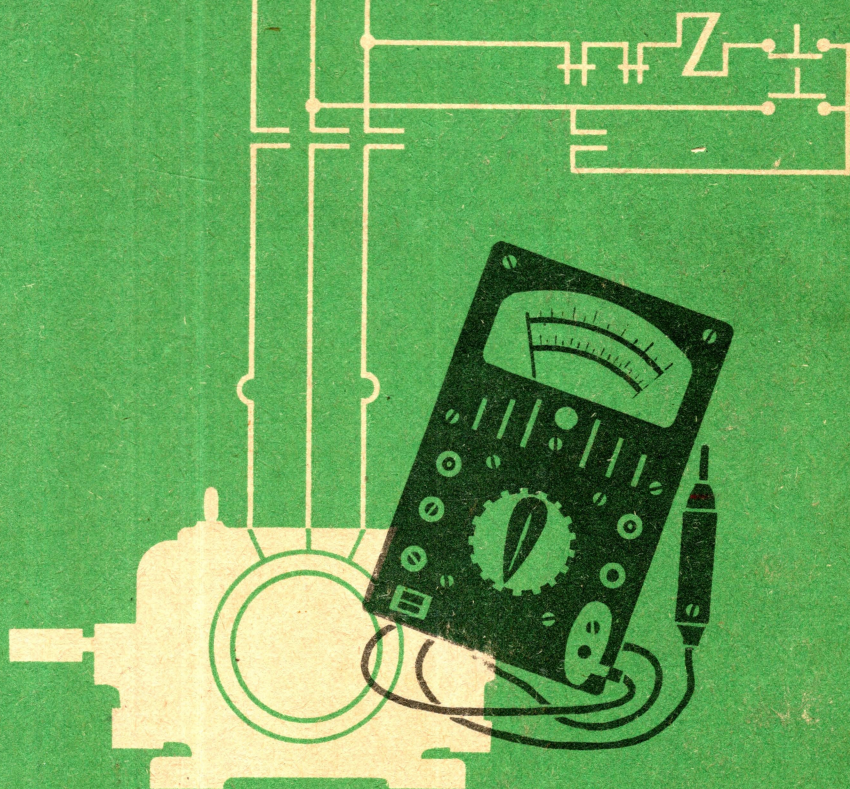


М.Ю. АНВЕЛЬТ,
Ю.Х. ПУХЛЯКОВ,
М.А. УШАКОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА



ПРОСВЕЩЕНИЕ
1964

М. Ю. АНВЕЛЬТ, Ю. Х. ПУХЛЯКОВ, М. А. УШАКОВ

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ
ДЛЯ УЧАЩИХСЯ ГОРОДСКИХ СРЕДНИХ ШКОЛ
С ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ОБУЧЕНИЕМ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,
ИСПРАВЛЕННОЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ПРОСВЕЩЕНИЕ»

Москва 1964

ОТ РЕДАКЦИИ

Настоящее учебное пособие написано в соответствии с программой курса «Электротехника», утвержденной Министерством просвещения РСФСР для средних школ с производственным обучением.

В книге не приводятся сведения о простейших цепях постоянного и однофазного переменного тока, а также об электромагнитных и электронных явлениях. Имеется в виду, что учащиеся получили на уроках физики предварительную подготовку, необходимую для понимания электротехнических вопросов.

Весь материал книги изложен в трех разделах: 1) основы электроизмерительной техники, 2) электроснабжение и электрооборудование предприятий и 3) основы автоматики. Из общего бюджета времени, отводимого на теоретическое изучение электротехники (40 час.), на изучение каждой из этих тем требуется примерно одинаковое число часов.

Книга является не только учебным пособием для теоретического изучения курса электротехники, но и руководством для выполнения лабораторных работ.

Со всеми замечаниями и пожеланиями по настоящему пособию просим обращаться по адресу: Москва, 3-й проезд Марьиной рощи, дом 41, издательство «Просвещение», редакция производственно-технической литературы.

ВВЕДЕНИЕ

Мы живем в замечательное время. На наших глазах претворяются в жизнь самые сокровенные мечты человечества. Как ожившие легенды восприняты миром полеты первых советских космонавтов Ю. Гагарина и Г. Титова. Уже совершен первый групповой полет в космос на кораблях-спутниках, осуществленный А. Николаевым и П. Поповичем. Мощные электрические станции и атомные ледоколы, сложнейшие счетные машины и космические корабли с человеком на борту — все это реальная действительность, наше сегодня. А завтра мы будем свидетелями новых, еще более удивительных, открытий и изобретений.

Выдающиеся достижения современной науки и техники были бы невозможны без использования электрической энергии, без создания разнообразных электрических машин и автоматических устройств, облегчающих труд человека, расширяющих его господство над природой. С помощью электрической энергии приводят в движение станки и машины, добывают в огромных количествах уголь и нефть, получают высокосортные марки сталей и сплавов, проникают в недра земли и глубины вселенной.

Электрическая энергия используется во всех отраслях народного хозяйства, без нее немыслимо улучшение жизни человека, удовлетворение его растущих духовных и материальных потребностей.

Это объясняется тем, что электрическая энергия обладает многими преимуществами по сравнению с другими видами энергии. Электрическая энергия легко преобразуется в тепловую, механическую, химическую энергию, она может передаваться на большие расстояния; ее легко распределять между множеством потребителей.

Жизнь современного общества трудно представить себе без широкого применения электричества в промышленности, сельском хозяйстве, на транспорте, в быту, т. е. без электрификации.

Великий Ленин предвидел, что только на основе электрификации можно преодолеть вековую отсталость России, превратить ее в мощную индустриальную державу. Вождю революции принадлежит научное обоснование значения электрификации, как

материально-технической базы коммунизма. Ленинская формула «Коммунизм — это есть Советская власть плюс электрификация всей страны» подчеркивает необходимость единства передового общественного строя — Советской власти — и передовой экономики, базирующейся на электрификации. По инициативе В. И. Ленина в 1920 г. был принят план электрификации России — план ГОЭЛРО.

Значение электрификации очень образно выражалось рисунком, который был вложен в небольшую книжечку с планом ГОЭЛРО: на листе бумаги изображалось большое сердце с надписью «Электрификация»; от сердца шли линии к пяти квадратам со следующими надписями: «Жилище», «Пища», «Одежда», «Транспорт», «Культура».

По современным масштабам план ГОЭЛРО выглядел скромно: в течение 10—15 лет должно было быть построено 30 крупных электростанций общей мощностью 1,5 млн. квт. В наши дни одна только Волжская гидроэлектростанция имени XXII съезда КПСС имеет мощность, более чем в полтора раза превышающую мощность всех станций, сооружавшихся по плану ГОЭЛРО. Но в те годы, в условиях разрухи и голода, в которых оказалось молодое Советское государство, этот план многие считали несбыточной фантазией.

Преодолевая огромные трудности, советские люди под руководством Коммунистической партии уже в 1931 г. выполнили план ГОЭЛРО по основным показателям, а в 1935 г. перевыполнили его в 3 раза, создав развитое электроэнергетическое хозяйство — базу электрификации страны.

В 1950 г. Советский Союз по производству электроэнергии вышел на первое место в Европе и на второе в мире. О невиданных темпах развития отечественной энергетики можно судить, в частности, по следующему примеру: в 1961 г. производство электроэнергии возросло по сравнению с 1913 г. более чем в 160 раз.

Ленинская идея сплошной электрификации страны стала стержнем программы строительства коммунизма. В 1980 г. в СССР будет вырабатываться электроэнергии примерно в полтора раза больше, чем в настоящее время производится во всех странах мира, вместе взятых.

Для победы коммунизма необходимо прежде всего обеспечить высокую производительность труда. В перспективном плане развития народного хозяйства страны предусматривается в течение 20 лет увеличение производительности труда в 4—4,5 раза. А это возможно только при условии широкого внедрения механизации и автоматизации производства. Механизация — это замена малопродуктивного ручного труда машинным. Сейчас, например, ткач, работая на станке, в течение дня изготавливает столько ситца, сколько раньше на ручном станке



В. И. Ленин у карты электрификации России.

можно было выткать лишь за 10 лет; новый шагающий экскаватор с объемом ковша 35 м^3 выполняет работу 15 тысяч людей, а управляет им всего несколько человек. Автоматизация производственных процессов — это высшая ступень механизации. Автоматизация дает возможность увеличить производительность труда во много раз.

Во всех производственных процессах — от выпечки хлеба до создания мощных электрических генераторов или прокатных станов — на службе у человека находятся сотни и тысячи машин-автоматов. Но автоматы не только повышают производительность труда. Современные производственные процессы протекают при таких скоростях, температурах и давлениях, что человек уже не в состоянии осуществлять непосредственный контроль над ними. В таких случаях автоматы незаменимы:



Кржижановский, Глеб Максимилианович (1871—1959 гг.), видный советский ученый-энергетик, академик. Принимал участие в строительстве первых крупных электростанций в дореволюционной России. Председатель комиссии ГОЭЛРО. Известен исследованиями в области энергетики и электрификации.

они следят за ходом производственного процесса, регулируют и направляют его, определяют последовательность операций.

В последние годы механизация и автоматизация охватывают весь производственный цикл. Такая комплексная автоматизация повышает производительность труда в десятки раз. В нашей стране успешно осуществляется переход от автоматических станков и линий к автоматическим цехам и целым заводам. Таким предприятием станет, в частности, хорошо известный в нашей стране Московский автозавод имени Лихачева. В ближайшее двадцатилетие комплексная автоматизация будет осуществлена в широком масштабе.

Решающая роль в развитии комплексной автоматизации принадлежит электронике, на основе которой создаются электронные машины, осуществляющие управление сложными производственными процессами. Электронные приборы и устройства способны поддерживать нужную температуру до десятитысячных долей градуса, измерять промежутки времени порядка стомиллионных долей секунды, обнаруживать смещения в одну стомиллионную сантиметра.

Еще более замечательными электронными устройствами являются быстросействующие вычислительные и управляющие машины. БЭСМ — быстросействующая электронно-счетная машина за один час может производить такие расчеты, на которые один человек затратил бы около 50 лет. Такая машина рассчитывает траекторию полета снаряда быстрее, чем происходит сам полет снаряда. Наиболее совершенные из этих машин способны не только управлять производственным процессом по заранее разработанной программе, но и изыскивать наиболее рациональный режим этого процесса. Убедительной иллюстрацией успехов со-

ветской радиоэлектроники являются автоматические устройства на космических кораблях и ракетах.

Совершенно очевидно, какие большие возможности для быстрого развития всех отраслей народного хозяйства открываются благодаря применению электричества, внедрению комплексной автоматизации.

Об эффективности современной техники наглядно говорит такой пример: если бы объем производства, запланированный на 1965 г., попытаться выполнить с помощью той техники, которой располагала царская Россия в 1913 г., то для этого понадобилось бы не менее 250 лет.

Замечательных успехов достигла современная электротехника, ставшая незаменимым помощником человека.

Можно сказать, что путь к научно-техническому прогрессу лежит через электрификацию.

Вот почему, кем бы вы ни хотели стать по окончании школы, — металлургом или физиком, летчиком или врачом, энергетиком или космонавтом, — вы должны овладеть электротехническими знаниями.

Раздел первый

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

ГЛАВА I

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

§ 1. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРИБОРОВ

Назначение приборов.

