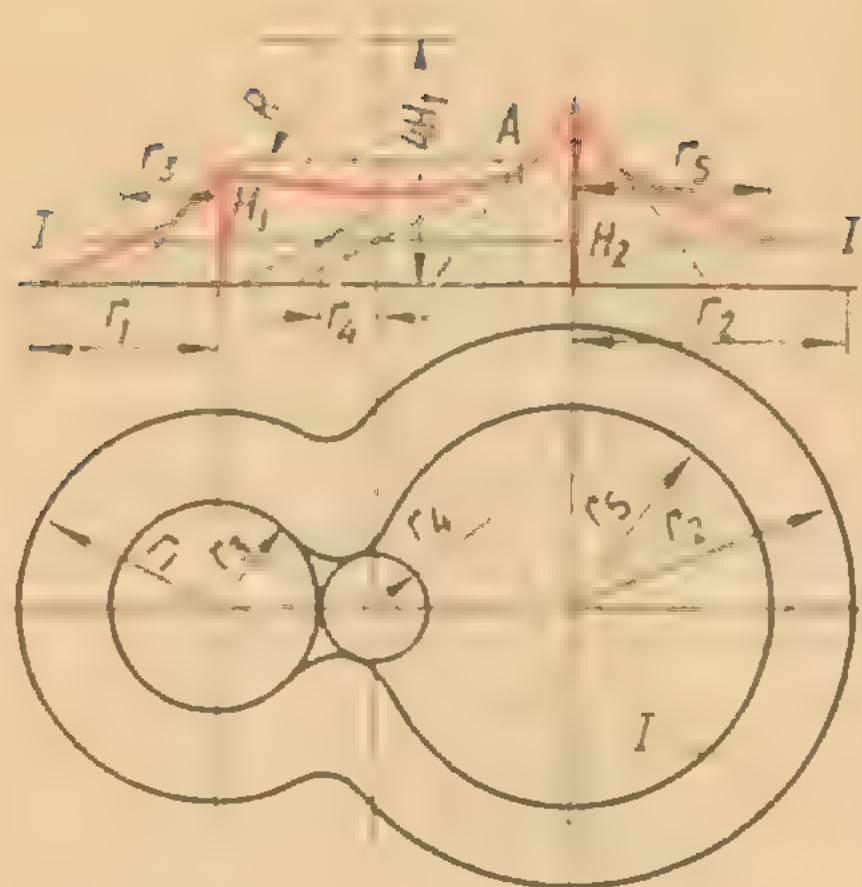


Рис. 30.7. Зона защиты двух молниеотводов различной высоты.

молниеотводами, восстанавливают перпендикуляр AB высотой $4H$, где H — высота молниеотвода. Из точки B через вершины молниеотводов проводят дугу окружности радиусом R . Эта дуга является верхней границей зоны защиты между молниеотводами.

Защитная зона в плане у основания заземлителей представляет собой площадь, перекрываемую окружностями, проведенными из проекций молниеотводов на горизонтальную плоскость радиусом $1,5H$. В средней части зоны откладывают отрезки AD и AE , равные $1,5H_0$, где H_0 — высота условного молниеотвода, восстановленного в точке A . Из точек D и E проводят касательные к окружностям I и II . Зону защиты в сечении плоскости $DAEA'$ находят так же, как для одиночного молниеотвода высотой $H_0 \approx AA'$.

Чтобы выяснить, все ли элементы защищаемого здания входят в зону защиты молниеотводов, необходимо построить очертания защитных зон на различных высотах и контуры здания на тех же высотах, в том же масштабе. Накладывая контуры здания на контуры защитных зон, проверяют надежность защитного устройства. При построении этих зон на боковой проекции защитной зоны на принятых заранее высотах проводят линии I , II и т. д., представляющие собой следы от горизонтальных плоскостей. Для основания молниеотводов и для принятых сечении строят защитные зоны в горизонтальной проекции так, как это было показано на рисунке 30.5.

На некоторых сельскохозяйственных объектах целесообразно устанавливать двойной молниеотвод разной высоты (например, на силосной башне и на животноводческом помещении). В этом случае построение защитных зон ведут так, как показано на рисунке 30.7. Для каждого

молниеотвода зону защиты строят отдельно. Затем из вершины низшего молниеотвода *H1* проводят горизонтальную линию до получения точки *A* на защитной зоне молниеотвода *H2*. Расстояние от этой точки до земли рассматривается как некоторый фиктивный молниеотвод, взаимодействующий с молниеотводом *H1*. Участок защиты между ними строят, как было показано на рисунке 30.6.

Зоны защиты многократного стержневого молниеотвода. Многократным стержневым молниеотводом называется группа из трех, четырех и более одиночных стержневых молниеотводов. Такой молниеотвод используют для защиты больших объектов и площадей.

Общую зону защиты определяют путем построения зон защит каждого двух соседних стержневых молниеотводов.

Другие виды молниеотводов. Кроме стержневых, применяют тросовые молниеотводы, состоящие из одного, двух и более параллельных тросов, горизонтально протянутых над защищаемыми объектами. Тросы соединяют между собой и заземляют. В целом подобный молниеотвод значительно сложнее и дороже стержневых и требует больших затрат материалов, но достаточно надежно защищает провода воздушных линий.

Если здание покрыто кровельным железом, молниезащиту целесообразно выполнить путем заземления крыши.

30.3. ПРИМЕРЫ МОЛНИЕЗАЩИТЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Место заземления молниеотводов животноводческих ферм следует удалять от строений, чтобы избежать опасных шаговых напряжений на хорошо проводящих полах внутри построек. Когда животноводческая постройка значительной длины и со сгораемой кровлей, целесообразно избрать вариант с двумя отдельными стержневыми молниеотводами, устанавливаемыми, как показано на рисунке 30.8, вместе с заземлением на расстоянии 4...5 м от стен постройки. Заземлители ограждают, если имеется вероятность попадания животных к местам их установки.

На рисунке 30.8 приведен один из наиболее целесообразных вариантов устройства молниезащиты коровника двумя стержневыми молниеотводами. Аналогичное расположение молниеотводов можно принять и при других размерах построек подобной конфигурации. В каждом отдельном случае следует проверить защитную зону, как это было показано выше.

Другой метод молниезащиты данной постройки — это установка опор молниеотводов вдоль конька крыши с креплением их к стропилам и ригелям перекрытия. В местах прохода стоек через крышу делают фартуки из кровельного железа. Места соприкосновения с опорой промазывают битумом. Расстояние между молниеотводами принимают равным от 20 до 30 м, а высоту их над коньком крыши — от 3 до 6 м, в зависимости от угла наклона и ширины постройки (рис. 30.9). Во всех случаях необходимо проверить защитную зону.

Токоотвод из стальной проволоки диаметром 6 мм выступает над

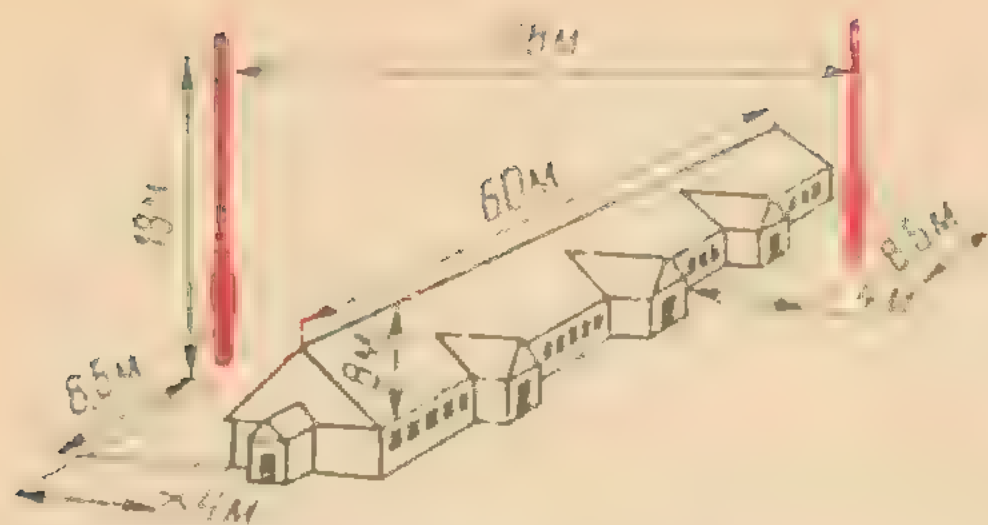


Рис. 30.8. Защита коровника на 50 голов.

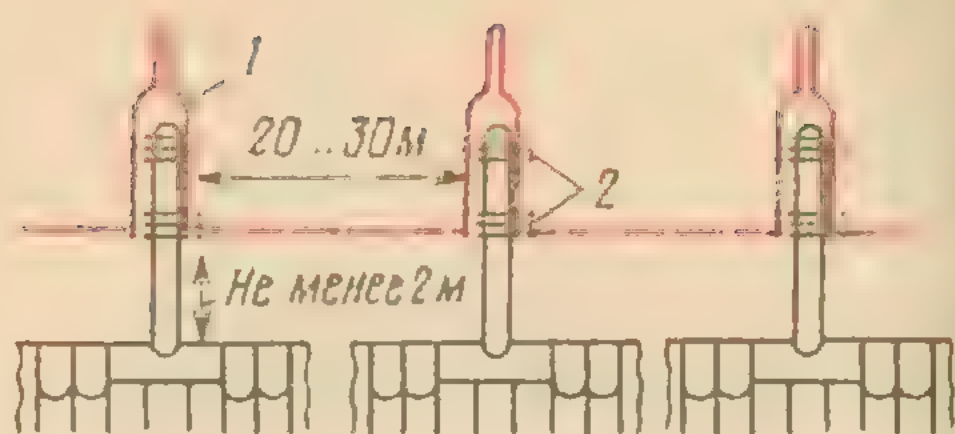


Рис. 30.9. Многократные молниеотводы вдоль крыши:

1 — проволока диаметром 6 мм; 2 — бандаж проволокой диаметром 4...5 мм.

верхушкой опоры на 30 см. На высоте 2 м от конька крыши спуск прикрепляют к опоре вязальной проволокой и перебрасывают на столб высотой 5 м, устанавливаемый в 10 м от здания. По столбу делают спуск к заземлителю. Если на крыше имеются вытяжные вентиляционные трубы, опоры молниеотводов можно крепить к ним. Если постройка имеет Т-образную форму или значительно выступающие тамбуры, надежную защиту могут обеспечить три молниеотвода.

При защите водонапорной башни молниеотвод должен возвышаться на 2,5 м над крышей, а при защите силосной башни — на 2,65 м.

Для защиты производственной мастерской могут быть использованы четыре молниеотвода (по углам здания), а также многократные молниеотводы, проложенные по краю верхней части крыши, возвышающиеся над ней на 3...5 м.

На трубах, которые не попадают в зону защиты этих молниеотводов, устанавливают дополнительные молниеотводы, выступающие на 15...20 см над трубой.

В сильногрозовых районах иногда делают молниезащиту для всего населенного пункта, устанавливая, например, молниеотводы высотой 22 м на расстоянии 400 м друг от друга вдоль линий домов.

Во всех случаях при устройстве молниезащиты в первую очередь нужно уложить заземлители. Молниеотводы и токоотводы после их установки следует немедленно подключить к заземлителям.