Современная наука и техника немыслимы без электроизмерительных приборов. С их помощью можно просто, быстро и с высокой точностью измерять не только электрические, но и многие неэлектрические величины. Электроизмерительные приборы используют при изучении различных физических явлений, испытании машин, а также для контроля и управления производственными процессами.

Наиболее широкое применение в технике получили приборы, непосредственно указывающие числовые значения измеряемых величин. Такие приборы называют показывающими приборами.

К ним относятся, например, амперметры, вольтметры, счетчики, ваттметры. Они снабжаются отсчетными приспособлениями — стрелками со шкалами или счетными механизмами.

Шкалы приборов со стрелкой-указателем предварительно градуируют в числовых значениях измеряемой величины (рис. 1).

Электроизмерительные приборы, применяемые для повседневных измерений, называют рабочими, а приборы, используемые только для проверки и градуировки рабочих приборов, — образцовыми.

В качестве образцовых приборов служат измерительные приборы высокой точности.

Измерительный механизм.

Основным элементом каждого показывающего прибора является измерительный механизм. Он состоит из подвижной и неподвижной частей, заключенных в корпусе прибора. Подвижная часть механизма

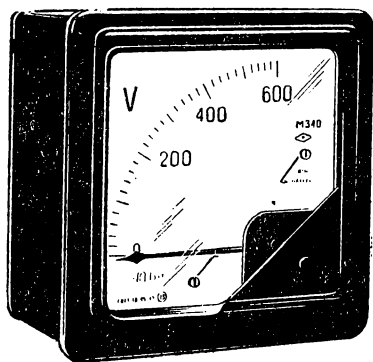


Рис. 1. Щитовой вольтметр.

перемещается — обычно поворачивается вокруг оси — при включении прибора в контролируемую электрическую цепь.

Действие измерительных механизмов основано на использовании различных физических явлений. В одних приборах отклонение подвижной части измерительного механизма вызывается силами взаимодействия между проводником с током и полем постоянного магнита; в других — силами втягивания легких ферромагнитных сердечников внутрь катушки с измеряемым током; в третьих — силами взаимодействия двух проводников с токами и т. д. Момент сил, вызывающий перемещение подвижной части механизма, называют **вращающим моментом**.

Если перемещению подвижной части прибора не будет оказано упругое противодействие, то измерения таким прибором будут невозможны, так как при любом вращающем моменте стрелка расположится у края шкалы. Для того чтобы стрелка прибора отклонялась на угол, соответствующий измеряемой величине, необходимо вращающему моменту противопоставить момент сил обратного направления. Момент сил, препятствующий перемещению подвижной части прибора, называют **противодействующим моментом**. Величина этого момента должна возрастать с увеличением отклонения подвижной части. В большинстве приборов такой момент создается силами упругости спиральных или ленточных пружин. При их закручивании или раскручивании оказываемое ими противодействие пропорционально углу поворота подвижной части прибора.

Таким образом, при включении прибора в электрическую цепь на подвижную часть его измерительного механизма будут действовать два момента сил: вращающий и противодействующий. Перемещение подвижной части происходит только до тех пор, пока вращающий момент превышает момент противодействующий. Когда возрастающий с углом закручивания противодействующий момент окажется равным вращающему моменту, перемещение подвижной части прибора прекратится и наступит равновесие. Отклонившаяся стрелка прибора займет определенное положение в соответствии с измеряемой величиной.

После выключения прибора его подвижная часть под действием момента закрученной пружины возвращается в исходное положение.

Успокоитель. При включении прибора в цепь подвижная часть измерительного механизма будет перемещаться к положению равновесия. Если не принять специальных мер, то по инерции она пройдет это положение. Затем, под воздействием спиральных пружин, подвижная часть начнет перемещаться в обратную сторону, снова пройдет положение равновесия и подобно маятнику будет совершать затухающее колебательное движение около положения равновесия. Время этого движения может быть очень большим, что задержит отсчет. Для того

чтобы заставить подвижную систему прибора возможно скорее занять положение равновесия, ее соединяют с особым приспособлением — успокоителем.

Наибольшее распространение получили два типа успокоителей: магнитоиндукционный и воздушный.

Магнитоиндукционный успокоитель (рис. 2) представляет собой секторную металлическую пластинку 2, расположенную между полюсами постоянного магнита 1. Пластика насажена на ось 3 подвижной части измерительного механизма. При перемещении пластинки в поле постоянного магнита в ней индуцируются вихревые токи. В результате взаимодействия вихревых токов с полем постоянного магнита со-

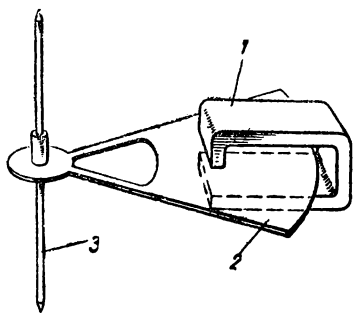


Рис. 2. Магнитоиндукционный успокоитель.

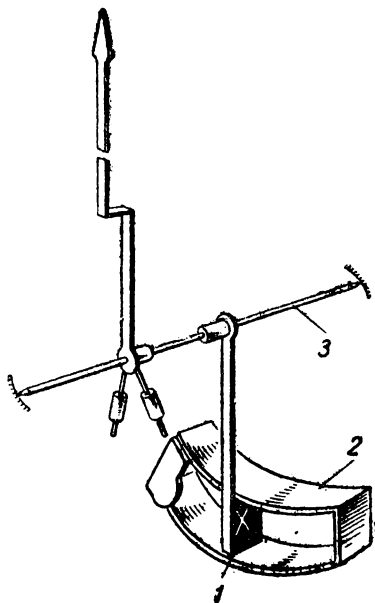


Рис. 3. Воздушный успокоитель.

здаются силы, которые, согласно закону Ленца, препятствуют перемещению пластинки и тем самым ускоряют затухание колебаний подвижной части измерительного механизма.

Воздушный успокоитель (рис. 3) состоит из камеры 2, внутри которой помещается легкая пластинка-крыло 1, ножка крыла укреплена на оси 3 подвижной части прибора. Крыло, движущееся в камере, не касается ее стенок, а тормозящий момент образуется вследствие сжатия и разряжения воздуха в камере.

§ 2. КЛАССЫ ТОЧНОСТИ ПРИБОРОВ

Погрешность показаний.

Качество измерительного прибора характеризуют его точностью, то есть степенью соответствия между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины. Поскольку абсолютно точное изме-

рение величин технически неосуществимо, то их истинное значение не может быть установлено. За истинное значение измеряемой величины принимают такое ее значение, которое отсчитывается по показанию образцового прибора.

Разность между показаниями рабочего (A_x) и образцового (A) приборов, выраженная в единицах измеряемой величины, называется погрешностью показаний рабочего прибора (ΔA)

$$\Delta A = A_x - A.$$

Погрешность показаний прибора вызывается либо несовершенством самого прибора (неточная градуировка шкалы, трение в осях, плохие свойства пружины и т. д.), либо внешними влияниями (изменение температуры окружающей среды, наличие электростатических или магнитных полей и т. д.).

Погрешности показаний, обусловленные только несовершенством конструкции прибора, называют основными, а погрешности, обусловленные внешними влияниями, — дополнительными.

Приведенная погрешность. Точность прибора оценивают отношением наибольшей основной погрешности его показаний к номинальному значению величины, измеряемой прибором. Это отношение выражают в процентах, называют основной приведенной погрешностью и обозначают буквой γ (гамма)

$$\gamma = \frac{A_x - A}{A_n} \cdot 100\%.$$

где A_x — показание рабочего прибора при нормальных условиях* его эксплуатации;

A — показание образцового прибора;

$(A_x - A)$ — наибольшая основная погрешность показаний;

A_n — номинальное значение величины, измеряемой прибором (наибольшее значение, указанное на шкале прибора).

Прибор считается точным, если при нормальных условиях его эксплуатации наибольшая основная погрешность показаний не превышает величины, установленной стандартом для данного прибора. Эту величину называют допустимой основной погрешностью показаний прибора.

В зависимости от величины допустимой основной погрешности, приборы подразделяют на восемь классов точности, обозна-

* Нормальные условия характеризуются температурой окружающей среды 20°С или той, которая обозначена на шкале, положением прибора (также обозначенном на шкале), отсутствием вблизи прибора посторонних магнитных полей, кроме земного, и прочими требованиями ГОСТа.



Якоби, Борис Семенович (1801—1874 гг.), известный русский физик и электротехник, академик. Создал первый нормальный эталон сопротивления («Единица сопротивления Якоби»); предложил метод градуировки шкал приборов для непосредственной оценки измеряемых величин; изобрел первый электродвигатель с вращательным движением; разработал несколько конструкций буквопечатающих телеграфов; открыл гальванопластику.

чаемых соответственно: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Цифры, обозначающие класс точности прибора, представляют собой допустимую основную погрешность, выраженную в процентах от номинального значения измеряемой величины. Это — допустимая основная приведенная погрешность.

Каждый прибор, в соответствии с требованием ГОСТа 1845-59, имеет маркировку. На лицевой стороне, чаще всего на его шкале, приводятся конструктивные и эксплуатационные характеристики прибора. Сюда относятся: условное обозначение системы прибора, класс точности, род тока, рабочее положение прибора и др. Основные условные обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы, приведены в таблице приложения IV.

§ 3. ПРИБОРЫ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Устройство измерительного механизма.

К приборам магнитоэлектрической системы относятся электроизмерительные приборы, измерительный механизм которых состоит из неподвижного постоянного магнита и подвижной катушки.

Катушка может поворачиваться при включении прибора в цепь постоянного тока.

Устройство измерительного механизма магнитоэлектрического прибора схематически показано на рисунке 4. Около полюсных наконечников 2 постоянного магнита 1 неподвижно укреплен стальной цилиндрический сердечник 3. Между полюсными наконечниками и цилиндрическим сердечником образуется равномерный воздушный зазор.

В этом зазоре находится подвижная катушка 7, представляющая собой легкую алюминиевую рамку, обмотанную тонким изо-

лированным проводом; на ее торцовых сторонах укреплены полюсы 5, упирающиеся в подпятники 6. На одной полюсе жестко укреплена стрелка 8. Конец стрелки может свободно перемещаться над шкалой с делениями. Две спиральные пружины 4 служат не только для создания противодействующего момента, но и для электрического соединения обмотки рамки с внешней цепью. Для этого к одной пружинке припаивается начало обмотки, а к другой — ее конец. Наружные концы пружинки соединяются проводниками с зажимами прибора.

Принцип действия.

Принцип действия приборов магнитоэлектрической системы основан на явлении взаимодействия проводника с током и поля постоянного магнита. Постоянный магнит создает в зазоре, где находится рамка, равномерное и радиально направленное магнитное поле (рис. 5). При включении прибора в цепь в катушке установится постоянный ток. Пусть этот ток имеет направление, указанное на рисунке знаком креста и точки.

Как известно, на проводник с током, находящийся в магнитном поле, действует электромагнитная сила, направление которой может быть определено правилом левой руки.

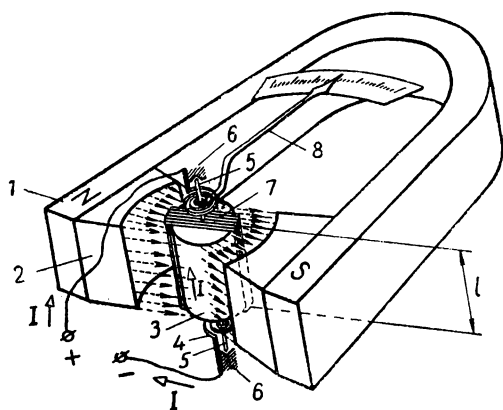


Рис. 4. Измерительный механизм прибора магнитоэлектрической системы.