30.4. МЕРЫ ПО МОЛНИЕЗАЩИТЕ ПРИ УСТРОЙСТВЕ НАРУЖНЫХ АНТЕНН

Случаи прямого попадания молнии в антенну чрезвычайно редки. В антеннах радиоприемников и телевизоров, имеющих зачастую значительную протяженность и высоту, во время грозы или при сильном сухом ветре индуктируются или накапливаются статические заряды. Для предохранения радиоустройств от повреждения следует устанавливать грозовые переключатели и искроразрядники. При приближении грозы следует прекратить прием и заземлить антенну. Глубина заложения заземлителя 1...1,5 м. Если почва песчаная, заземлитель целесообразно засыпать слоем 10...15 см мелкотолченого древесного угля

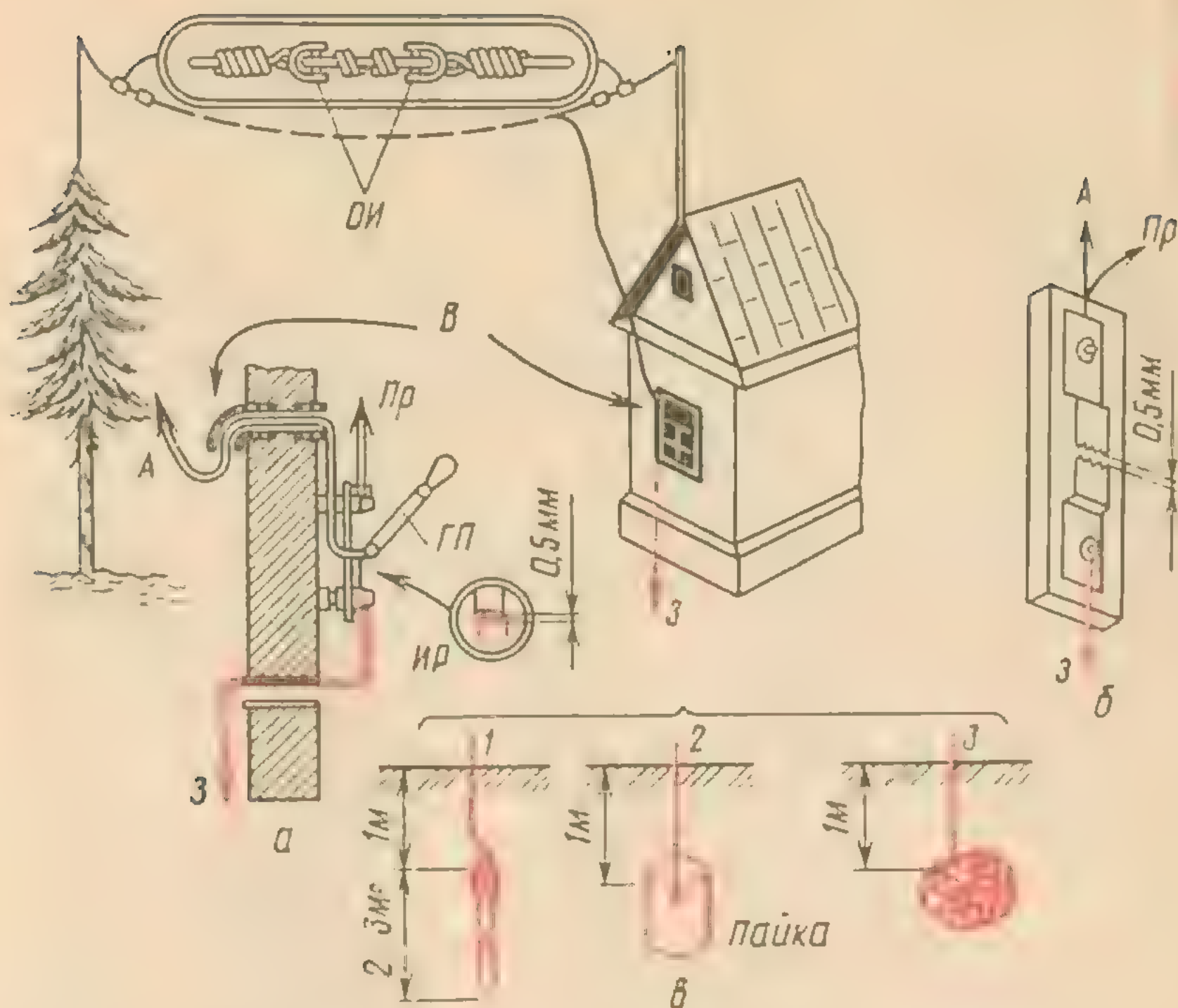


Рис. 30.10. Устройство наружной антенны с грозозащитой:

а — с грозным переключателем ЛП и искроразрядником ИР; б — только с искроразрядником; в — устройство заземления; 1 — труба; 2 — ведро; 3 — моток провода; ОИ — орешковые изоляторы; З — к заземлению; А — к антенне; Пр — к приемнику; В — ввод

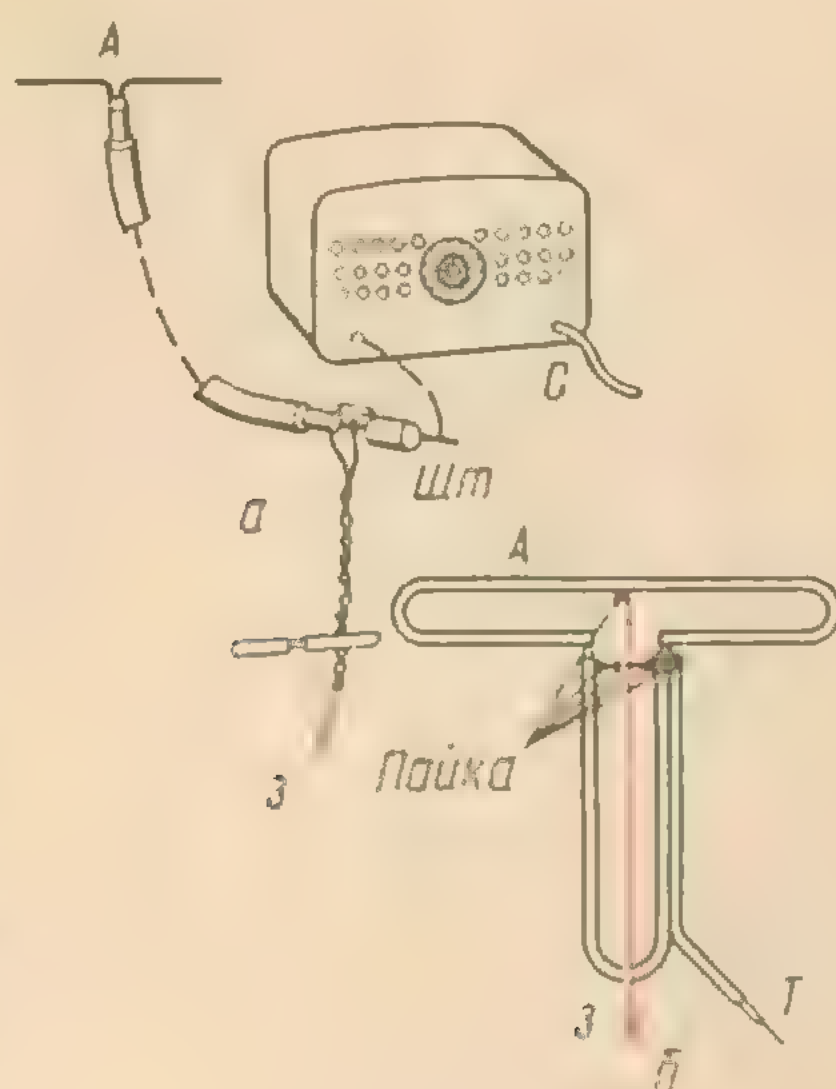


Рис. 30.11. Устройство заземления для телевизионной антенны:

а — на вводе в телевизор; б — на антенне; Т — телевизор; А — антенна; Шт — штеккер, С — сеть; З — заземляющий проводник.

и плотно утрамбовать его. Рекомендуется также увлажнять место заложения заземлителя.

На рисунке 30.10 показаны различные варианты выполнения молниезащиты наружных антенн.

При устройстве антенны необходимо соблюдать следующее правило безопасности: в первую очередь нужно сделать заземление, ввести в помещение ввод антенны, а уже затем можно поднять антенные мачты. Очень опасно, стоя на земле, держать ввод поднятой антенны в руках.

Сетевые приемники в большинстве случаев не нуждаются в присоединении корпуса к заземлению, так как роль заземления частично выполняет сеть. Но в некоторых случаях заземление способствует уменьшению фона переменного тока. Батарейные приемники при наличии заземления работают лучше, чем без него. Однако всегда следует позаботиться о заземлении для антенны на случай грозы.

При устройстве заземления телевизионной антенны (рис. 30.11) к антенному фидеру у приемников подключают двойной провод длиной около 1500 мм для первой программы Центрального телевидения. При разомкнутых противоположных концах эти два провода электрически соединяют в различных точках начиная от концов, для чего изоляцию прорезают и замыкают ножом (рис. 30.11, а). По наибольшей контрастности изображения определяют точку замыкания, в которой провода соединяют и заземляют. Заземляющий проводник можно также отвести от антенны и как показано на рисунке 30.11, б.

30.5. МОЛНИЕЗАЩИТА СЕЛЬСКИХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧ И СЕТЕЙ

Повторное заземление на опорах. Как отмечалось, во время грозы в проводах воздушных линий и сетей образуются атмосферные перенапряжения.

Для уменьшения опасности заносов высоких потенциалов в помещения в сетях с изолированной нейтралью крюки и штыри фазных проводов, устанавливаемые на железобетонных опорах, а также арматура этих опор должны быть заземлены. Сопротивление заземляющего устройства не должно превышать 50 Ом, и в сетях с заземленной нейтралью должно быть выполнено соединение с нулевым заземленным проводом. Заземляющие и зануляющие проводники должны иметь диаметр не менее 6 мм. Крюки и штыри на деревянных опорах заземлению не подлежат, за исключением тех случаев, когда по условиям молниезащиты на опорах имеется повторное заземление. Заземлитель у опоры может быть выполнен протяженным (продолжение спуска молниеотвода стальным проводом диаметром 6 мм) или в виде спирали, которая навита на комель приставки.

Наиболее простая и надежная мера защиты внутренней проводки домов, а значит, и людей от опасности поражения грозовыми разрядами — это приближение точек заземления к домам.

В населенной местности с одно- и двухэтажной застройкой воздушные линии, если они не экранированы дымовыми трубами, деревьями

и высокими зданиями, должны иметь заземляющие устройства, предназначенные для защиты от грозových перенапряжений. Их сопротивление должно быть не менее 30 Ом, а расстояние между ними не более 200 м для районов с числом часов гроз в году более 40. Кроме того, заземляющие устройства должны быть выполнены на опорах с ответвлениями к вводам в помещения с большим числом людей (школы, ясли, больницы и т. п.) и на конечных опорах линий, имеющих ответвления к вводам. Лучше, если каждый ввод в дом находится между двумя заземленными точками, наибольшее расстояние между которыми 100...200 м. Если заземление только с одной стороны от ввода, то расстояние до него не должно превышать 50...80 м.

Со стороны высокого напряжения (6...10 кВ) на подстанциях устанавливают простые искровые промежутки и разрядники.

Защитный (искровой) промежуток (рис. 30.12, а). Это простейшее устройство для защиты высоковольтных электроустановок от атмосферных перенапряжений изготавливают в виде расходящихся в стороны проволок из круглой стали диаметром не менее 10 мм. Искровой разряд, возникший в промежутке под действием волн перенапряжений, способствует их снижению. Дуга по расходящимся проволокам вытесняется кверху, растягивается и гаснет.

Длину искрового промежутка выбирают в зависимости от напряжения и наличия других защитных средств (табл. 30.1).