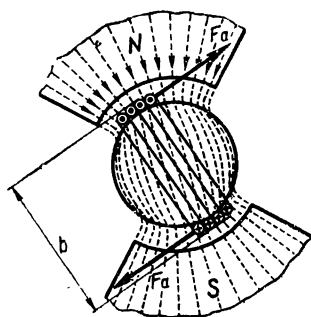


Рис. 5. Рамка в радиальном магнитном поле.

Величина силы F_a , действующей на каждый проводник рамки, может быть определена на основе закона электромагнитных сил:

$$F_a = BIl,$$

где B — магнитная индукция в воздушном зазоре;
 l — длина проводника, находящегося в магнитном поле;
 I — величина тока в проводнике.

Так как величины B и I в данном случае постоянные, то сила F_a будет пропорциональна только величине тока

$$F_a = cI,$$

где

$$c = BI.$$

Момент силы, действующей на каждый проводник рамки, будет равен

$$M = RF_a = RcI,$$

где R — расстояние проводника от оси вращения рамки.

Следовательно, суммарный вращающий момент $M_{вр}$, действующий на все проводники рамки, будет также пропорционален величине измеряемого тока

$$M_{вр} = k_1 I,$$

где k_1 — коэффициент пропорциональности, зависящий от размеров рамки, величины магнитной индукции и выбранной системы единиц.

Под действием вращающего момента рамка придет в движение. Применяя правило левой руки, можно убедиться, что в рассматриваемом нами случае рамка будет поворачиваться по направлению движения стрелки часов.

При повороте рамки спиральные пружинки начинают закручиваться и возникает противодействующий момент $M_{пр}$, который увеличивается пропорционально углу поворота рамки α

$$M_{пр} = k_2 \alpha,$$

где k_2 — коэффициент пропорциональности, зависящий от упругих свойств пружины.

Когда противодействующий момент достигнет величины, равной вращающему моменту, наступит равновесие.

Из условия равенства моментов можно найти зависимость угла поворота от величины измеряемого тока

$$M_{вр} = M_{пр}$$

или

$$k_1 I = k_2 \alpha,$$

откуда

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} \cdot I = kI.$$

Если выражение $\alpha = kI$ записать относительно тока, то есть

$$I = \frac{\alpha}{k} = C_I \alpha,$$

то коэффициент C_I будет численно равен току, вызывающему отклонение подвижной части измерительного механизма на одно

деление шкалы ($\frac{\alpha}{\text{дел}}$). Коэффициент C называют постоянной прибора, или ценой деления.

Из полученного уравнения видно, что угол поворота подвижной части магнитоэлектрического измерительного механизма прямо пропорционален величине тока в рамке. Следовательно, шкала магнитоэлектрического прибора равномерная (рис. 6).

Изменение направления тока в рамке вызовет изменение направления действия силы F_a , и рамка повернется в другую сторону. Поэтому магнитоэлектрический прибор является полярным и для правильного включения в измеряемую цепь один из его зажимов обычно обозначают знаком плюс.

Приборы магнитоэлектрической системы не имеют специальных успокоителей. Их роль выполняет алюминиевый каркас рамки, движущейся в поле постоянного магнита. При движении рамки в каркасе возникают вихревые токи, которые взаимодействуют с магнитным полем подобно тому, как это было описано в магнитоиндукционном успокоителе.

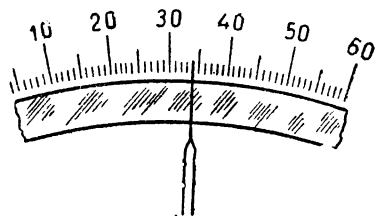


Рис. 6. Шкала прибора магнитоэлектрической системы.

Достоинства, недостатки и область применения.

Приборы магнитоэлектрической системы применяются для измерения только в цепях постоянного тока. Они не могут применяться для непосредственных измерений в цепях переменного тока. Дело в том, что при переменном токе изменение направления тока сопровождается изменением направления действия сил, создающих вращающий момент. При стандартной частоте переменного тока (50 гц) эти изменения происходят настолько быстро, что подвижная часть прибора вследствие инерции не может за ними следовать, и указатель прибора (стрелка) остается вблизи нулевого положения.

Достоинством приборов магнитоэлектрической системы является малый расход энергии при их работе. Этот расход энергии обычно характеризуют мощностью. Ее величина составляет десятые доли ватта.

Показания приборов практически не зависят от влияния внешних магнитных полей, так как эти приборы имеют сильное собственное поле, возбуждаемое постоянным магнитом. К достоинствам приборов также относятся: большая точность, высокая чувствительность, равномерная шкала, быстрое успокоение.

Магнитоэлектрические измерительные механизмы применяют в гальванометрах, вольтметрах и амперметрах постоянного тока.

§ 4. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

Устройство измерительного механизма. К приборам электромагнитной системы относятся электроизмерительные приборы, измерительный механизм которых состоит из неподвижной катушки и легкого ферромагнитного сердечника. Сердечник перемещается относительно катушки при ее включении в цепь постоянного или переменного тока.

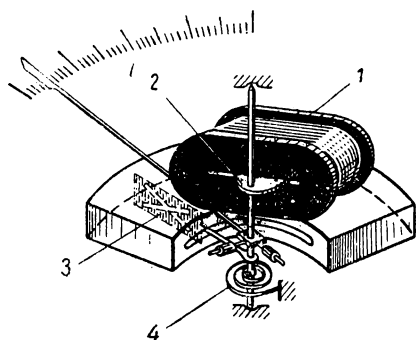


Рис. 7. Измерительный механизм прибора электромагнитной системы.

Электромагнитные измерительные механизмы выполняются с плоской или круглой катушкой. Устройство измерительного механизма прибора с плоской катушкой схематически показано на рисунке 7. Неподвижная катушка 1, намотанная медным проводом, имеет отверстие в виде щели. В эту щель входит сердечник 2, эксцентрично укрепленный на оси. На оси укреплены также стрелка с грузиками для уравнивания подвижной

части, спиральная пружина 4 для создания противодействующего момента и крыло 3 воздушного успокоителя.

Принцип действия.

Принцип действия приборов электромагнитной системы с плоской катушкой основан на явлении втягивания сердечника в катушку с током.

При включении прибора в цепь ток в катушке возбуждает магнитное поле, которое намагничивает сердечник. Намагничиваясь, сердечник втягивается в щель катушки.

Сила втягивания сердечника определяется взаимодействием магнитного поля катушки с полем намагниченного сердечника. Интенсивность магнитных полей катушки и намагниченного сердечника приближенно можно считать пропорциональными току в катушке. Поэтому сила втягивания сердечника в катушку будет пропорциональна квадрату измеряемого тока

$$F = cI^2.$$

Следовательно, и величина вращающего момента $M_{вр}$ будет также пропорциональна квадрату тока

$$M_{вр} = k_1 I^2.$$

Особенностью приборов электромагнитной системы является независимость направления действия вращающего момента от направления тока в катушке. Это станет очевидным, если вспом-

нить, что ферромагнитный сердечник одинаково притягивается как к южному, так и к северному полюсам электромагнита. Таким образом, отклонение подвижной части прибора всегда происходит в одну сторону, а его зажимы не нуждаются в полярной разметке. Поэтому приборы электромагнитной системы могут быть использованы для измерений как в цепях постоянного тока, так и в цепях переменного тока.

Работа прибора в цепи постоянного тока. Если катушка включена в цепь постоянного тока I_0 , то на подвижную часть прибора будет действовать неизменный во времени вращающий момент

$$M_{вр} = k_1 I_0^2.$$

Противодействующий момент, создаваемый спиральными пружинами, пропорционален углу поворота стрелки, жестко закрепленной с сердечником

$$M_{пр} = k_2 \alpha.$$

Сердечник прибора будет поворачиваться до тех пор, пока противодействующий момент не станет равным вращающему

$$M_{вр} = M_{пр}$$

или

$$k_1 I_0^2 = k_2 \alpha,$$

откуда

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} \cdot I_0^2 = k I_0^2.$$

Из этого следует, что шкала электромагнитного прибора должна быть квадратичной (деления сильно сжаты в начале

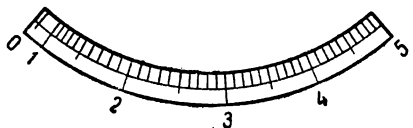


Рис. 8. Шкала прибора электромагнитной системы.

шкалы и растянуты в конце). Такая шкала неудобна при измерениях. Поэтому путем подбора соответствующей формы сердечника добиваются более равномерного расположения делений на шкале в ее рабочей части (рис. 8).

Работа прибора в цепи переменного тока. При включении прибора в цепь переменного тока на подвижную часть измерительного механизма будет действовать переменный во времени вращающий момент. Величина этого момента M_t в каждое мгновение времени t пропорциональна квадрату мгновенного значения тока в катушке

$$M_t = k_1 i^2.$$

Если ток в цепи изменяется во времени по синусоидальному закону (верхняя кривая рис. 9), то мгновенные значения вращающего момента могут быть получены путем следующих графических построений. Задавшись произвольными моментами времени t_1, t_2, t_3 и т. д., находят величины токов i_1, i_2, i_3, \dots , соответствующих этим моментам времени. Затем, возводя в квадрат величины этих токов, строят новую кривую, выражающую зависимость квадрата

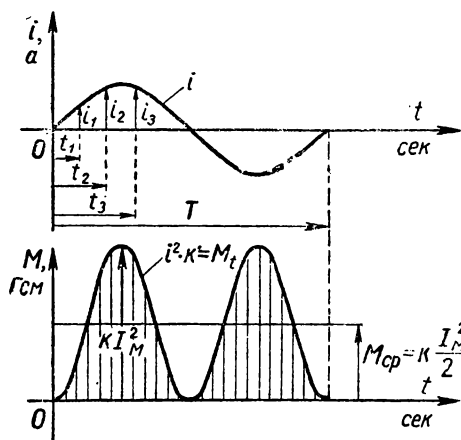


Рис. 9. Графики мгновенных значений тока в катушке и вращающего момента прибора электромагнитной системы.

зависимость квадрата мгновенных значений тока от времени (нижняя кривая рис. 9). В другом масштабе эта кривая будет характеризовать изменение вращающего момента, действующего на подвижную часть прибора.

Из рассмотрения полученной кривой следует, что вращающий момент прибора имеет пульсирующий характер.