30.1. Размеры защитных и дополнительных промежутков

Напря- жение <i>U</i> , кВ	Длина защитного проме- жутка на подстанциях, мм		Длина до- полнитель- ного проме- жутка в за- земляющем спуске, мм	Напря- жение <i>U</i> , кВ	Длина защитного проме- жутка на подстанциях, мм		Длина до- полнитель- ного проме- жутка в за- земляющем спуске, мм
	где примене- ны и другие грозозащит- ные аппара- ты	где отсут- ствуют дру- гие грозоза- щитные ап- параты			где примене- ны и другие грозозащит- ные аппара- ты	где отсут- ствуют дру- гие грозоза- щитные ап- параты	
3	20	10	5	10	50	30	15
6	40	20	10	20	180	120	20

В заземляющем спуске делают еще один — дополнительный — промежуток для того, чтобы предотвратить отключение установки при случайных перекрытиях защитного промежутка. Основные недостатки защитных промежутков: 1) отсутствие дугогасительных устройств, что приводит к отключению установки (трансформаторной подстанции) при пробое, и связанная с этим необходимость автоматического повторного включения (АПВ); 2) недостаточная надежность молниезащиты трансформаторов на подстанции.

Вентильные и трубчатые разрядники. Вентильный разрядник — наиболее совершенный тип разрядника — представляет собой совокупность последовательно соединенных искровых промежутков и сопротивлений, в качестве которых используются диски из вилита — материала, сопротивление которого уменьшается при увеличении напряжения. Напри-

мер, вилитовый разрядник на 6 кВ состоит из семи последовательно соединенных искровых промежутков и шести вилитовых дисков, заключенных в герметический фарфоровый кожух. Верхний контакт присоединяется к проводу сети, нижний — к заземлителю.

Волна перенапряжения в этих разрядниках гасится совместным действием искровых промежутков и вилитовых дисков: искровые промежутки пробиваются, сопротивление дисков уменьшается и ток разряда отводится в землю.

Вилитовые разрядники изготавливают для сетей напряжением до 1000 В и высоковольтных (до 220 кВ). По назначению их делят на три типа: стационарные (РВС), для защиты вращающихся машин до 1000 В (РВИ) и на 3...10 кВ (РВРД) и подстанционные (РВП и др.). За буквенным обозначением разрядника следуют цифры, равные его рабочему напряжению, например, разрядники типов РВС-6, РВВМ-3, РВИ-10 соответственно на напряжение 6, 3 и 10 кВ.

Разрядники РВП (вентильные подстанционные) и РВО предназначены для защиты изоляции электрооборудования от атмосферных перенапряжений и применяются в открытых и закрытых электроуста-

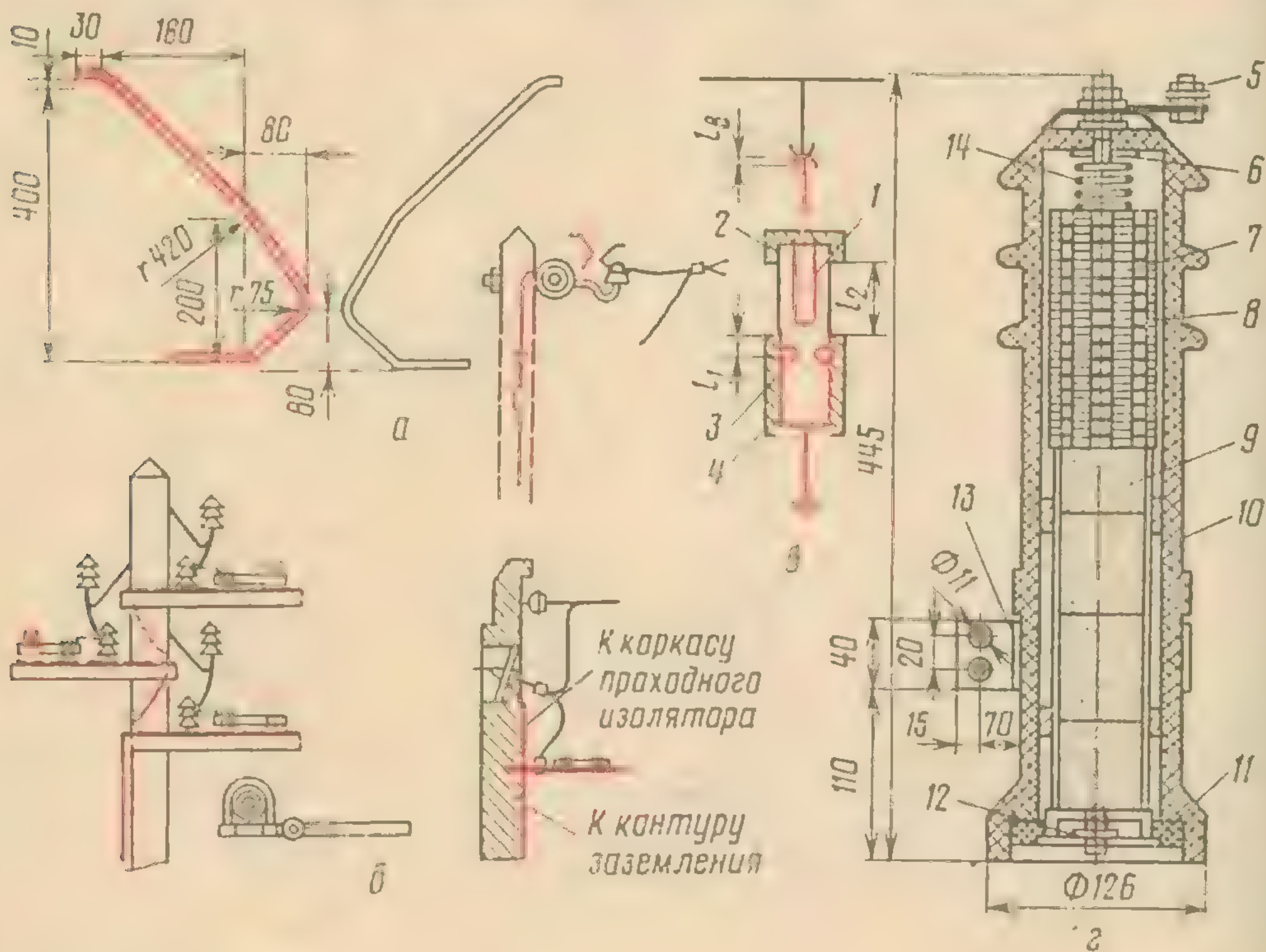


Рис. 30.12. Разрядники:

а — защитный промежуток и установка его на опоре; б — установка трубчатых разрядников на опоре и на вводе в закрытую подстанцию; в — схема включения разрядника; г — разрез разрядника РС-10; l_1 — внутренний искровой промежуток; l_2 — промежуток на внешней поверхности вилитовой трубки; l_3 — внешний искровой промежуток; 1 — стержневой электрод; 2 — закрытый наконечник; 3 — кольцевой электрод; 4 — открытый наконечник; 5 — контакт для подключения фазы сети; 6 и 11 — герметизирующее уплотнение из озоностойкой резины; 7 — многократный искровой промежуток; 8 — бумажно-бакелитовый цилиндр; 9 — рабочее сопротивление; 10 — герметичный фарфоровый кожух; 12 — шпилька для подключения заземления; 13 — хомут для креплений; 14 — спиральная пружина

новках напряжением 3, 6 и 10 кВ. В зависимости от напряжения разрядники имеют то или иное число вилитовых дисков. Пробивное напряжение для указанных разрядников соответственно равно 9...11; 16...19; 26...30 кВ.

Разрядник РС-10 (см. рис. 30.12,з) предназначен для защиты от атмосферных перенапряжений изоляции электрооборудования сельских электрических установок с напряжением 10 кВ и током короткого замыкания от 30 А и выше. Импульсное пробивное напряжение 26...30,5 кВ.

Трубчатый разрядник состоит из внешнего и внутреннего искровых промежутков, соединенных последовательно (рис. 30.12,б и в). Внутренний промежуток расположен в трубке из материала, который выделяет газы под воздействием дуги (фибра у разрядников типа РТФ, винипласт у разрядников типа РТВ). При грозовом разряде искровые промежутки пробиваются, и ток разряда уходит в землю, благодаря чему уровень перенапряжения уменьшается. Одновременно через разрядник идет ток короткого замыкания рабочей частоты. Это приводит к образованию в трубке электрической дуги. Под действием высокой температуры дуги стенки трубки бурно выделяют большое количество

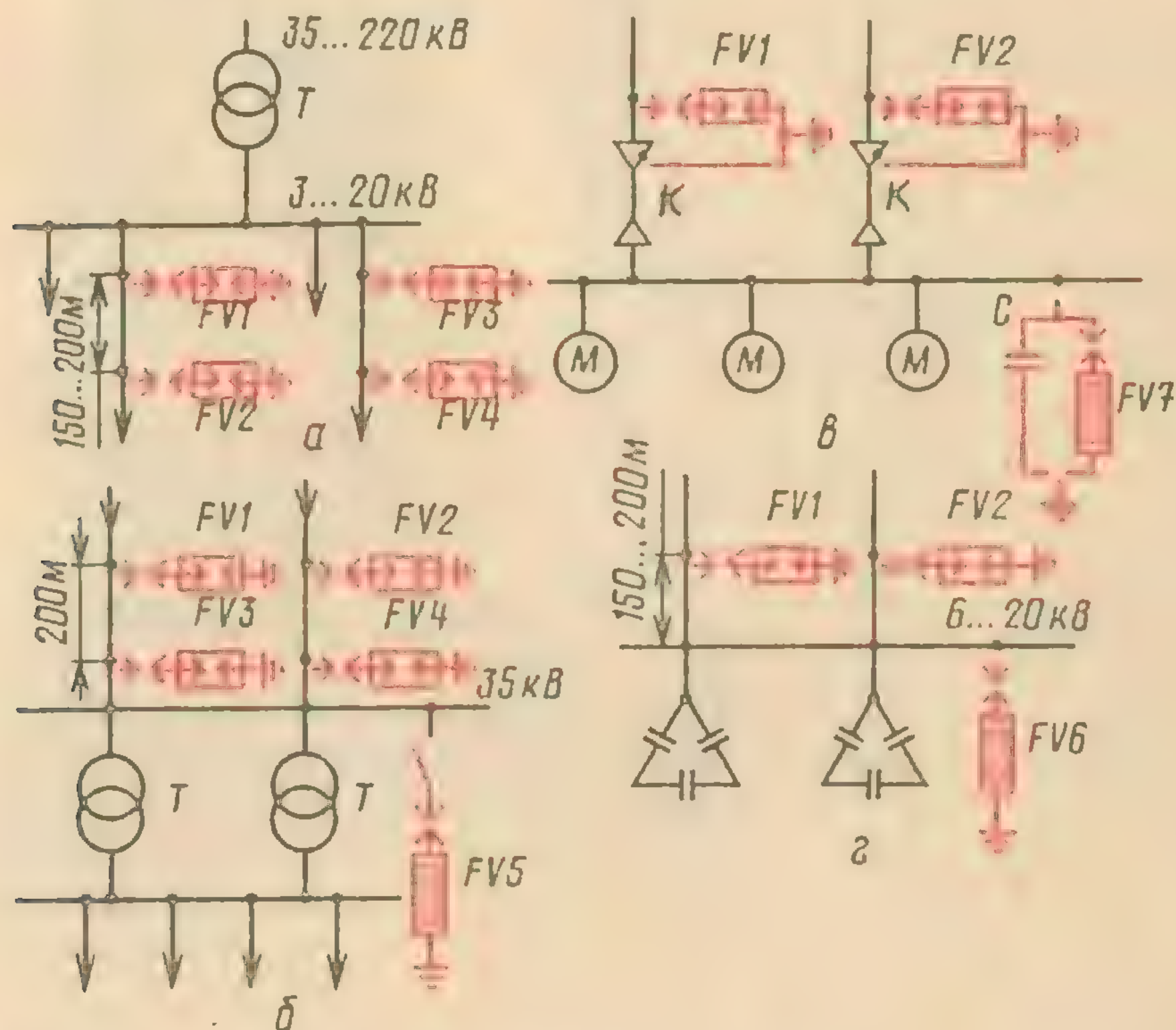


Рис. 30.13. Рекомендуемые схемы молниезащиты на подстанциях:

а — понижающей подстанции с отходящими воздушными линиями на стороне низшего напряжения; б — понижающей подстанции 35/0,4 кВ с глубоким вводом 35 кВ с трансформатором до 560 кВ·А; в — подстанции мощных насосных станций, имеющих электродвигатели на напряжение 3...10 кВ и питающихся непосредственно от воздушных линий; г — подстанции с присоединенными к шинам 6...20 кВ батареями конденсаторов и с вводом воздушными линиями; Т — силовой трансформатор; FV1, FV4 — трубчатый фибробагетитовый разрядник, FV5 — вилитовый разрядник; FV6 — вилитовый стационарный разрядник; FV7 — разрядник для защиты вращающихся машин; С — шунтирующий конденсатор; К — кабельная вставка на входе.

газов, которые вырываются из трубки под большим давлением и выдувают дугу. Дуга гасится в течение 1...2 периодов тока. Внешний искровой промежуток служит для того, чтобы трубка разрядника не находилась под напряжением.

Трубчатые разрядники изготавливают на напряжения до 110 кВ. Они снабжены указателем действия — бронзовой полоской, которая выдувается газами при срабатывании разрядника.

Трубчатые разрядники недолговечны: они выходят из строя обычно после 6...7 коротких замыканий при максимальном токе короткого замыкания, после чего не в состоянии обеспечить нормальную работу электроустановок.

На рисунке 30.13 приведены некоторые схемы грозозащиты пониженных подстанций. На отходящих от подстанции 35...220/3...20 кВ фидерах низшего напряжения устанавливают разрядники типа РТФ или РТВ (на вводах и подстанцию и дополнительно на расстоянии 3...4 пролетов от вводов); у шин подстанции располагают разрядники типов РВ, РВС.

Схема молниезащиты мощной насосной станции, где электродвигатели включаются на высокое напряжение (3...10 кВ), приведена на рисунке 30.13, в. Здесь на вводах питающих линий установлены трубчатые разрядники типа РТФ, а на шинах, к которым подключены электродвигатели, — вентильные разрядники типов РВВМ, РВН и РВРД. Разрядниками должны быть также защищены конденсаторные батареи, которые размещены у шин высокого напряжения и служат для компенсации коэффициента мощности (рис. 30.13, г).

30.6. ЭКСПЛУАТАЦИЯ МОЛНИЕЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ

Вентильные и трубчатые разрядники нуждаются в тщательном надзоре и контроле. Ежегодно следует проводить их ревизию.

Вентильные разрядники рекомендуется ежемесячно осматривать, обращая внимание в первую очередь на целостность фарфоровых чехлов, которые необходимо систематически очищать от загрязнения. Металлические части должны быть защищены от коррозии. Основной контроль за состоянием разрядника заключается в ежегодном измерении токов проводимости при постоянном напряжении на специально оборудованном стенде. Все мероприятия по эксплуатации вентильных разрядников проводят согласно «Инструкции по монтажу, профилактике и ревизии вентильных разрядников».

Трубчатые разрядники осматривают при каждом обходе линии, обращая внимание на положение индикатора срабатывания. Если он сработал, то тщательно осматривают в бинокль, нет ли следов повреждения на трубке, арматуре, изоляторах, траверсе опоры, не разрегулировался ли искровой промежуток. Случаи срабатывания разрядников регистрируют в специальном журнале. При обнаружении неисправности разрядник заменяют новым.

В конце грозового сезона проводят верховую ревизию разрядников РТФ и РТВ, покрытых атмосферостойким лаком. Разрядники, имеющие видимые повреждения, отправляют в ремонт. Достаточным признаком

для отбраковки является наличие даже мельчайших трещин, потемнения или сморщивания лаковой пленки. Для предотвращения возможного повреждения при снегопадах разрядник поворачивают так, чтобы расстояние от проводов до электрода разрядника было не меньше 0,3 м при напряжении сети 3...10 кВ.

Перед началом грозового сезона проводят основную ревизию разрядников. Их снимают и осматривают на земле, проверяют дугогасящий канал и внутренний искровой промежуток (специальным щупом). Вывинчивают и обследуют стержневой электрод.

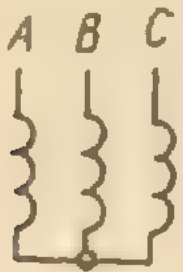
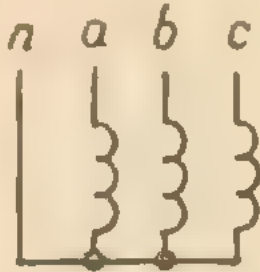
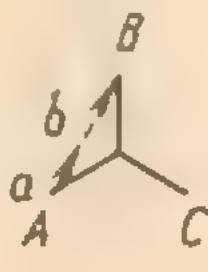
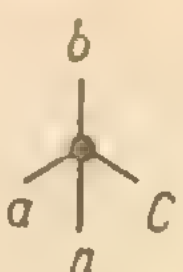
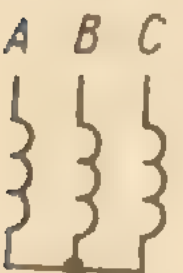
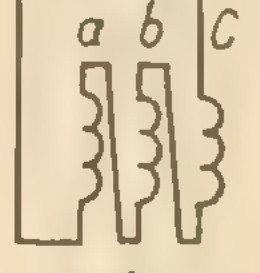
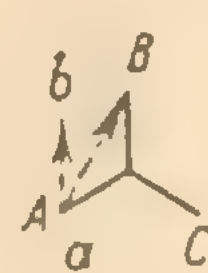
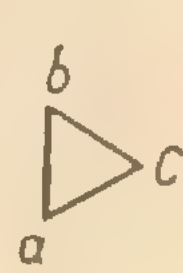
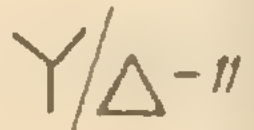
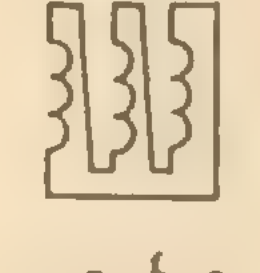
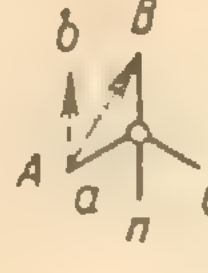
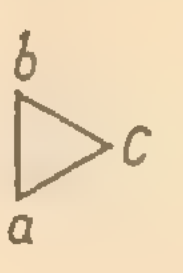
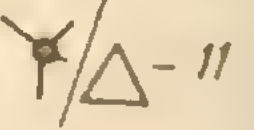
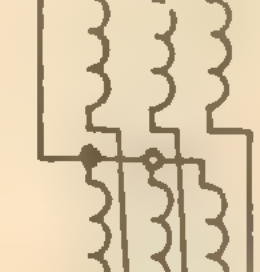
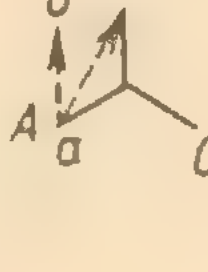
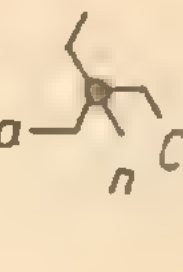
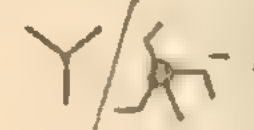
Периодическим осмотрам должны подвергаться и молниеотводы, защищающие постройки и здания. Перед началом грозового сезона проводят ревизию, в которую входит проверка целостности всех гокоотводов (внешний осмотр). Проверяют надежность соединений гокоотводов и их крепление. Если верхняя часть молниеприемника выгорела и укоротилась, его следует восстановить до начальных размеров, соединив новый кусок стержня, трубы или катанки.

Необходимо проверить также состояние частей деревянных опор, которые подвержены гниению. При загнивании опоры на 30...40% по площади сечения опору нужно заменить новой или укрепить приставками.

Состояние заземлителей проверяют не реже одного раза в 2 года путем измерения сопротивления растеканию способами, указанными выше. Если сопротивление растеканию увеличилось на 20% по сравнению с допустимым, нужно уложить новые заземлители.

Контрольные вопросы и задания к главе 30. 1. Что такое атмосферные перенапряжения и когда они возникают в сетях? 2. Объясните по рисунку, как возникает опасность для человека и животных при попадании молнии в дерево? 3. Как выполняется молниеотвод? 4. Как измерить сопротивление растеканию заземлителя с помощью вольтметра и амперметра? 5. Как найти графически защитную зону молниеотвода? 6. Как выполнить молниезащитное заземление и установить молниеотводы на протяженном здании коровника? 7. Какие необходимы меры по защите от грозовых разрядов наружных антенн? 8. Расскажите об устройстве разрядников. 9. Покажите на схеме, где следует устанавливать разрядники на подстанциях. 10. Расскажите о мероприятиях по обслуживанию разрядников.

Приложение 1. СХЕМЫ СОЕДИНЕНИЯ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРОВ

Схемы соединений		Векторные диаграммы		Условные обозначения
ВН	НН	ВН	НН	
				
				
				
				

Приложение 2. ТРАНСФОРМАТОРЫ СИЛОВЫЕ МАСЛЯНЫЕ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ ТРЕХФАЗНЫЕ ДВУХ- И ТРЕХОБМОТОЧНЫЕ С ОХЛАЖДЕНИЕМ ЕСТЕСТВЕННЫМ МАСЛЯНЫМ (М), МАСЛЯНЫЕ С ДУТЬЕМ И ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ЦИРКУЛЯЦИЕЙ МАСЛА (ДЦ) КЛАССОВ НАПРЯЖЕНИЯ 10, 35, 110 И 220 кВ