Сердечник прибора, а вместе с ним и подвижная часть из-за своей инерции не успевают следовать за быстрым изменением момента, а реагируют лишь на его

среднее значение. Среднее за период значение вращающего момента, как это следует из рассмотрения нижней кривой, равно половине ее максимального мгновенного значения

$$M_{cp} = \frac{M_m}{2}.$$

Имея в виду, что

$$M_m = k_1 I_m^2,$$

получим

$$M_{cp} = k_1 \cdot \frac{I_m^2}{2}.$$

Таким образом, основную формулу, отражающую равенство вращающего и противодействующего моментов при установившемся отклонении подвижной части, можно записать

$$M_{cp} = M_{пр}$$

или

$$k_1 \cdot \frac{I_m^2}{2} = k_2 \alpha,$$

откуда следует, что

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} \cdot \frac{I_M^2}{2} = k \cdot \frac{I_M^2}{2}.$$

Теперь представим себе, что два одинаковых прибора электромагнитной системы включены раздельно в две цепи (рис. 10), причем одна цепь переменного тока, другая — постоянного. Пусть

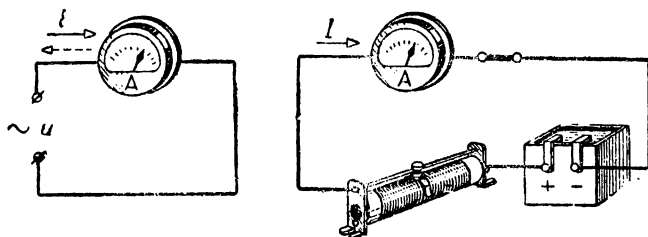


Рис. 10. Схема включения амперметра электромагнитной системы в цепь переменного и постоянного тока.

стрелка прибора в цепи переменного тока повернулась на угол α . Установим во второй цепи при помощи реостата такой постоянный ток I_0 , чтобы стрелка этого прибора отклонилась на такой же угол α , как и стрелка прибора в первой цепи. Тогда можно записать, что

$$\alpha = k \cdot \frac{I_M^2}{2} = k I_0^2$$

или

$$\frac{I_M^2}{2} = I_0^2.$$

Отсюда можно сделать вывод, что переменный ток в первой цепи и постоянный ток во второй цепи будут оказывать одинаковое механическое действие на подвижную часть прибора, если амплитуда переменного тока и величина постоянного тока связаны соотношением

$$\frac{I_M}{\sqrt{2}} = I_0.$$

Амплитудное значение переменного тока, уменьшенное в $\sqrt{2}$ раз, называют действующим значением переменного тока.

Следовательно, электромагнитный прибор, включенный в цепь переменного тока, показывает действующее значение этого тока.

Поэтому шкалы приборов электромагнитной системы градуируют в действующих значениях тока и напряжения.

**Достоинства,
недостатки
и область
применения.**

В отличие от приборов магнитоэлектрической системы, где измеряемый ток взаимодействует с полем сильного постоянного магнита, в приборах электромагнитной системы магнитное поле создается самим измеряемым током и оно сравнительно слабое. Поэтому на показания электромагнитных приборов сильное влияние могут оказывать внешние магнитные поля. Мощность потребления энергии приборами этой системы во много раз больше мощности приборов магнитоэлектрической системы и достигает нескольких ватт.

Достоинством электромагнитных приборов является простота их устройства, устойчивость к перегрузкам и надежность в работе. Они получили широкое применение в качестве миллиамперметров, амперметров и вольтметров в цепях постоянного и переменного токов.

§ 5. ПРИБОРЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Устройство измерительного механизма.

К приборам электродинамической системы относятся электроизмерительные приборы, измерительный механизм которых состоит из двух катушек. Одна из них укреплена неподвижно, а другая может поворачиваться вокруг оси.

На рисунке 11 схематически изображено устройство измерительного механизма электродинамической системы с прямо-

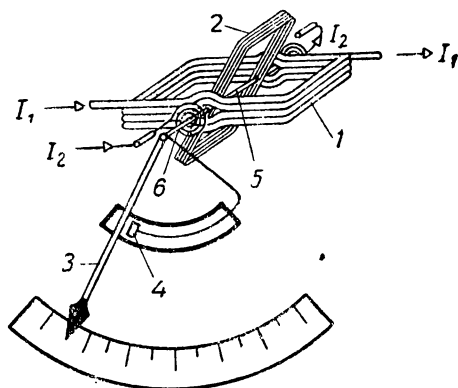


Рис. 11. Измерительный механизм прибора электродинамической системы.

угольными катушками. Неподвижная катушка 1 изготовлена из толстого провода и имеет малое число витков. Она состоит из двух одинаковых секций, расположенных параллельно друг другу. Подвижная катушка 2 расположена внутри неподвижной, закреплена на оси 5 и может поворачиваться. Эта катушка изготовлена из тонкого провода и имеет большое число витков. На оси жестко закреплены стрелка 3 и крыло воздушного успокоителя 4.

Подвижная катушка соединяется с внешней цепью посредством спиральных пружин 6 (так же, как в приборах магнитоэлектрической системы).

Принцип действия.

Принцип действия приборов электродинамической системы основан на взаимодействии тока подвижной катушки с магнитным полем тока неподвижной катушки.

При постоянных токах в катушках приборы этой системы можно сопоставить с приборами магнитоэлектрической системы. Здесь неподвижная катушка с током выполняет роль постоянного магнита.

Неподвижная (1) и подвижная (2) катушки могут соединяться между собой последовательно (рис. 12, а) или параллельно (рис. 12, б), образуя одну или две ветви.

При параллельном включении токи в катушках будут различными по величине.

Между током I_2 подвижной катушки и полем тока I_1 неподвижной катушки возникает сила электромагнитного взаимодействия, пропорциональная величине токов в катушках. Поэтому вращающий момент $M_{вр}$, действующий на подвижную катушку, будет пропорционален произведению токов в подвижной и неподвижной катушках.

Таким образом, при включении прибора с параллельным соединением катушек в цепь постоянного тока вращающий момент можно выразить следующей зависимостью:

$$M_{вр} = k_1 I_1 I_2.$$

Токи в неподвижной и подвижной катушках являются (каждый в отдельности) частью общего тока I измеряемой цепи, то есть

$$I_1 = k_n I,$$

$$I_2 = k_n' I.$$

Поэтому

$$M_{вр} = k_1 I_1 I_2 = k_1 k_n k_n' I^2 = k' I^2.$$

При последовательном соединении катушек токи в них будут одинаковые

$$I_1 = I_2 = I.$$

Следовательно,

$$M_{вр} = k_1 I^2.$$

При включении прибора в цепь переменного тока направление токов в катушках будет изменяться одновременно. Направление действия вращающего момента останется неизменным.

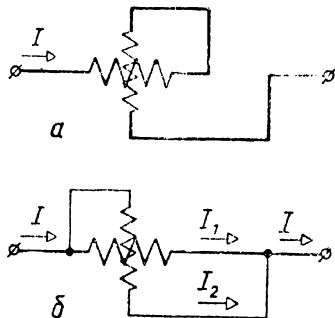


Рис. 12. Схемы соединения измерительных цепей приборов электродинамической системы.

Поэтому прибор пригоден для измерения как в цепях постоянного, так и переменного токов.

Противодействующий момент в электродинамических приборах создается с помощью спиральных пружин и, следовательно, пропорционален углу поворота подвижной части. При установленном отклонении вращающий момент уравнивается противодействующим

$$M_{вр} = M_{пр}$$

или

$$k_1 I^2 = k_2 \alpha.$$

Отсюда следует, что угол отклонения стрелки

$$\alpha = \frac{k_1}{k_2} \cdot I^2 = k I^2.$$

Квадратичная зависимость вращающего момента от тока показывает, что приборы электродинамической системы (как и приборы электромагнитной системы), включенные в цепь переменного тока, будут измерять действующие значения тока и напряжения.

Величина коэффициента k зависит от формы катушек и их взаимного расположения. Путем подбора формы катушек и их относительного положения удается получить относительно равномерную шкалу начиная примерно с 25—30% от номинального значения измеряемой величины.

**Достоинства,
недостатки
и область
применения.**

Магнитное поле прибора электродинамической системы весьма слабое. Поэтому на показания прибора сильное влияние оказывают внешние магнитные поля. Так же, как и в приборах электромагнитной системы, собственное потребление энергии прибором электродинамической системы сравнительно велико.

Приборы рассматриваемой системы отличаются высокой степенью точности и используются главным образом для лабораторных измерений.

Наличие двух цепей тока в приборе дает возможность использовать их в качестве амперметров, вольтметров, ваттметров, фазометров и частотомеров.

Упражнения и задачи

1. На рисунке 13 изображена шкала электроизмерительного прибора. Руководствуясь приложением IV, расшифруйте все условные обозначения на этой шкале.

2. Щитовой вольтметр класса точности 2,5 имеет верхний предел измерений 300 в.

Определите допустимую основную погрешность показаний прибора.

Ответ: 7,5 в.

3. Шкала амперметра с пределом измерения от 0 до 5 а имеет 100 делений. При включении прибора в цепь его стрелка отклонилась на 70 делений. Подсчитайте цену деления и определите величину тока в цепи. Ответ: $C_I = 0,05 \text{ а/дел}$; $I = 3,5 \text{ а}$

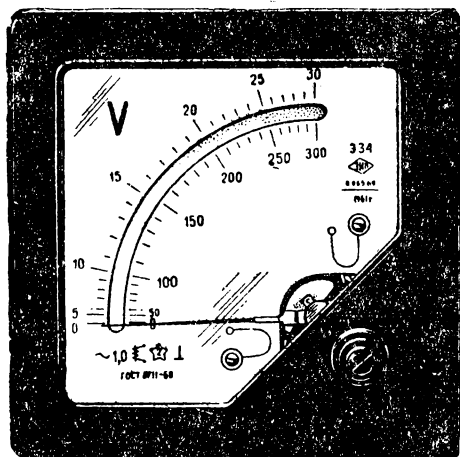


Рис. 13. К задаче № 1.

4. Магнитоэлектрический вольтметр с пределом измерения от 0 до 150 в снабжен равномерной шкалой на 100 делений. После подключения добавочного сопротивления (рис. 14) его предел измерения расширился до 300 в. Определите цену деления вольтметра (в/дел) для прежнего и нового пределов, а также укажите,

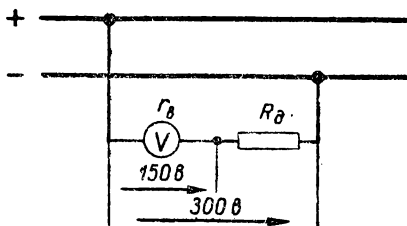


Рис. 14. К задаче № 4.

на сколько делений отклонится стрелка прибора, если его подключить к участку цепи с напряжением 180 вольт.

Ответ: $C_{V1} = 1,5 \text{ в/дел}$; $C_{V2} = 3 \text{ в/дел}$; $\alpha = 60 \text{ дел}$.

5. Падение напряжения на амперметре ПМ-70 при токе в 5 а равно 75 мв. Определите величину сопротивления амперметра. Каким будет падение напряжения на этом амперметре при токе 2,3 а? Ответ: $R_a = 15 \cdot 10^{-3} \text{ ом}$; $U = 34,5 \text{ мв}$.

ГЛАВА II

ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

§ 6. ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ

График поправок.

При всяком измерении неизбежно некоторое расхождение между показаниями рабочего прибора и истинным значением измеряемой величины. Как уже указывалось, за истинное значение измеряемой величины принимается ее значение, установленное при помощи образцового прибора.

Численное значение измеряемой величины, отсчитанное по показаниям образцового прибора, называют действительным ее значением.

Действительное значение (A) может быть больше или меньше значения величины (A_x), измеренной рабочим прибором. Поэтому погрешность (ΔA) показания прибора бывает отрицательной или положительной, так как по определению $\Delta A = A_x - A$. Например, если при измерении тока, действительное значение которого равно 2 а, рабочий прибор показал 2,1 а, то погрешность показания будет $\Delta A = 2,1 - 2 = 0,1$ а.