Типоразмер	$u_k, \% U_n$	Потери, кВт		$i_0, \% I_n$	Масса, т		Размеры, м		
		ХХ	КЗ		полная	чистая	H	L	B
Двухобмоточные 10 и 35 кВ (ГОСТ 12022-76)									
ТМ-25/10	4,5	0,13	0,6	3,2	0,38	0,13	1,22	1,12	0,46
ТМ-40/10	4,5	0,19	0,88	3	0,48	0,16	1,27	1,12	0,48
ТМ-63/10	4,5	0,26	1,28	2,8	0,6	0,17	1,4	1,12	0,8
ТМ-100/10	4,5	0,36	1,97	2,6	0,72	0,21	1,47	1,2	0,8
ТМ-160/10	4,5	0,56	2,65	2,4	1,1	0,27	1,6	1,22	1,02
ТМ-250/10	4,5	0,82	3,7	2,3	1,42	0,32	1,76	1,31	1,05
ТМ-400/10	4,5	1,05	5,5	2,1	1,9	0,4	1,9	1,4	1,08
ТМ-630/10	5,5	1,56	7,6	2	3	0,52	2,15	1,75	1,27
ТМ-100/35	6,5	0,46	1,97	2,6	1,3	0,48	2,2	1,33	0,9
ТМ-160/35	6,5	0,7	2,65	2,4	1,7	0,5	2,26	1,4	1
ТМ-250/35	6,5	1	3,7	2,3	2	0,65	2,32	1,5	1,25
ТМ-400/35	6,5	1,35	5,5	2,1	2,7	0,85	2,50	1,65	1,35
ТМ-630/35	6,5	1,9	7,6	2	3,5	1,05	2,75	2,1	1,45
Двухобмоточные 10 и 35 кВ (ГОСТ 11920-73Е)									
ТМ-1000/10	5,5	2,45	12,2	1,4	5	1,1	3	2,7	1,75
ТМ-1600/10	5,5	3,3	18	1,3	7	2,43	3,4	2,45	2,3
ТМ-2500/10	5,5	4,6	25	1	8	2,2	3,6	3,5	2,26
ТМ-4000/10	6,5	6,4	33,5	0,9	13,2	4,1	3,9	3,9	3,65
ТМ-6300/10	6,5	9	46,5	0,8	17,3	4,9	4,05	4,3	3,7
ТМ-1000/35	6,5	2,75	12,2	1,5	6	2,02	3,15	2,7	1,57
ТМ-1600/35	6,5	3,65	18	1,4	7,1	2,43	3,4	2,65	2,3
ТМ-2500/35	6,5	5,1	25	1,1	9,6	2,5	3,8	3,8	2,45
ТМ-4000/35	7,5	6,7	33,5	1	13,2	4,1	3,9	3,9	3,65
ТМ-6300/35	7,5	9,40	46,50	0,9	16,2	4,8	4,05	4,3	3,7
ТД-10000/35	7,5	14,25	65	0,8	21,8	5,2	4,35	3	3,76
ТД-16000/35	8	21	90	0,6	31,3	8,2	4,86	3,95	3,97
ТД-40000/35	8,5	36	165	0,4	52,3	—	5,7	5,3	4,4
ТДЦ-80000/35	9,5	60	280	0,3	78,6	11,9	6,1	5,95	4,55
Двухобмоточные для СН электростанций (ГОСТ 11920-73Е)									
ТДНС-10000/35	8	12,5	60	0,6	28,8	8,9	5	5,4	3
ТДНС-16000/35	10	18	85	0,55	35,8	10,7	5,2	6,1	3,1
ТДНС-25000/35	ВН—НН 9,5; НН ₁ —НН ₂ не менее 15	25	115	0,5	55	15,3	5,3	6,6	4,3
ТДНС-32000/35	ВН—НН 11,5; НН ₁ —НН ₂ не менее 20	30	145	0,45	61	15,2	5,3	6,6	4,3
ТДНС-40000/35	То же	36	170	0,4	70	15,3	5,5	6,8	4,5
ТДНС-63000/35	»	50	250	0,35	91	22,5	6,1	7	4,6
Трехобмоточные 35 кВ (ГОСТ 11920-73Е)									
ТМТН-6300/35	—	12	55	1,2	26,5	7,28	4,5	5,2	4,3
ТДТН-10000/35	—	19	75	1	35	9,85	5,2	6	4,3
ТДТН-16000/35	—	28	115	0,95	47	12,63	5,5	6,5	4,5

Приложение 3. ТИПОРАЗМЕР И МОЩНОСТИ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРО- ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ДО 400 кВт

Типоразмер	P_n (кВт) при n_n , мин ⁻¹				Масса, кг (группа М1001)
	3000	1500	1000	750	

Серии 4АН в исполнении IP23

4АН160S	22	18,5	—	—	112
4АН160M	30	22	—	—	132
4АН180S	37	30	18,5	15	170
4АН180M	45	37	22	18,5	186
4АН200M	55	45	30	22	260
4АН200L	75	55	37	30	295
4АН225M	90	75	45	37	355
4АН250S	110	90	55	45	450
4АН250M	132	110	75	55	500
4АН280S	160	132	90	75	715
4АН280M	200	160	110	90	825
4АН315S	—	200	132	110	860
4АН315M	250	250	160	132	940
4АН355S	315	315	200	160	1200
4АН355M	400	400	250	200	1350

Серии 4А в исполнении IP44

4А56А	0,18	0,12	—	—	4,5
4А56В	0,25	0,18	—	—	4,5
4А63А	0,37	0,25	0,18	—	6,3
4А63В	0,55	0,37	0,25	—	6,3
4А71А	0,75	0,55	0,37	—	15,1
4А71В	1,1	0,75	0,55	0,25	15,1
4А80А	1,5	1,1	0,75	0,37	17,4
4А80В	2,2	1,5	1,1	0,55	20,4
4А90L	3	2,2	1,5	0,75	28,7
4А90L	—	—	—	1,1	28,7
4А100S	4	3	—	—	36
4А100L	5,5	4	2,2	1,5	42
4А112M	7,5	5,5	3	2,2	56
4А112M	—	—	4	3	56
4А132S	—	7,5	5,5	4	77
4А132M	11	11	7,5	5,5	93

Типоразмер	P_H (кВт) при n_n , мин ⁻¹				Масса, кг (группа IM1001)
	3000	1500	1000	750	
4A160S	15	15	11	7,5	132
4A160M	18,5	18,5	15	11	155
4A180S	22	22	—	—	170
4A180M	30	30	18,5	15	185
4A200M	37	37	22	18,5	255
4A200L	45	45	30	22	285
4A225M	55	55	37	30	380
4A250S	75	75	45	37	475
4A250M	90	90	55	45	515
4A280S	110	110	75	55	810
4A280M	132	132	90	75	870
4A315S	160	160	110	90	1000
4A315M	200	200	132	110	1100
4A355S	250	250	160	132	1420
4A355M	315	315	200	160	1670

Приложение 4. ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ МАГНИТНЫХ ПУСКАТЕЛЕЙ СЕРИИ ПМЛ,
ПМС и ПМА

Электромагнитные пускатели серии ПМЛ

Величина пускателя	I_H , А	I_H — рабочий ток контактов главной цепи пускателя в продолжительном и прерывисто-продолжительном режимах работы (А) при напряжении, В		Размеры, мм	Масса, кг
		380 и 500	660		
1	10	10	4	44×73,8×67	0,32
2	25	25	16	56×89,1×77	0,53
3	40	40	25	—	1,22
4	63	63	40	—	1,28
5	80	80	50	135×155×141	3,5
6	125	125	60	156×167×141	4,6
7	200	200	120	200×167×162	6,6

Примечания. 1. Для пускателей с тепловыми реле I_H — рабочий ток — определяется выбранной уставкой тока несрабатывания их тепловых элементов.

2. Исполнения по степени защиты IP00 и IP54.

3. Все пускатели в исполнении IP00 не имеют встроенных тепловых реле

Магнитные пускатели серии ПМС
(для эл. дв. серии 4А)

Величина пускателя	I_H , А	Наибольшая P_H (кВт) эл. дв. при 380 В	Размеры, мм
1	10	4	—
2	25	10	200×205×155
3	40	18,5	200×205×155
4	63	30	235×280×145
5	100	45	260×270×182
6	160	75	270×308×205

Примечания. 1. Масса не более 2,26 кг.

2. Размеры и масса приведены для реверсивных пускателей.

Электромагнитные пускатели серии ПМА

Величина пускателя	I_H , А	Наибольшая мощность, (кВт) эл.дв. с короткозамкнутым ротором при U_H , В					Размеры, мм	Масса, кг
		220	380	440	500	660		
3	40	11,5	18,5	22	22	22	250×175(210×315)	6,6...6,9
4	63	18,5	30	30	37	30	339×197×363	6,3...16,5
5	100	30	45	50	55	55	430×227×463	18,5...25,5
6	160	40	75	75	100	75	457×263×555	23...25

- Примечания 1. Исполнения по степени защиты: IP00, IP40 и IP54.
 2. Климатическое исполнение: У, УХЛ; категория размещения: 2 и 3 (У), 3 и 4 (УХЛ).
 3. Размеры и масса приведены для реверсивных пускателей.

Приложение 5. ОСНОВНЫЕ ДАННЫЕ АВТОМАТИЧЕСКИХ ВЫКЛЮЧАТЕЛЕЙ СЕРИЙ АП50Б, АК50

Автоматические выключатели серии АП50Б (двух- и трехполюсные)

Исполнение	I_H расцепителя в каждом исполнении выключателя, А	$I_{доп}$ КЗ при				
		пост. токе 220 В и постоянной времени цепи 0,01 с $\pm$ 0,005 максим. значение, А*	перем. токе и $\cos\varphi = 0,45\pm0,05$			
			380 В		500 В	
			Амплитуда ударного тока, А	Действующее значение тока, А	Амплитуда ударного тока, А,	Действующее значение тока, А
ЗМТ	1,6	500	500	300	500	300
ЗМ	2,5	2000	700	400	700	400
2МЗТН	4	1000	1000	600	1000	600
2МН	6,3	1400	1400	800	1400	800
2МЗТО	10	2500	3400	2000	2550	1500
	16	2500	3400	2000	2550	1500
ЗМЗТД	25	2500	5100	3000	6000	3500
	40	2500	8500	5000	6000	3500
	50	2500	8500	5000	6000	3500
	63	4000	10000	6000	6000	3500

* При разрыве цепи двумя полюсами.

Примечания 1. В обозначении: М — наличие в расцепителе электромагнитного элемента, мгновенно действующего при токе КЗ; Т — наличие теплового элемента, действующего при перегрузках с обратной зависимостью от тока выдержкой времени; О — наличие расцепителя максимального тока в нулевом проводе; Н — наличие расцепителя минимального напряжения; Д — наличие расцепителя дистанционного (независимого); цифры означают, какое число указанных непосредственно после них элементов всего имеется в выключателе данного типа, причем 1 в обозначении не ставится и только в обозначении 3МТ цифра 3 относится как к элементу М, так и к элементу Т.

2. Масса выключателя двухполюсного 1 кг, трехполюсного 1,3 кг; в металлической оболочке 3,5 кг.

3. Климатическое исполнение: У3 и ХЛ5.

4. Основная область применения та же, что и для выключателей А3100.

Автоматические выключатели АК50

Исполнение	Род тока	I_H расцепителя, А	Установка тока мгновенного срабатывания — кратность I_H при	
			пост. токе	перем. токе
2МГ (2М)	Пост. и переменный, 50 Гц	0,6...50	5	5; 10
3МГ (3М)	Переменный, 50 Гц	0,6...50	—	5; 10

Примечания. 1, 2, 3 — число полюсов; М — электромагнитный расцепитель для защиты от КЗ; МГ — то же, с гидравлическим замедлением.

2. Масса двухполюсных IP30 — 0,9 кг, трехполюсных IP30 — 1,2 кг, двух- и трехполюсных IP54 — 4,3 кг.

Автоматические выключатели следует применять в случаях:
 необходимости автоматизации управления (АПВ, АВР и т. п.);
 необходимости обеспечения более быстрого по сравнению с плавкими предохранителями восстановления питания и если при этом не имеют решающего значения вероятность неселективных отключений и отсутствие эффекта ограничения тока КЗ; частых аварийных отключений (испытательные, лабораторные и т. п. установки).
 В остальных случаях рекомендуется применять плавкие предохранители.

Для установок с расчетными токами до 630 А включительно применяются «установочные» выключатели: АЗ100, АЗ700, АЕ2000, АП50 и т. п.

Мощные, более тяжелые и дорогие выключатели подстанционного типа — «Электрон», АЗ700 габарита 630 А и более, АВМ и т. п. — применяются в РУ подстанций (СИ 357—77).

УКАЗАТЕЛЬ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимцев Ю. И., Веялис Б. С. Электроснабжение сельского хозяйства. — М.: Колос, 1983.
2. Белехов И. П., Четкин А. С. Механизация и электрификация животноводства. — М.: Колос, 1984.
3. Белянчиков Н. Н., Смирнов А. И. Механизация животноводства. — М.: Колос, 1983.
4. Гладков И. К., Белехов И. П. Монтаж машин и оборудования животноводческих ферм и комплексов. — М.: Высшая школа, 1984.
5. Глебович А. А., Шичков Л. П. Электрооборудование машин и электропривод. — М.: Колос, 1984.
6. Гордон С. В. Инструмент сельского электрика. — М.: Колос, 1982.
7. Грундулис А. О. Защита электродвигателей в сельском хозяйстве. — М.: Колос, 1982.
8. Изаков Ф. Я., Быков Н. М., Леонтьев П. И. Механизация и электрификация птицеводства. — М.: Колос, 1982.
9. Луковников А. В. Охрана труда. — М.: Колос, 1984.
10. Лямцов А. К., Тищенко Г. А. Электроосветительные и облучательные установки. — М.: Колос, 1983.
11. Мжельский Н. И., Смирнов А. И. Справочник по механизации животноводческих ферм и комплексов. — М.: Колос, 1984.
12. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей и Правила техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей. — М.: Атомиздат, 1975.
13. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). — М.: Энергоатомиздат, 1985.
14. Симонювский С. Ф. Защита сельских электрических сетей от коротких замыканий и перегрузок. — М.: Колос, 1983.
15. Эксплуатация и ремонт электроустановок / Пястолов А. А., Вахрамеев А. Л., Ермолаев С. А. и др. — М.: Колос, 1984.

АЛФАВИТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

Аварийные перегрузки трансформаторов 133

Аварийные режимы в сетях 162

Автоматические выключатели 176...178

Автоматическое повторное включение 195
— регулирование возбуждения 123

Автотрансформатор 129

Аккумуляторы 32

Активное сопротивление 19, 20

Ампер 9

Ампер-витки 44

Амперметр, схемы включения, устройство 151

Амплитуда электрической величины

Анионы 29

Анод 9

Аппаратура управления 107

Ареометр 34

Арматура осветительная 243, 350

Асинхронная муфта скольжения 271

Асинхронный генератор 269

Астатические приборы 144

Атом 5

Атомная батарея 41

Бактерицидные лампы 368

Батареи гальванических элементов 32

Бифилярная намотка 59

Блокировка 473

Ватт 9, 27

Вектор 62, 63

Векторная диаграмма 62, 69

Вентили 293

Взаимозакранирование заземлителей 258

Вихревые токи 59

Внешнее и внутреннее сопротивления 17, 18

Возбудитель 107

Возбуждение от механических и полупроводниковых выпрямителей 116

Воздушно-цинковые элементы и генераторы 38

Воздушный конденсатор 13

Вольт 9

Вольтметр, устройство, схемы включения 150

Вращающий момент электродвигателя 150

Временная диаграмма 72

Выключатели автоматические высоковольтные 192...195

— нагрузки 191

— элегазовые 194

Выпрямление переменного тока 293

Высоковольтные предохранители 196

Газы 7

Газоразрядные лампы 8

Галетные батареи 30...32

Гальванические элементы 30, 31

Гальванотехника 29

Генератор 60, 93, 107

— автомобильный 285

— асинхронный 269

— постоянного тока 274

— синхронный 94, 115

— основные параметры 117

Германий 40

Гистерезис 47

Гистерезисный двигатель 280

Графики нагрузки 112...113

Гремучий газ 35

Грозовой разряд 15

Грунт, удельное сопротивление 463

Группы квалификационные 403

Группы соединений обмоток трансформаторов 139

Датчики в схемах автоматического управления 332...336

Двигатель асинхронный 248...253, 412

— коллекторный 272...275, 416

— конденсаторный 264

— многоскоростной 250, 266...268

— однофазный 263

— синхронный 279

— стартерный 277

— с фазным ротором 258, 326

Двигатель-генератор 281

Действующее значение синусоидального тока и напряжения 64, 65

Джоуль 9, 27

Диамagnetика 46

Диоды 289, 290

Диссоциация молекул 6

Диэлектрики 6

Диэлектрическая проницаемость 11

Длительные перегрузки трансформаторов 133

Дроссель 76

Дугогасительные камеры 170, 191

Единая серия электродвигателей 251
Единицы измерения электрических величин 8, 9
Емкостной ток 78
Естественный магнит 42

Железоникелевые аккумуляторы 33

Заземление 16, 454...462
— сопротивление растеканию 458
Заземляющее устройство (контур) 457
Закон Ома 17, 49, 66, 70, 73, 82
— Кулона 11, 42
Замыкание на землю 162
Запуление 459
Заряд аккумулятора 34
Защита электродвигателей 420...422
Защитное отключение 473
Защитные средства индивидуальные 471, 472
Зуммер 56

Измерительные приборы 141
— обозначение на шкалах 147, 148
— трансформаторы тока 155
— — напряжения 156
Изоляторы 6, 211
Изоляция, классы 310
Индуктивное сопротивление 70
Индуктивность катушки 58, 59
Индуктор 271...273
Индукционный аппарат 50, 57
Инфракрасные излучения, применение 374
Ионизаторы 8
Ионы, ионизация 6, 28, 29, 377
Искрогасительные камеры 170
Искусственное дыхание 474, 475
Испытания электрооборудования 404...407
Источник энергии 17
— энергоснабжения 105
Истребитель высоковольтный (насекомых) 361

Кабели 213
Кадмиево-никелевые аккумуляторы 32
Катионы 29
Катод 29
Киловатт 27
Кирхгофа первый закон 20
— второй закон 21
Кислотные аккумуляторы 33...35
Климатические районы 207
Командо-контроллер 328
Коммутационная аппаратура, требования 170
Компаундирование возбуждения 125
Компенсация реактивной мощности 89, 90, 279, 451
Комплектные распределительные устройства 198...201
— станции управления 188

— трансформаторные подстанции 203, 204
Конденсаторы 12, 14, 266
Кондиционер 388
Контактный термометр 333
Корона 8
Коронный разряд 390, 391
Короткое замыкание 18, 201
— виды 162...164
— расчет тока 166
Коэффициент загрузки 138
— заполнения графика 113
— мощности 75, 260
— полезного действия 28, 260
— — — усилителя 301
— реактивной мощности 92
— спроса 442, 444
— трансформации 131
Кулон 11

Лампы дуговые ртутные люминесцентные 348
— ксеноновые 349
— люминесцентные 344, 345
— металлогалогенные 349
— накаливания 340...342
— натриевые 349
— ртутно-кварцевые 365
Логометры 159
Люксметр 40
Люминесцентный анализ 372

Магазины сопротивлений 25
Магнето 288
Магнетодиэлектрики 48
Магнитная индукция 44
— проницаемость 44
— цепь 49, 50
Магнитное насыщение 47
— поле 42
Магнитные пускатели 179, 180
— свойства материалов 42
Магнитный поток 45
— усилитель 77
Магнитомягкие материалы 48
Магнитотвердые материалы 48
Масляные выключатели 192...194
Машины асинхронные 248...271
— постоянного тока 275
— синхронные 115, 279
Мегомметры 160
Мгновенное значение тока (ЭДС) 62
Металлокерамика 170
Металлы 6
Механическая прочность проводов 208, 230
Механические характеристики электропривода 307, 309
Микроэлектроника 302, 303
Молекула 6
Молниезащита 477, 490
Молниеотвод 479
Молния 479

Монтаж проводов 235...242
Мощность в цепи постоянного тока 27
— активная 66, 75, 87
— мгновенная 67, 81
— полная 75, 87
— номинальная 117, 131
— рассеивания 24
— реактивная 70, 75, 87
— трехфазного тока 101
Мультивибратор 301

Нагрев двигателей 309, 310
— проводов 23, 217
Нагрузка генератора 118
— двигателя 310
— трансформатора 133
Нагрузочная вилка 37
Намагниченность среды 47
Напряжение источника 17, 19
— короткого замыкания трансформатора 137
— линейное 97
— номинальное 106, 117
— определение 11
— прикосновения 455
— фазное 97
— шаговое 97
Напряженность магнитного поля 44, 46
— электрического поля 11
Настройка защиты электродвигателей 420...426
Неисправности электродвигателей 415
Нейтраль 97
Нейтрон 6
Непроволочные реостаты 24
Нулевой провод 213
Нелинейные элементы 25

Однофазный трансформатор 127
— асинхронный электродвигатель 263
— преобразователь 263
Оконцевание проводов 233
Ом 9
Опоры и их типовые конструкции 209, 210
Освещение, виды и системы 358
— в птичниках 362
— в теплицах 363, 449, 450
Освещенность 339
Остаточный магнетизм 47, 116
Осциллографы 162
Отделители 196
Отклонение напряжения 220...222
Относительная диэлектрическая проницаемость 11, 15
— магнитная проницаемость 45

Падение напряжения 218
Пакетные выключатели 175
Параллельная работа генераторов 117...120
— — трансформаторов 140

Параллельное соединение 19, 20
Парамагнетики 45
Паспорт электродвигателя 251
Передающие механизмы 313...315
Переключатели 173
Перемагничивание 47
Переменный ток, однофазные цепи, трехфазные цепи 60, 95, 96
Перенапряжения атмосферные 477
Переходный процесс 164, 165
Период колебания 60, 61
Периодический ток 60
Плазменные вставки предохранителей 185, 196, 421
Поверхностный эффект 67
Подстанции маточные 203
— выбор местоположения 206
— комплектные 203, 204
Полупроводники 7, 290
— электронные и дырочные 7
Полюса магнита 42
Поляризация 6, 31
Помощь пострадавшему от тока 474...476
Последовательное соединение резисторов 19, 20
Постоянный ток 17
Потенциал поля 11
— Земли 11
Потенциометр 25
Потеря напряжения 17, 218
Правило левой руки 51
— правой руки 53, 61
— Ленца 54, 68, 131
Предохранители 184, 196
Преобразователь частоты асинхронный 282
Приводы к разъединителям 191
— к выключателям нагрузки 192
— к автоматическим выключателям 195
Приемник энергии 17
Провода для внутренних проводов 214...216
— для воздушных сетей 213
Пробивное напряжение 15
Пробой диэлектрика 14
Проводники второго рода, первого рода 6
Проволочные резисторы 24
Прожектор 352, 353
Пульсирующий ток 60, 114
Пускатели нажимные 174
Пусковые реостаты 258, 275
Пусковая обмотка 263

Радиоактивное излучение 375
Разность потенциалов 11
Разрядники 207
Разряды тлеющий, искровой, коронный, дуговой 8
Разъединители 191
Распределительные сети 106

Распределительные устройства 107, 189, 198...200
 Расчет сопротивлений 22
 Реверсивные пускатели 181, 325
 Реактивный ток 68, 80, 87
 — двигатель 280
 Реактор 167
 Регулятор вибрационный 125
 Регуляторы напряжения 124, 125
 Резистор 20
 Резонанс напряжений 84
 — токов 84
 Режимы работы электродвигателя 311
 — — —, опрокидывание 436
 Реле 180...184
 Реостаты 24, 124, 125
 Ротор 93
 Рубильники 173

 Самовозбуждение 116
 Самоиндукция 55, 67
 Самосинхронизация 121
 Светильники 352
 Световой поток 337
 Светоотдача 339
 Свинцовые аккумуляторы 32
 Себестоимость энергии 115
 Секционирование 196
 Серебряно-цинковые аккумуляторы 32
 Синхронизация 118
 Синхроноскоп 119
 Синхронный генератор 115
 — двигатель 279
 — компенсатор 125, 279
 Соединитель проводов 233, 234
 Соединение трехфазных обмоток звездой и треугольником 97...99
 Солнечные батареи 40
 Сопротивление активное 19, 20, 66, 72
 — емкостное 80
 — изоляции 406, 407
 — индуктивное 70
 — полное 73, 83
 — реактивное 70, 80, 84
 — растеканию тока 458, 463
 — тела человека 460
 Спектр света 337, 338
 Среднее значение синусоидального тока 64, 65
 Среднеквадратичное значение тока 65
 Средства индивидуальной защиты 471
 Статический заряд 10, 11
 Статическое электричество 15, 16
 — полезное применение 16
 Статор 93
 Степень защиты аппаратов 171, 172
 Ступенчатый реостат 24
 Схемы электрических соединений 107
 — монтажные 109, 324
 — однолинейные 108
 — принципиальные, трехлинейные 108