Для исключения погрешностей в результаты измерений вводят поправки. *Поправка — это величина, которая должна быть алгебраически прибавлена к показанию прибора, чтобы получить действительное значение измеряемой величины.*

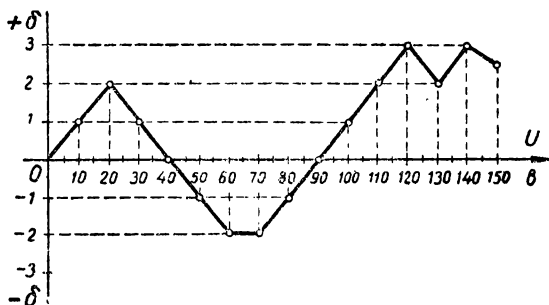


Рис. 15. График поправок.

В рассмотренном примере для получения действительного значения измеряемой величины следует показание рабочего прибора уменьшить на величину погрешности $\Delta A = 0,1$ а. Иначе говоря, величина поправки равна погрешности показания взятой с обратным знаком $\delta = -\Delta A$.

Для учета погрешностей показаний при измерениях приборы могут снабжаться графиком поправок. На рисунке 15 приведен график поправок для вольтметра. График поправок получают при

Эдисон, Томас Алва (1847—1931 гг.) — выдающийся американский электротехник, создатель первой центральной электростанции постоянного тока. Изобрел лампу с угольной нитью, фонограф, щелочной аккумулятор, угольный микрофон, различные электроустановочные приспособления и многие другие устройства (около 1200) в области телеграфии, измерительной техники и электромашиностроения.



поверке прибора путем сличения его показаний с показаниями образцового прибора. Такой график позволяет уточнить отсчет в любом месте шкалы.

Относительная погрешность измерения.

Погрешность показаний не дает еще представления о точности измерения. В самом деле, пусть одним амперметром произведены измерения двух различных по величине токов, действительные значения которых $I_1 = 0,5$ а и $I_2 = 4,9$ а. В первом случае амперметр показал $0,55$ а, а во втором — $4,8$ а. Определим погрешность показаний.

В 1-м случае $\Delta I_1 = 0,55 - 0,5 = 0,05$ а.

Во 2-м случае $\Delta I_2 = 4,8 - 4,9 = -0,1$ а.

Погрешность показаний в первом случае оказалась меньше, чем во втором. Однако это еще не означает, что измерение в первом случае произведено точнее, чем во втором. Чтобы судить о точности измерения, необходимо установить, какую часть от действительного значения измеряемой величины I составляет погрешность показаний ΔI .

В рассматриваемом нами примере в первом случае получим

$$\frac{\Delta I_1}{I_1} = + \frac{0,05}{0,5} = + 0,1,$$

во втором случае это будет

$$\frac{\Delta I_2}{I_2} = - \frac{0,1}{4,9} \approx - 0,02.$$

Эти отношения обычно выражают в процентах. Следовательно, погрешность первого измерения равна 10%, а второго — 2%.

Иначе говоря, измерение во втором случае произведено значительно точнее, чем в первом.

Отношение погрешности показаний (ΔA) к действительному значению измеряемой величины (A), выраженное в процентах, называют относительной погрешностью

$$\beta = \frac{\Delta A}{A} \cdot 100\%.$$

Относительная погрешность характеризует точность измерения. При измерении номинальной величины относительная погрешность будет иметь наименьшее значение. По мере уменьшения измеряемой величины относительная погрешность возрастает.

Из этого можно сделать важный практический вывод: прибор для измерения следует выбирать с таким номинальным значением, чтобы при его включении в цепь стрелка устанавливалась бы во второй половине шкалы.

Если, например, нужно измерить ток, изменяющийся в пределах от 1,5 до 5 а, то целесообразно воспользоваться двумя амперметрами с номинальными значениями 2,5 а и 5 а, включенными последовательно. Токи до 2,5 а измеряют первым амперметром, а затем, закоротив его, измеряют токи от 2,5 до 5 а вторым амперметром.

§ 7. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Мощность
в цепи постоянного тока.**

В любой замкнутой электрической цепи электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии. Например, в цепи, состоящей из аккумулятора, лампы накаливания и соединительных проводов (рис. 16), электрическая энергия источника питания расходуется на нагрев проводников и нити лампы.

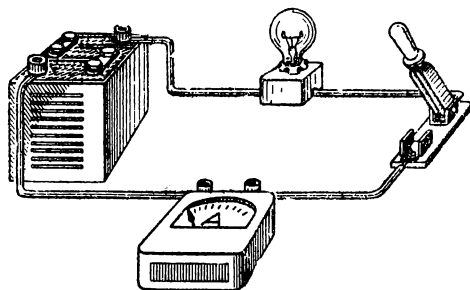


Рис. 16. Простейшая электрическая цепь постоянного тока.

Преобразование одного вида энергии в другой характеризуют мощностью. Как известно, мощность численно равна величине энергии, преобразуемой в единицу времени (секунду).

Если за время Δt величина преобразуемой энергии будет ΔW , то мощность определится отношением

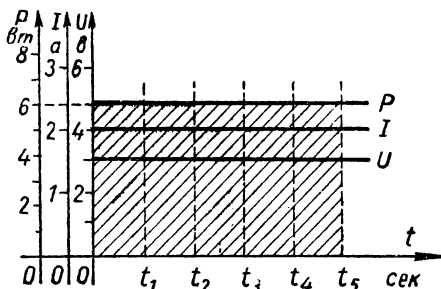
$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t}.$$

Таким образом, *мощность численно равна скорости преобразования энергии*. В цепи постоянного тока при неизменном напряжении U источника питания и постоянном сопротивлении R ток I также будет неизменным. Тогда величина электрической энергии, преобразуемой за время t в другие виды энергии, будет равна

$$W = UI t \text{ дж.}$$

Поэтому мощность в цепи постоянного тока будет величиной постоянной

$$P = \frac{W}{t} = \frac{UI t}{t} = UI \text{ Вт.}$$



Зависимость мощности от времени может быть представлена графически (рис. 17). При неизменных токе и

напряжении график зависимости мощности от времени представляет собой прямую, параллельную горизонтальной оси.

Заштрихованная на рисунке площадь пропорциональна величине электрической энергии W , преобразованной в другие виды энергии за соответствующее время.

Измерение мощности методом амперметра и вольтметра.

Если измерить амперметром ток в нагрузке, а вольтметром напряжение на ее зажимах, то для любого момента времени произведение одновременных показаний амперметра и вольтметра дает величину измеряемой мощности в ваттах. Такой метод измерения называют методом амперметра и вольтметра.

§ 8. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Мгновенная мощность.

Известно, что если к источнику переменного напряжения подключить токоприемник, обладающий только сопротивлением R , то все стадии или фазы гармонического изменения тока в цепи и напряжения на зажимах приемника будут наступать одновременно. Например, переменное напряжение и ток будут одновременно достигать нулевых или амплитудных значений. Про такие переменные величины говорят, что они совпадают по фазе.

Рассмотрим простейшую электрическую цепь (рис. 18), состоящую из генератора, развивающего переменное напряжение, лампы накаливания, обладающей сопротивлением R , и соединительных проводов (сопротивлением соединительных проводов пренебрегаем).

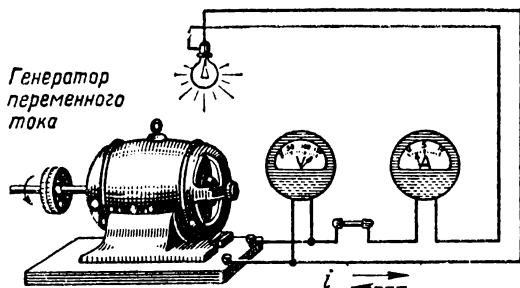


Рис. 18. Простейшая электрическая цепь переменного тока.

Примем, что напряжение генератора изменяется во времени по синусоидальному закону. Тогда ток в рассматриваемой цепи будет совпадать по фазе с напряжением на зажимах генератора. График изменения мгновенных значений напряжения u и тока i во времени показан на рисунке 19 верхними синусоидальными кривыми.

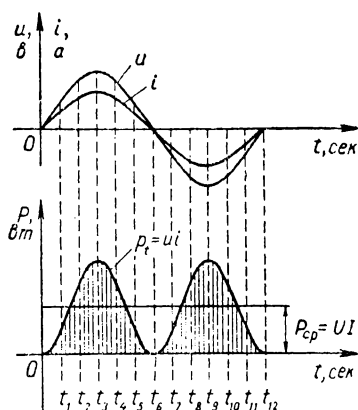


Рис. 19. Кривые мгновенных значений тока, напряжения и мощности для цепи с активным сопротивлением.

При работе генератора переменного тока нить накала лампы будет нагреваться. Расход энергии на нагрев токоприемника с сопротивлением R в любой момент времени характеризуют величиной мгновенной мощности, которую обозначают буквой p .

Мгновенная мощность энергии, расходуемой в токоприемнике с сопротивлением R согласно закону Джоуля — Ленца, пропорциональна квадрату мгновенного значения тока

$$p = Ri^2.$$

Приняв во внимание, что в рассматриваемом случае мгновенные значения тока и напряжения связаны законом Ома

$$u = Ri,$$

величину мгновенной мощности можно выразить также через произведение мгновенных значений тока и напряжения

$$p = Ri^2 = Ri \cdot i = ui.$$

Зависимость величины мгновенной мощности от времени наглядно показывает нижняя кривая на рисунке 19. Ординаты этой кривой для различных моментов времени t_1 ; t_2 ; t_3 и т. д. определены произведением соответствующих ординат синусоидальных кривых тока и напряжения.

Из рассмотрения графика можно заключить, что электрическая энергия источника переменного тока поступает к потребителю с переменной скоростью.

Мощность генератора переменного тока или приемника с сопротивлением R характеризуют средним значением мгновенной мощности за один период. Среднее значение мгновенной мощности за один период называют активной мощностью и обозначают буквой P .

Активная мощность приемника с сопротивлением R , как показывают расчеты, равна произведению действующих значений тока и напряжения

$$P = UI.$$

Переменный ток совпадает по фазе с напряжением генератора только в тех цепях, которые содержат одни сопротивления R . Если электрическая цепь содержит, кроме сопротивления R , еще и катушку индуктивности L (рис. 20), то, как известно из курса физики, переменное напряжение источника питания и ток в такой цепи будут в разное время достигать своих амплитудных или нулевых значений. Синусоидальные кривые тока и напряжения для этого случая показаны на графике рисунка 21. Про такие переменные величины говорят, что они сдвинуты друг относительно друга по фазе. Сдвиг фаз тока по отношению к напряжению можно оценить, например, промежутком времени t_φ , отсчитываемым от момента времени t_3 , когда мгновенное значение напряжения равно нулю, до момента времени t_4 , когда мгновенное значение тока станет равным нулю

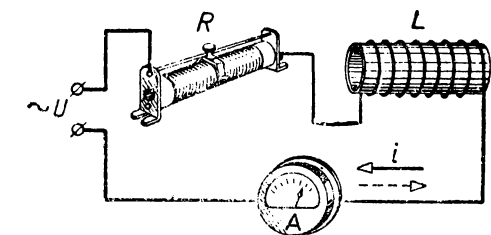


Рис. 20. Схема электрической цепи переменного тока, содержащей активное сопротивление и катушку индуктивности.

$$t_\varphi = t_4 - t_3.$$

Однако сдвиг фаз принято оценивать не промежутком времени, а углом φ , который может быть получен из следующего отношения:

$$\frac{t_{\varphi}}{T} = \frac{\varphi}{2\pi},$$

где T — период изменения тока в секундах.