Сульфатация 35
 Счетчик электрической энергии, 144, 151...153

 Тариф на электроэнергию 92
 Температурный коэффициент сопротивления 23
 Тепловое действие тока 27
 — реле 180, 423
 Тепловые насосы 386, 387
 Теплоэлектростанция 109
 Теплоэлектроцентраль 110
 Термисторы 24, 304
 Термопара 39, 40
 Термосопротивление 24
 Термоэлектрогенераторы 38
 Тиристоры 295, 296
 Токи прямой, обратной и нулевой последовательности 102, 184
 Топливные элементы 37
 Торонд 44
 Транзисторы 298, 299
 Трансформаторные подстанции комплектные 203
 Трансформаторы двухобмоточные 128
 — измерительные напряжения и тока 155, 156
 — однофазные и трехфазные 128
 — трехфазные силовые 127, 128
 — — группы соединения обмоток 139
 Треугольники сопротивлений и мощностей 73, 74
 Треугольник проводимостей 87
 Трехфазная сеть, включение нагрузки 100
 — — несимметрия напряжений, токов 102
 — — напряжение смещения нейтрали 103
 — — ток в нулевом проводе 104
 Триггер 301
 Триод 298
 Трубчатые разрядники 489

 Ударный ток 165, 166
 Удельная проводимость и удельное сопротивление металлов и сплавов 15, 22
 Ультрафиолетовые лучи 338, 364, 365
 Усилители электронные 300, 301

 Фаза синусоидального тока 61, 62, 66
 Фазировка трансформатора 140
 Фазометры 75
 Фарада 9, 12
 Ферриты 48
 Ферромагнетики 46
 Фильтры резонансные 60
 Форсировка напряжения возбуждением 127
 Фотореле 305

- Фотоэлементы 40, 305
Фуко токи 69
- Характеристики электродвигателя 308
Химическое электричество 30
- Центр тяжести нагрузки 206
- Частота переменного тока 63, 94
— вращения электродвигателя 259
- Щелочные аккумуляторы 33...36
Щетки коллекторные 60
Щиты управления 198, 199
- Экономия электроэнергии 453
Эксплуатация электрооборудования 408
Элегазовые выключатели 194
Электризация 10, 15
Электрическая мощность 26
— проводимость 20
— прочность 15
— система 105
— цепь 17, 18
— энергия 5
Электрические величины и единицы их измерения 9, 10
— сети 105
- Электричество, понятие 5
Электродвижущая сила 17, 31, 61
— — самоиндукции 68
Электроизгородь 57
Электролиз 29
Электролит 6, 29...32, 34...36
Электромагнетизм 53
Электромагниты 50
Электромагнитная муфта 50, 271
— индукция 53...54
Электрон 6
Электронагрев в сельском хозяйстве 381, 382, 385
Электропривод 307...309
Электросварка 328
Электростанция автоматическая 11
— атомная, гидравлическая, гидроаккумулирующая, дизельная тепловая 109, 111
Электротехническая сталь 46, 49
Электротехнология 388...391
Электроэнергии учет коммерческий, технический 151, 152
Энергия, виды 5, 9, 17
Энергосистема 105
Эритемные лампы 366
- Якорь 56, 271, 273
Ящики силовые 189

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Раздел первый	
ПРАКТИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА	
Глава 1. Основы электричества. Электрические заряды и электрическое поле (электростатика)	5
1.1. Природа электричества. Электрические свойства веществ	5
1.2. Системы единиц измерений электрических, магнитных и механических величин	8
1.3. Статический заряд тела и электрическое поле	10
1.4. Конденсаторы	12
1.5. Разряд конденсаторов. Электрическая прочность диэлектрика	14
1.6. Статическое электричество	15
Глава 2. Электрические цепи постоянного тока	17
2.1. Элементы электрической цепи. Закон Ома	17
2.2. Параллельное, последовательное и смешанное соединение резисторов	19
2.3. Расчет сопротивлений	21
2.4. Влияние температуры на значение сопротивления	23
2.5. Резисторы, реостаты и магазины сопротивлений	24
2.6. Нелинейные элементы в электрических цепях	25
2.7. Мощность в цепи постоянного тока, электрическая энергия и коэффициент полезного действия	26
Глава 3. Химическое действие тока. Источники постоянного тока	28
3.1. Постоянный ток в электролитах. Электролиз. Гальванотехника	28
3.2. Химические источники тока. Гальванические элементы	30
3.3. Аккумуляторы — вторичные химические источники тока	32
3.4. Эксплуатация аккумуляторов	33
3.5. Топливные элементы. Воздушно-цинковые элементы и генераторы	37
3.6. Термоэлектродгенераторы	38
3.7. Фотоэлементы и солнечные батареи	40
Глава 4. Электромагнетизм	42
4.1. Естественный магнит и магнитное поле	42
4.2. Магнитное поле проводника с током	43
4.3. Напряженность магнитного поля, магнитная индукция и магнитный поток	44
4.4. Магнитные свойства материалов	45
4.5. Остаточный магнетизм. Потери на перемагничивание	47
4.6. Магнитные материалы	48
4.7. Закон Ома для магнитной цепи	49
4.8. Электромагниты и их применение	50
4.9. Проводник с током в магнитном поле	51
Глава 5. Электромагнитная индукция. Индукционная аппаратура	53
5.1. Электромагнитная индукция	53
5.2. Самоиндукция. Индукционная аппаратура	55
5.3. Индуктивность катушек. Соединение катушек индуктивностей	58
5.4. Вихревые токи	59

Глава 6. Однофазные цепи переменного синусоидального тока	60
6.1. Получение переменного тока	60
6.2. Частота колебаний переменного тока	63
6.3. Действующее значение переменного синусоидального тока	64
6.4. Цепь переменного тока с активной нагрузкой	66
6.5. Цепь переменного тока с индуктивной нагрузкой	7
6.6. Цепь переменного тока с активной и индуктивной нагрузкой	7
6.7. Электрический дроссель. Управляемый дроссель. Магнитный усилитель	6
6.8. Цепь переменного тока с емкостной нагрузкой	78
6.9. Цепь переменного тока с активной и емкостной нагрузками	81
6.10. Цепь переменного тока с активной, индуктивной и емкостной нагрузками	83
6.11. Цепь переменного тока с параллельно соединенными приемниками энергии	88
6.12. Убытки от низкого $\cos \varphi$ и компенсация реактивной мощности	89
Глава 7. Трехфазные цепи переменного тока	93
7.1. Генерирование трехфазного тока	93
7.2. Соединение источников тока	95
7.3. Соединение фаз звездой	97
7.4. Соединение фаз треугольником	99
7.5. Включение нагрузки в трехфазную сеть	100
7.6. Мощность трехфазного тока	101
7.7. Несимметричные системы напряжений и токов и их недостатки. Определение симметричных составляющих несимметричной системы	102
7.8. Обрыв нулевого провода и напряжение смещения нейтрали	103
 Раздел второй	
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ	
Глава 8. Источники энергоснабжения и графики их нагрузки	105
8.1. Передача электрической энергии от источников к потребителям	105
8.2. Схемы соединений электрических станций и подстанций	107
8.3. Общие сведения об электростанциях	109
8.4. Графики нагрузок источника электроснабжения	112
8.5. Годовой график по продолжительности и его анализ	114
Глава 9. Синхронные генераторы и управление их работой	115
9.1. Устройство генераторов и способы их возбуждения	116
9.2. Основные параметры генераторов	117
9.3. Параллельная работа генераторов	117
9.4. Автоматическое регулирование частоты тока и напряжения на сельских электростанциях	122
9.5. Компаундирование возбуждения синхронных генераторов	125
9.6. Быстродействующая релейная форсировка напряжения возбуждения	127
Глава 10. Силовые однофазные и трехфазные трансформаторы	127
10.1. Устройство трансформатора и автотрансформатора	127
10.2. Номенклатура трансформаторов	131
10.3. Номинальная мощность трансформатора	132
10.4. Номинальное первичное и вторичное напряжения	134
10.5. Опыты холостого хода и короткого замыкания	136
10.6. Коэффициент полезного действия трансформатора	138
10.7. Группы соединения обмоток трансформатора	138
10.8. Параллельная работа трансформаторов	140
Глава 11. Измерения электрических величин при эксплуатации электроустановок	141
11.1. Устройство электроизмерительных приборов	141
11.2. Условные обозначения на шкалах щитовых и переносных приборов	145
11.3. Измерение напряжения и тока	150
11.4. Электрические счетчики и их включение	151
11.5. Расширение пределов измерения счетчиков	151

11.6.	Измерительные трансформаторы	155
11.7.	Логометры. Мегомметры. Измерители заземлений	159
11.8.	Приборы для измерения активных сопротивлений индуктивностей и емкостей с использованием мостовых схем	161
11.9.	Регистрирующие приборы и осциллографы	162
Глава 12.	Аварийные режимы в трехфазных сетях переменного тока и требования к коммутационной и защитной аппаратуре	162
12.1.	Виды коротких замыканий, причины их возникновения и возможные последствия	162
12.2.	Характер переходного процесса при коротком замыкании. Ударный ток	164
12.3.	Способы расчета и ограничения токов короткого замыкания. Определение параметров цепи и выбор расчетных точек коротких замыканий в цепях напряжением до 1000 В	166
12.4.	Основные требования к коммутационной аппаратуре	170
12.5.	Общие требования к аппаратуре управления. Степень защиты аппаратов от внешних воздействий	171
Глава 13.	Коммутационная и защитная аппаратура в электроустановках напряжением до 1000 В	173
13.1.	Рубильники и переключатели	173
13.2.	Пакетные выключатели и переключатели	174
13.3.	Автоматические выключатели (автоматы)	176
13.4.	Контакты. Магнитные пускатели	178
13.5.	Электрические реле, применяемые в цепях управления и сигнализации	180
13.6.	Предохранители для защиты установок напряжением до 1000 В	184
13.7.	Комплектные устройства управления	188
Глава 14.	Общие сведения об аппаратуре управления на напряжение выше 1000 В. Распределительные устройства и трансформаторные подстанции	190
14.1.	Высоковольтные разъединители и выключатели нагрузки	190
14.2.	Высоковольтные распределители	196
14.3.	Распределительные устройства напряжением до 1000 В	198
14.4.	Закрытые высоковольтные распределительные устройства напряжением 6 и 10 кВ	200
14.5.	Трансформаторные подстанции напряжением 10/0,4, 35/10 и 35/6 кВ	201
Глава 15.	Линии и сети. Расчет проводов	205
15.1.	Схемы распределения электрической энергии, применяемые в сельском хозяйстве. Выбор местоположения подстанции	205
15.2.	Требования к электрическим сетям	206
15.3.	Конструкции опор. Изоляторы сетей 380/220 В и высшего напряжения	209
15.4.	Типы проводов	212
15.5.	Выбор площади поперечного сечения проводов по условиям нагрева	216
15.6.	Расчет проводов на потерю напряжения	217
15.7.	Основные формулы для выбора площади поперечного сечения проводов	222
15.8.	Проверка сети на колебания напряжения при пуске электродвигателей	226
Глава 16.	Внутренние проводки	228
16.1.	Общие сведения о внутренних проводках. Разметка проводов	228
16.2.	Выбор марки проводов и способа прокладки внутренних проводок	229
16.3.	Соединение и оконцевание проводов	233
16.4.	Элементы монтажа открытых проводок	235
16.5.	Элементы монтажа скрытых проводок	241
16.6.	Установка осветительной арматуры, выключателей и групповых щитков	243
16.7.	Проводки вне помещений и вводы. Заземления в проводах	244
16.8.	Схемы осветительных цепей	246

Раздел третий

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Глава 17.	Электродвигатели, применяемые в сельскохозяйственных силовых электроустановках	248
-----------	---	------------

17.1.	Принцип действия и основные типы асинхронных электродвигателей .	248
17.2.	Схемы включения трехфазного асинхронного электродвигателя в сеть. Определение «начал» и «концов» статорной обмотки	253
17.3.	Сила тока, потребляемого электродвигателем из сети. Пусковой ток и способы его снижения	256
17.4.	Частота вращения асинхронного электродвигателя. Мощность и КПД двигателя. Коэффициент мощности	259
17.5.	Вращающий момент двигателя. Усилие на валу	261
17.6.	Однофазные асинхронные электродвигатели. Включение трехфазного электродвигателя в однофазную сеть	263
17.7.	Регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей	266
17.8.	Асинхронные двигатели специального назначения	268
17.9.	Работа асинхронного электродвигателя в генераторном режиме	269
17.10.	Устройство асинхронных муфт скольжения	271
17.11.	Принцип действия коллекторных машин	272
17.12.	Электродвигатели постоянного тока и схемы их включения	275
17.13.	Стартерный двигатель	277
17.14.	Коллекторные электродвигатели переменного тока	278
17.15.	Синхронные электродвигатели	279
Глава 18.	Преобразователи тока. Автомобильные и тракторные генераторы	280
18.1.	Вращающиеся преобразователи тока промышленной частоты в постоянный ток	280
18.2.	Асинхронный преобразователь частоты	282
18.3.	Преобразователи повышенной частоты (500...8000 Гц)	283
18.4.	Преобразователи постоянного тока в переменный	283
18.5.	Статические преобразователи частоты (умножители)	284
18.6.	Автомобильный генератор постоянного тока с регулятором напряжения . .	285
18.7.	Генераторы переменного тока с постоянными магнитами	287
Глава 19.	Элементы и устройства промышленной электроники, применяемые в сельском хозяйстве	289
19.1.	Общие сведения. Двухэлектродные приборы и их применение	289
19.2.	Схемы неуправляемых выпрямителей на диодах (вентиллях)	293
19.3.	Силовые полупроводниковые приборы — тиристоры. Управляемые выпрямители	295
19.4.	Управляемые электровакуумные и полупроводниковые приборы — триоды и транзисторы	298
19.5.	Общие сведения об электронных усилителях и импульсных устройствах . .	300
19.6.	Общие сведения о микроэлектронных схемах и приборах для отображения информации	302
19.7.	Некоторые датчики, широко применяемые с электронными схемами усиления. Фотореле.	303
Глава 20.	Основные требования к электроприводу в сельскохозяйственных установках . .	307
20.1.	Общие сведения об электроприводе. Механические характеристики приводов	307
20.2.	Тепловой режим электродвигателя и выбор его мощности	309
20.3.	Механическая передача от двигателя к рабочей машине	313
20.4.	Основные требования к установке электродвигателей	315
20.5.	Способы установки электродвигателей	317
20.6.	Установка пускозащитной аппаратуры	319
20.7.	Выбор электродвигателя по конструктивному исполнению	321
Глава 21.	Схемы автоматического управления электроприводами	323
21.1.	Виды схем автоматики и условные обозначения на схемах	323
21.2.	Типовые схемы управления асинхронным короткозамкнутым электродвигателем	324
21.3.	Типовые схемы управления электродвигателем с фазным ротором	326
21.4.	Управление электродвигателями в заданной последовательности	329
21.5.	Технологические датчики и их использование для автоматического управления сельскохозяйственными установками	330

Глава 22. Использование электрического освещения в сельском хозяйстве	337
22.1. Основные понятия	337
22.2. Лампы накаливания	340
22.3. Люминесцентные лампы	344
22.4. Газоразрядные лампы высокого давления	348
22.5. Арматура для ламп. Прожекторы	350
22.6. Выбор светильников и их размещение	353
22.7. Виды и системы освещения	358
22.8. Упрощенный способ расчета освещения	359
22.9. Производственное использование электрического света	361
Глава 23. Использование ультрафиолетовых, инфракрасных и других излучений в сельском хозяйстве	364
23.1. Диапазон ультрафиолетовых излучений. Источники ультрафиолетового излучения	364
23.2. Нормы эритемного облучения сельскохозяйственных животных и птицы. Эффективность облучения	369
23.3. Люминесцентный анализ в сельском хозяйстве	372
23.4. Источники инфракрасных излучений	373
23.5. Применение инфракрасных и рентгеновских излучений	374
23.6. Различное использование ионизирующих излучений	375
23.7. Метод меченых атомов	377
Глава 24. Применение электрической энергии для нагрева. Электротехнология	378
24.1. Перспективы использования электрической энергии для тепловых целей	378
24.2. Электронагревательные приборы для бытовых целей	379
24.3. Применение электронагрева в производственных процессах	381
24.4. Электрообогрев в защищенном грунте	382
24.5. Электронагревательные установки в животноводстве	385
24.6. Получение теплоты при помощи тепловых насосов. Кондиционеры	386
24.7. Методы электротехнологии при обработке металлов	388
24.8. Технологические процессы с использованием сильных электрических полей (электронно-ионная технология)	390
24.9. Предпосевная обработка семян. Перспективы электротехнологии	391

Раздел четвертый

ЭКСПЛУАТАЦИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И МОЛНИЕЗАЩИТА

Глава 25. Методы и организационные формы эксплуатации электроэнергетического оборудования в сельском хозяйстве	393
25.1. Объем мероприятий по обслуживанию электрооборудования и материально-техническая база электротехнической службы	393
25.2. Состав и схема построения энергетической службы хозяйства и ее документация	394
25.3. Порядок расчета объемов работ по техобслуживанию и ремонту энергооборудования в хозяйстве	399
25.4. Ответственность за эксплуатацию электроустановок и уровень квалификации персонала	402
25.5. Объем и нормы приемо-сдаточных и профилактических испытаний электрооборудования	404
Глава 26. Эксплуатация осветительных установок, электродвигателей, оборудования ферм и электропарников	408
26.1. Эксплуатация осветительных установок	408
26.2. Эксплуатация электродвигателей	410
26.3. Объем планово-предупредительных ремонтов электродвигателей	412
26.4. Неисправности электродвигателей и их устранение	415
26.5. Некоторые особенности эксплуатации коллекторных машин	416

26.6.	Особенности эксплуатации электроустановок на животноводческих фермах и парников с электрообогревом	417
26.7.	Особенности эксплуатации электроинструмента	419
Глава 27.	Выбор защиты электродвигателей и ее настройка. Эксплуатация пуско-защитной аппаратуры	420
27.1.	Общие требования к пускозащитной аппаратуре	420
27.2.	Выбор плавких вставок предохранителей и уставок автоматических выключателей	421
27.3.	Тепловые реле и их защитные характеристики	423
27.4.	Стенд для настройки тепловой защиты и сушки обмоток	426
27.5.	Универсальный стенд электрика для обслуживания электродвигателей, пускозащитной аппаратуры и других целей	430
27.6.	Проверка на стенде контактных соединений. Сварка проводов	433
27.7.	Температурная защита	435
27.8.	Защита трехфазных электродвигателей от работы на двух фазах	436
27.9.	Фазочувствительная защита трехфазных электродвигателей	437
27.10.	Объем планово-предупредительных осмотров и ремонтов пускозащитной аппаратуры	439
Глава 28.	Совершенствование использования и способы экономии электроэнергии	441
28.1.	Планирование эффективного потребления электроэнергии	441
28.2.	Общие мероприятия по экономии электроэнергии и метод определения их эффективности	445
28.3.	Экономия энергии в быту. Экономия ламп накаливания	447
28.4.	Определение экономии при использовании ламп с более высокой световой отдачей	448
28.5.	Снижение потерь в сетях, трансформаторах, электродвигателях	450
28.6.	Косвенные методы экономии электроэнергии в системах электрообогрева, водоснабжения и вентиляции	453
Глава 29.	Заземления и зануления в электроустановках. Меры безопасности	454
29.1.	Заземляющие устройства и их защитное действие. Зануление.	454
29.2.	Требования к заземлениям и занулениям в электроустановках	459
29.3.	Определение сопротивления растеканию заземлителей	463
29.4.	Особенности устройства заземления распределительных сетей 380/220 В	465
29.5.	Классификация помещений по степени опасности поражения людей электрическим током, по условиям окружающей среды и допустимые напряжения электроустановок	468
29.6.	Защитное отключение	470
29.7.	Индивидуальные средства защиты	471
29.8.	Общие меры безопасности в электрических установках	473
29.9.	Оказание первой помощи пострадавшему от электрического тока	474
Глава 30.	Молниезащита в сельских электроустановках	477
30.1.	Общие сведения	477
30.2.	Молниезащита строений в сельской местности	479
30.3.	Примеры молниезащиты сельскохозяйственных объектов	483
30.4.	Меры по молниезащите при устройстве наружных антенн	484
30.5.	Молниезащита сельских линий передач и сетей	486
30.6.	Эксплуатация молниезащитных устройств	490
Приложения		492
Указатель литературы		498
Алфавитный указатель		499

Леонид Георгиевич Прищеп

УЧЕБНИК СЕЛЬСКОГО ЭЛЕКТРИКА

Зав. редакцией *Н. М. Облезов*

Редактор *В. М. Никитина*

Художник *Л. А. Гасиева*

Художественный редактор *С. В. Соколов*

Технический редактор *Т. Б. Платонова*

Корректоры *О. Н. Ильина, В. А. Лебедева,*
Н. Э. Аухатова

ИБ № 4309

Сдано в набор 23.09.85. Подписано к печати 06.02.86. Т-03081. Формат 60 X 90¹/₁₆. Бумага офсетная № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 32 + 0,25 форзац. Усл. кр.-отт. 63. Уч.-изд. л. 37,86 + 0,28 форзац. Изд. № 366. Тираж 133000 экз. Заказ № 730. Цена 1 р. 30 к.

Ордена Трудового Красного Знамени ВО «Агропромиздат», 107807, ГСП, Москва, Б-53, ул. Садовая-Спаская, 18.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

СОБЛЮДАЙТЕ ТЕХНИКУ БЕЗОПАСНОСТИ



ПРИ ИЗМЕРЕНИЯХ,
ОСМОТРЕ И РЕМОНТЕ
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК
РАБОТАЙТЕ ВДВОЕМ



ЗАЕМЛЯЙТЕ
ПРОВОДА,
РАБОТАЯ
НА ЛИНИИ



ПРИ ОСМОТРЕ ЛИНИИ
ИДИТЕ
С ПОДВЕТРЕННОЙ СТОРОНЫ



ВО ВРЕМЯ ОБСЛУЖИВАНИЯ
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК
ЗАЕМЛЯЙТЕ
ТОКОВЕДУЩИЕ ЧАСТИ

БЫСТРО ОСВОБОДИТЕ ПОСТРАДАВШЕГО ОТ ТОКА



ОТКЛЮЧИТЕ УСТАНОВКУ
ИЛИ ПЕРЕРУБИТЕ ПРОВОД



ДЕЙСТВУЙТЕ ОДНОЙ РУКОЙ,
ОТТАСКИВАЯ
ПОСТРАДАВШЕГО
ЗА ПЛАТЬЕ



ПРОВОД СБРАСЫВАЙТЕ
ПРИ ПОМОЩИ ШТАНГИ
ИЛИ СУХОЙ ДОСКИ,
ИЗОЛИРОВАВ СЕБЯ ОТ ЗЕМЛИ