Отсюда угол φ , называемый углом сдвига фаз, будет равен

$$\varphi = 2\pi \cdot \frac{t_{\varphi}}{T} \text{ рад.}$$

Построим график мгновенной мощности переменного тока, отстающего по фазе по отношению к напряжению на угол φ , пользуясь графиком рисунка 21.

Значения мгновенной мощности будут положительны в те моменты времени, когда ток и напряжение имеют одинаковые знаки, и отрицательны, если они имеют противоположные знаки. Когда ток или напряжение равны нулю, значение мгновенной мощности тоже равно нулю.

Знак у величины мгновенной мощности указывает на направление передачи электрической энергии; при положительном знаке энергия передается от источника питания в цепь, а при отрицательном — из цепи в источник питания.

Отрицательные значения мощности свидетельствуют о том, что в течение времени t_{φ} источник питания является приемником энергии. Откуда она поступает?

Дело в том, что в рассматриваемой цепи существуют одновременно два энергетических процесса. Первый процесс — необратимый. Он связан с преобразованием электрической энергии в тепло. В цепях более сложных, чем рассматриваемая, может, кроме того, происходить превращение электрической энергии в механическую работу (например в электродвигателях). Второй процесс связан с периодическим накоплением и возвратом энергии магнитными полями генератора и токоприемника при возрастании и убывании тока в цепи.

В течение первой четверти периода (рис. 21), когда ток нарастает (от момента времени t_1 до момента t_2), энергия источ-

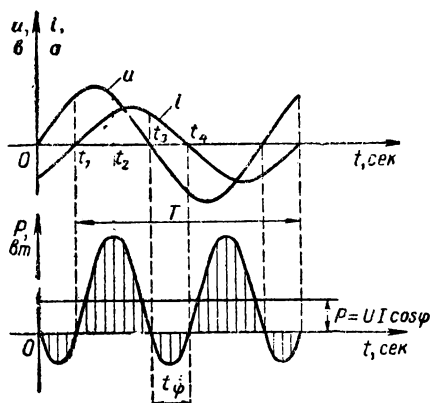


Рис. 21. Кривые мгновенных значений тока, напряжения и мощности в цепи с активным сопротивлением и индуктивностью.

ника питания частично расходуется на нагрев проводников, а частично запасается в магнитном поле, созданном током. Далее, от момента t_2 до момента t_3 ток в цепи убывает и энергия магнитного поля также убывает. За этот промежуток времени на нагрев проводников расходуется не только энергия источника питания, но и энергия магнитного поля.

В промежуток времени $t_4 - t_3$ энергия от источника питания не поступает и ток в цепи поддерживается только за счет энергии, запасенной в магнитном поле. В этот промежуток времени энергия, запасенная в магнитном поле, расходуется на нагревание проводников и частично возвращается в источник. Количество энергии, возвращаемое в источник питания за время $t_4 - t_3 = t_\varphi$, пропорционально площади, ограниченной кривой мощности и осью абсцисс (нижняя кривая рисунка 21).

Таким образом, при наличии сдвига фаз тока по отношению к напряжению часть энергии источника питания не может быть полезно использована. Иначе говоря, не вся энергия, поступившая в цепь от источника питания, расходуется в этой цепи на нагрев (или на совершение механической работы). Чем больше угол сдвига фаз тока по отношению к напряжению, тем меньшее количество энергии полезно используется в цепи.

Процесс необратимого преобразования электрической энергии в другие виды энергии характеризуют величиной активной мощности.

Если при отсутствии сдвига фаз тока по отношению к напряжению средняя или активная мощность равна

$$P = UI,$$

то при наличии сдвига фаз для нахождения мощности необходимо правую часть последнего уравнения умножить на некоторый коэффициент k_p , меньший единицы и называемый коэффициентом мощности

$$P = UIk_p.$$

Коэффициент мощности, как показывают расчеты, численно равен косинусу угла сдвига фаз тока по отношению к напряжению

$$k_p = \cos \varphi.$$

Поэтому формулу активной мощности для цепи переменного тока можно записать в виде

$$P = UI \cos \varphi.$$

На основании закона сохранения энергии можно утверждать, что для любой цепи активная мощность генератора равна сумме активных мощностей всех токоприемников.

Реактивная мощность. Процесс накопления и возврата энергии магнитными полями, связанными с рассматриваемой цепью, характеризуют величиной, называемой реактивной мощностью и обозначаемой буквой Q . Величина реактивной мощности, как показывают расчеты, определяется формулой

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Единица измерения реактивной мощности получила название вольтампер реактивный и имеет сокращенное обозначение *вар*.

Следует иметь в виду, что в отличие от активной мощности величина реактивной мощности не определяет расхода энергии в цепи на нагрев проводников или на совершение механической работы. Она характеризует только скорость изменения энергии магнитных полей, связанных с цепью.

На основании закона сохранения энергии можно утверждать, что для любой цепи реактивная мощность генератора равна сумме реактивных мощностей всех токоприемников.

Полная мощность.

Электрические генераторы переменного тока рассчитываются для работы при определенных значениях напряжения.

Напряжение на зажимах генератора при любом режиме его работы поддерживается обычно неизменным. Величина тока генератора определяется нагрузкой и изменяется с изменением нагрузки.

Мощность генератора переменного тока принято характеризовать условной величиной S , представляющей собой произведение действующих значений напряжения и тока и называемой **полной мощностью**

$$S = UI.$$

Единица измерения полной мощности получила название вольтампер (киловольтампер) и имеет сокращенное обозначение *ва (кВа)*.

Полная мощность S при известных значениях активной P и реактивной Q мощностей может быть определена из выражения

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2},$$

так как

$$\sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(UI \cos \varphi)^2 + (UI \sin \varphi)^2} = UI.$$

Следует иметь в виду, что в общем случае полная мощность генератора не равна арифметической сумме полных мощностей всех токоприемников.

В заключение отметим, что коэффициент мощности токоприемников может быть определен через значения активной и реактивной мощностей по формуле

$$k_p = \cos \varphi = \frac{P}{UI} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

Из этого выражения видно, что коэффициент мощности может изменяться в зависимости от соотношения между величинами активной и реактивной мощностей в пределах от 1 до 0.

Измерение активной мощности.

При измерении активной мощности в цепи переменного тока необходимо учитывать возможный сдвиг фаз тока в нагрузке по отношению к напряжению. Активная мощность P не может быть измерена с помощью только амперметра и вольтметра, так как произведение их показаний дает значение полной мощности S без учета коэффициента мощности.

Для измерения активной мощности используют ваттметры.

Ваттметр.

Ваттметр — прибор электродинамической системы. Неподвижная катушка этого прибора включается в цепь нагрузки последовательно (рис. 22) и называется последовательной цепью ваттметра. Подвижная катушка вместе с добавочным сопротивлением R_d включается параллельно нагрузке и называется параллельной цепью ваттметра.

Величина тока I_1 в последовательной цепи ваттметра и сдвиг фаз этого тока по отношению к напряжению на зажимах параллельной цепи ваттметра определяются нагрузкой.

Ток I_2 в параллельной цепи ваттметра не зависит от тока в цепи нагрузки и определяется напряжением, действующим на зажимах нагрузки.

Величина вращающего момента электродинамического прибора в цепи постоянного тока, как известно, пропорциональна произведению токов в его катушках

$$M_{вр} = k_1 I_1 I_2.$$

В цепи переменного тока, в общем случае, когда токи в катушках различны по величине и по фазе, подвижная часть прибора будет перемещаться под действием среднего значения вращающего момента $M_{ср}$. Величина среднего значения вращающего момента за период, как показывают расчеты, пропорциональна произведению действующих значений токов в катушках на косинус угла сдвига фаз ϕ между ними, т. е.

$$M_{ср} = k_1 I_1 I_2 \cos \phi.$$

Ток в последовательной цепи является током нагрузки, то есть $I_1 = I$. Ток в параллельной цепи пропорционален напряжению, так как индуктивное сопротивление подвижной катушки мало в сравнении с очень большим активным сопротивлением R_d .

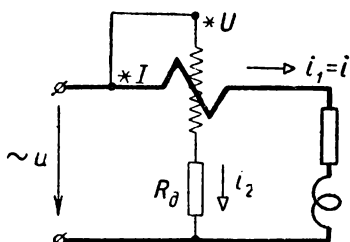


Рис. 22. Схема включения ваттметра.

Поэтому сопротивление параллельной цепи ваттметра считают чисто активным и равным R_V . При таком допущении ток в цепи подвижной катушки будет пропорционален напряжению. Тогда

$$I_2 = \frac{U}{R_V} = k_V U.$$

Кроме того, ток I_2 будет совпадать по фазе с напряжением. Поэтому угол ψ , характеризующий фазовый сдвиг токов в последовательной и параллельной цепях ваттметра, будет равен углу сдвига фаз φ , который характеризует фазовый сдвиг тока в нагрузке по отношению к напряжению на ее зажимах. После замены получим

$$M_{cp} = k_1 I_1 I_2 \cos \psi = k_1 k_V U I \cos \varphi.$$

Произведение $UI \cos \varphi$ представляет собой величину активной мощности P нагрузки. Поэтому

$$M_{cp} = k U I \cos \varphi = k P.$$

Таким образом, вращающий момент, действующий на подвижную катушку, а следовательно и показания ваттметра, включенного в цепь переменного тока, будут пропорциональны активной мощности.

Ваттметры электродинамической системы одинаково пригодны для измерения мощности как в цепях постоянного, так и в цепях переменного токов.

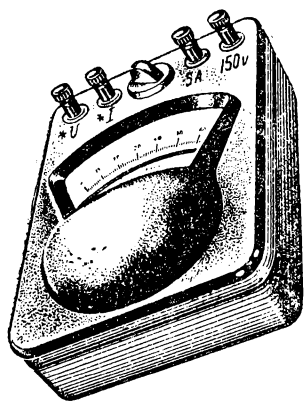


Рис. 23. Переносный ваттметр.

Направление вращающего момента электродинамического ваттметра зависит от направления токов в катушках. Если поменять местами зажимы одной из катушек, то вращающий момент вызовет отклонение подвижной части прибора в обратную сторону. Поэтому зажимы катушек размечают. Начала их обмоток на корпусе прибора обозначают звездочкой (*) и называют генераторными ж а з и м а м и (рис. 23). В названии подчеркивается, что при включении ваттметра в цепь, начала обмоток подключают к проводу, присоединенному к зажиму генератора (см. рис. 22).

Цена деления ваттметра.

Шкала ваттметра не всегда градуируется в ваттах. Часто цифрами обозначаются только деления шкалы. Обычно это ваттметры на несколько пределов измерения. Полное отклонение стрелки в таких ватт-

метрах наступает при номинальном токе I_H и номинальном напряжении U_H , если ток и напряжение совпадают по фазе. Чтобы определить цену деления ваттметра C_W , то есть число ватт, соответствующих одному делению, берут произведение номинальных значений I_H и U_H и делят его на число всех делений шкалы.

§ 9. ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГИИ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Способы учета электрической энергии.

Учитывать активную энергию W в цепях переменного тока можно, например, с помощью ваттметра и секундомера путем измерения активной мощности P нагрузки и времени t потребления энергии

$$W = Pt.$$

Однако при длительном включении нагрузки такой способ неудобен, поэтому на практике для измерения активной энергии переменного тока применяют индукционные счетчики.

Принцип действия индукционного счетчика.

Для уяснения принципа действия индукционного счетчика обратимся вначале к его простейшей модели, изображенной на рисунке 24.

Между полюсами двух неподвижно закрепленных электромагнитов 1 и 2 расположен легкий алюминиевый диск 3, который насажен на ось 4 и может свободно вращаться. Катушки электромагнитов питаются переменными токами. Токи в катушках создают переменные магнитные потоки, которые замыкаются по стальным сердечникам электромагнитов. Пронизывая алюминиевый диск, эти потоки наводят в нем вихревые токи. Взаимодействие вихревых токов с магнитными потоками создает вращающий момент, и диск начинает вращаться. Рассмотрим, при каких условиях и как происходит это взаимодействие.

Основным условием работы индукционного счетчика является наличие сдвига фаз между токами катушек электромагнитов.

Положим, что ток i_{II} в катушке второго электромагнита отстает по фазе по отношению к току i_I в катушке первого электромагнита на угол $\frac{\pi}{2}$. Тогда график изменения токов в катушках будет таким, каким он представлен на рисунке 25.

Если переменные токи в катушках электромагнитов смещены во времени на $\frac{1}{4}$ периода, то возбуждаемые ими переменные

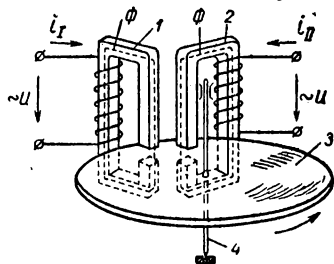


Рис. 24. Модель индукционного прибора с диском и двумя электромагнитами.

магнитные потоки Φ_1 и Φ_2 также сдвинуты во времени на $\frac{1}{4}$ периода (рис. 26): Условимся считать величины каждого из этих потоков положительными, когда они направлены от полюса

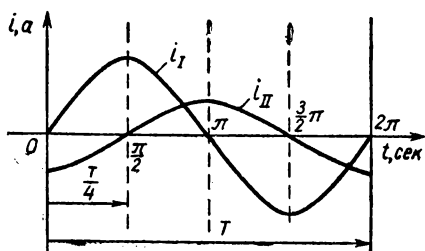


Рис. 25. Кривые мгновенных значений токов в катушках электромагнитов индукционного прибора.

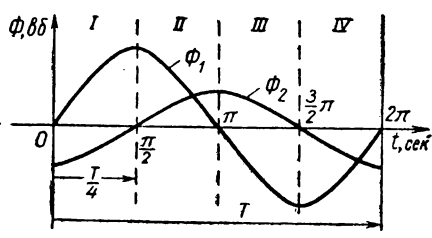


Рис. 26. Кривые мгновенных значений потоков, пронизывающих диск индукционного прибора.

электромагнита, расположенного над диском, к полюсу под диском, и отрицательными — при обратном направлении.

Вихревые токи в толще диска будут замыкаться по замкнутым линиям, охватывающим переменные магнитные потоки, возбуждаемые электромагнитами (рис. 27). Каждую из этих линий тока можно рассматривать как элементарный контур или кольцевой проводник. Мысленно выделим из большого множества таких элементарных кольцевых проводников два контура: первый из них пусть охватывает магнитный поток Φ_1 первого электромагнита и проходит через центр магнитного потока Φ_2 второго электромагнита, а второй, наоборот, охватывает магнитный поток Φ_2 и проходит через центр потока Φ_1 . Вихревой ток, создаваемый потоком Φ_1 и замыкающийся по первому контуру, обозначим через i_1 . Вихревой ток, создаваемый потоком Φ_2 и замыкающийся по второму контуру, обозначим через i_2 . Направление вихревых токов в диске можно определить, пользуясь известным правилом Ленца.

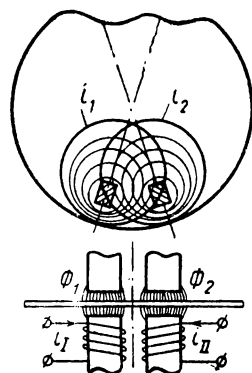


Рис. 27. Диск индукционного прибора с вихревыми токами.

Напомним, как следует применять правило Ленца.

Пусть кольцевой проводник (рис. 28, а) пронизывается переменным магнитным потоком Φ . Такой магнитный поток наведет в витке переменный ток i .

Согласно правилу Ленца индуцированный ток своим магнитным полем всегда стремится воспрепятствовать усилению или ослаблению внешнего магнитного потока, вызвавшего этот ток,

Согласно правилу Ленца индуцированный ток своим магнитным полем всегда стремится воспрепятствовать усилению или ослаблению внешнего магнитного потока, вызвавшего этот ток,

Пусть, например, внешний поток Φ возрастает. Тогда направление магнитного поля тока в витке должно быть противоположным возрастающему потоку Φ (рис. 28, б).

По направлению поля индуктированного тока в витке находят направление самого тока. Для этого удобно воспользоваться, например, правилом буравчика (рис. 28, в).

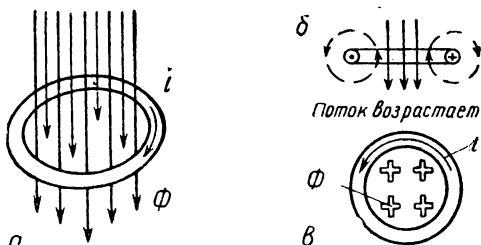


Рис. 28. неподвижный виток в переменном магнитном поле.

Путем аналогичных рассуждений можно убедиться, что при убывании внешнего потока направление тока в витке изменится. Ток будет направлен в обратную сторону.

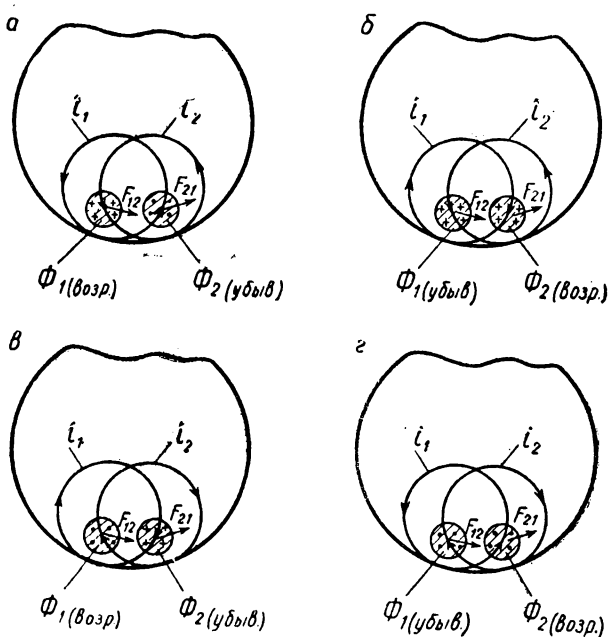


Рис. 29. Схема взаимодействия двух переменных магнитных потоков Φ_1 и Φ_2 с вихревыми токами i_1 и i_2 , наводимыми ими в диске индукционного прибора.

Руководствуясь этим правилом, определим направление вихревых токов i_1 и i_2 в диске (рис. 29).

Из рассмотрения графика (рис. 26) следует, что на протяжении первой четверти периода поток Φ_1 является положитель-

ным и возрастающим, а поток Φ_2 — отрицательным и убывающим. Направления потоков Φ_1 и Φ_2 отмечены на следах полюсов электромагнитов (рис. 29, а) знаками креста и точки.

Согласно правилу Ленца вихревой ток i_1 , создаваемый возрастающим положительным потоком Φ_1 , и вихревой ток i_2 , создаваемый убывающим отрицательным потоком Φ_2 , направлены в своих контурах противоположно движению стрелки часов.

Направления потоков и вихревых токов в диске во вторую, третью и четвертую четверти периода показаны соответственно на рисунке 29, б, в и г.

Каждый ток, индуцируемый в диске, вступает в силовое взаимодействие с «чужим» потоком: ток i_1 с потоком Φ_2 , а ток i_2 с потоком Φ_1 .

Направление электромагнитных сил F_{12} и F_{21} , возникающих при этом взаимодействии, определяется правилом левой руки и для всех четвертей периода оно будет неизменным, если фазы токов в катушках сдвинуты на $\pi/2$.

Таким образом, взаимодействие вихревых токов с «чужими» магнитными потоками приводит к возникновению результирующей силы, под действием которой диск непрерывно вращается.

**Устройство
индукцион-
ного
счетчика.**

Индукционный счетчик, устройство которого схематически показано на рисунке 30, состоит из двух электромагнитов 1 и 2, подвижного диска 4, постоянного тормозного магнита 5 и счетного механизма 3, представляющего собой счетчик оборотов, соединенный с осью прибора зубчатой передачей.

Подвижная часть в счетчике (диск) может вращаться вокруг своей оси.

Счетчик, как и ваттметр, имеет две отдельные цепи. Его включают в цепь нагрузки по такой же схеме, как и ваттметр (см. рис. 22).

Катушка электромагнита 1 наматывается толстым проводом и имеет малое число витков. Ее включают в цепь последовательно с нагрузкой и

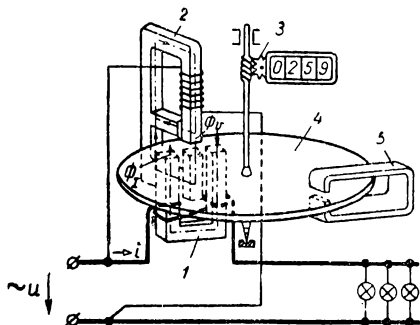


Рис. 30. Схема устройства однофазного индукционного счетчика.

называют токовой. Магнитный поток Φ_1 этой катушки будет пропорционален току I в нагрузке и совпадать с ним по фазе.

Катушка электромагнита 2 наматывается тонким проводом и имеет большое число витков. Ее включают параллельно нагрузке и называют катушкой напряжения. Ток I_V в ней пропорционален напряжению нагрузки, но из-за большого индуктивного

сопротивления катушки он отстает по фазе по отношению к напряжению на угол, почти равный $\frac{\pi}{2}$.

Наличие угла сдвига фаз между токами в катушках счетчика, как было показано выше, является необходимым условием вращения диска.

Величина вращающего момента $M_{вр}$ индукционного счетчика так же, как и ваттметра, пропорциональна произведению тока I в токовой катушке, напряжения U на зажимах катушки напряжения и косинуса угла сдвига фаз φ

$$M_{вр} = k_1 UI \cos \varphi = k_1 P.$$

Иначе говоря, вращающий момент индукционного счетчика всегда пропорционален активной мощности.

Для обеспечения равномерного вращения диска при работе счетчика, а также для остановки диска при выключении счетчика служит постоянный тормозной магнит.

При работе счетчика диск, находясь в зазоре постоянного магнита, пересекает линии поля магнита. В диске наводятся вихревые токи; их взаимодействие с полем магнита и создает тормозной момент, величина которого пропорциональна скорости вращения диска, измеренной числом оборотов в секунду

$$M_T = k_2 n.$$

Равномерное вращение диска наступит при равенстве вращающего и тормозного моментов

$$M_{вр} = M_T.$$

то есть

$$k_1 P = k_2 n,$$

откуда

$$n = \frac{k_1}{k_2} \cdot P = kP.$$

Таким образом, *скорость вращения диска пропорциональна активной мощности нагрузки.* Иначе говоря, о величине мощности нагрузки можно судить по скорости вращения диска счетчика

$$P = \frac{k_2}{k_1} \cdot n = Kn.$$

Если в течение времени t в цепи развивается мощность P , то израсходованная энергия W будет пропорциональна числу оборотов диска N , отсчитываемых счетным механизмом прибора за это же время,

$$W = Pt = Knt = KN.$$

Движение диска счетчика передается через червячную передачу и шестерни роликам, на боковой поверхности которых нанесены цифры от 0 до 9 (рис. 31). Ролики свободно насажены на ось. Они прикрыты щитком (рис. 32), через окно которого виден ряд цифр. Крайний ролик сцеплен с шестерней и при движении диска непрерывно вращается. Один его оборот вызывает

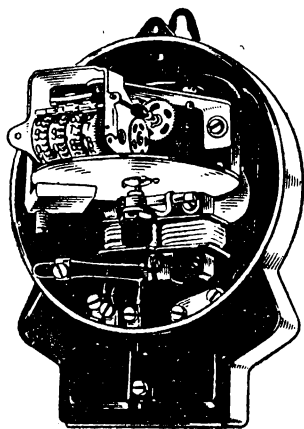


Рис. 31. Однофазный индукционный счетчик активной энергии.



Рис. 32. Внешний вид однофазного счетчика.

поворот второго ролика на $\frac{1}{10}$ часть оборота. Один оборот второго ролика поворачивает третий ролик также на $\frac{1}{10}$ оборота и т. д. Это позволяет отсчитать величину энергии, зарегистрированную счетчиком за время t .

Коэффициент пропорциональности K называют постоянной счетчика. Различают действительную K_d и номинальную K_n постоянные счетчика. Действительная постоянная

$$K_d = \frac{Pt}{N}.$$

Номинальная постоянная счетчика определяется по паспортным данным счетчика, указанным на его щитке. Например, на щитке написано «1 квт · ч = 2500 оборотов» (рис. 32). Тогда номинальная постоянная K_n счетчика будет равна

$$K_n = \frac{1000 \text{ вт} \cdot 3600 \text{ сек}}{2500 \text{ об}} = 1440 \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{об}}.$$

Погрешность счетчика. Счетчик электрической энергии, как и всякий измерительный прибор, обладает погрешностью. Погрешность измерения счетчика β определяется отношением

$$\beta = \frac{W_x - W}{W} \cdot 100\%$$

где W_x — значение энергии, отсчитанное по показанию счетчика; W — действительно израсходованная энергия за то же время. Энергия, действительно израсходованная в цепи, определяется при поверке счетчика с помощью образцового ваттметра и секундомера ($W = Pt$).

Величина, численно равная энергии, действительно израсходованной за один оборот диска счетчика, является действительной постоянной K_d счетчика.

Зная номинальную K_n и действительную K_d , постоянные счетчика, его относительную погрешность можно выразить иначе:

$$\beta = \frac{W_x - W}{W} \cdot 100\% = \frac{K_n N - K_d N}{K_d N} \cdot 100\% = \frac{K_n - K_d}{K_d} \cdot 100\%$$

По точности счетчики активной энергии делятся на три класса: 1; 2 и 2,5.

§ 10. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЙ

Способы измерения сопротивлений.

Электротехнические устройства и их детали, а также соединительные проводники обладают электрическим сопротивлением. Величины этих сопротивлений могут быть самыми различными: от долей ома до многих миллионов ом. Измерение сопротивлений необходимо при контроле, испытании и ремонте различных электротехнических устройств.

Электрические сопротивления измеряют тремя основными методами: 1) амперметра и вольтметра; 2) омметра и 3) с помощью измерительных мостов и потенциометров (мостовой метод).

Измерение сопротивлений с помощью измерительных мостов и потенциометров производится главным образом в лабораторных условиях, является специальным видом измерений и здесь не рассматривается.

Измерение сопротивлений с помощью амперметра и вольтметра, а также с помощью омметра основано на законе Ома. Так, если последовательно с измеряемым сопротивлением R_x включить амперметр (рис. 33), а параллельно — вольтметр, то

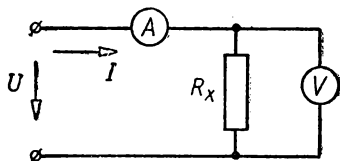


Рис. 33. Измерение сопротивления методом вольтметра и амперметра.

по показаниям этих приборов можно подсчитать величину сопротивления R_x по формуле

$$R_x = \frac{U}{I} \text{ ом.}$$

При измерении сопротивлений амперметром и вольтметром величину R_x нужно вычислять, что связано с затратой времени. В этом недостаток указанного способа измерения.

**Измерение
сопротивле-
ний
омметром.**

На практике большое распространение получил метод непосредственного измерения сопротивлений с помощью омметра.

Омметр — это прибор с измерительным механизмом магнитоэлектрической системы, имеющий собственный источник постоянного тока и снабженный шкалой, проградуированной в единицах сопротивления. Его стрелка непосредственно показывает величину сопротивления, присоединенного к зажимам прибора.

Принципиальная электрическая схема омметра может быть выполнена в двух вариантах: с последовательным и параллельным включением измеряемого сопротивления и измерительного механизма. В соответствии с этим различают омметры с последовательной и параллельной схемами.

**Омметр
с последова-
тельной
схемой.**

Простейшая схема омметра с последовательной схемой показана на рисунке 34, а. К источнику питания с напряжением U подключена цепь, состоящая из последовательно соединенных измеряемого сопротивления R_x , измерительного механизма магнитоэлектрической системы R_u и известного добавочного сопротивле-

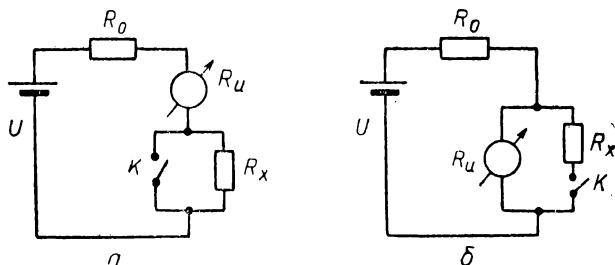


Рис. 34. Простейшие схемы омметров.

ния R_0 . Ток в такой цепи будет обратно пропорционален сопротивлению цепи, а угол отклонения стрелки прибора α будет равен

$$\alpha = kI = k \cdot \frac{U}{R_u + R_0 + R_x}.$$

Если напряжение U источника питания будет неизменным, то отклонение стрелки прибора будет зависеть только от сопротивления R_x .

При замыкании ключа K измеряемое сопротивление R_x закорачивается ($R_x = 0$) и отклонение стрелки прибора будет наибольшим. Когда измеряемое сопротивление R_x не подключено, а ключ K разомкнут (разрыв цепи) стрелка прибора будет находиться в начальном положении и отклоняться не будет. Если затем вместо R_x включить переменное образцовое сопротивление, то шкалу прибора можно проградуировать непосредственно в омах. Однако, если R_x мало по сравнению с сопротивлением катушки измерительного механизма $R_{и}$, то включение измеряемого сопротивления R_x не вызовет заметного изменения тока в цепи. Поэтому омметры с последовательной электрической цепью предназначены для измерения сравнительно больших сопротивлений (десятков, сотен и более ом).

**Омметр
с параллель-
ной схемой.**

Для измерения малых сопротивлений применяется схема, показанная на рисунке 34, б. Здесь измеряемое сопротивление подключается параллельно измерительному механизму. Как видно из схемы, ток в ветви измерительного механизма равен нулю, когда $R_x = 0$ (прибор оказывается закороченным) и достигает наибольшего значения при $R_x = \infty$ (сопротивление R_x не подключено).

На рисунке 35, а показан внешний вид омметра магнитоэлектрической системы, которым можно измерять сопротивления в широком диа-

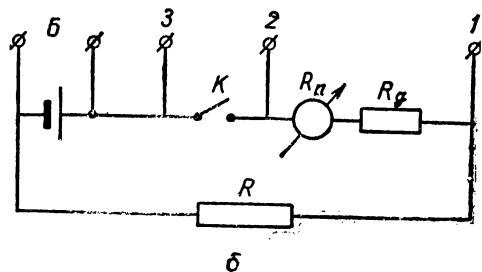
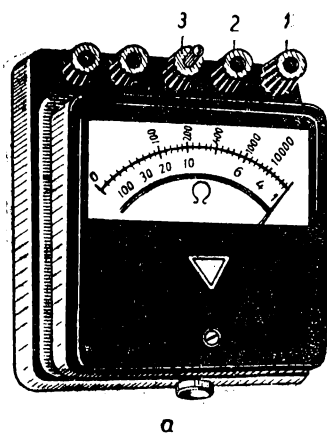


Рис. 35. Внешний вид омметра магнитоэлектрической системы (а) и его электрическая цепь (б).

пазоне величин. Нижние деления шкалы соответствуют пределу измерения сопротивления от 0 до 100 ом, а верхние — от 0 до 10 000 ом. Электрическая цепь такого омметра выполнена по схеме рисунка 35, б. Шкала прибора имеет два предела измерения. При измерении малых сопротивлений используют зажимы 1—2, подключая R_x параллельно измерительному механизму. При измерении сравнительно больших сопротивлений используют зажимы 2—3, подключая R_x последовательно измерительному механизму прибора.

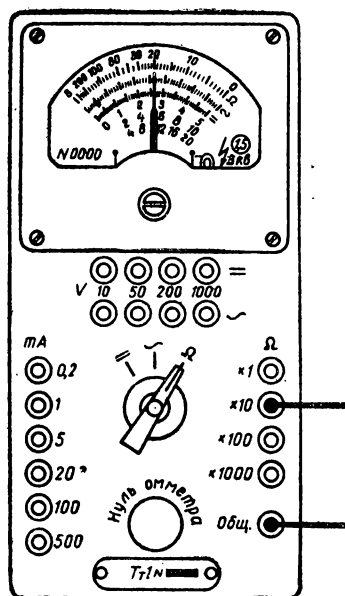


Рис. 36. Лицевая панель авометра.

Источником питания прибора служит гальванический элемент напряжением 1,4 в, который вложен в специальное гнездо в корпусе.

С течением времени напряжение элемента не остается постоянным, что сказывается на точности показаний омметра. Поэтому в приборе предусмотрено регулирующее сопротивление, величину которого изменяют при помощи рукоятки, расположенной на боковой стенке корпуса. Если напряжение отличается от того, при котором прибор градуировался, то при замыкании его зажимов ($R_x = 0$) стрелка прибора не будет устанавливаться на контрольную отметку «0» или «∞». Поворотом рукоятки изменяют регулирующее сопротивление до тех пор, пока стрелка не установится на контрольную отметку. Тогда показания прибора будут соответствовать действительным значениям измеряемой величины.

§ 11. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ТОКА И СОПРОТИВЛЕНИЯ УНИВЕРСАЛЬНЫМ ПРИБОРОМ

Авометр.

В настоящее время часто применяют переносный универсальный многопредельный прибор для измерения постоянного тока, постоянного и переменного напряжений, а также сопротивлений. Такой комбинированный прибор сокращенно называют авометром (по первым буквам названий измеряемых величин). Шкала авометра (рис. 36) имеет три ряда делений с обозначениями для постоянного тока (=), для переменного напряжения (~) и для сопротивления (Ω).

Авометр снабжен измерительным механизмом магнитоэлектрической системы. На монтажной панели смонтированы добавочные сопротивления и шунты, отводы от которых выведены к специальным гнездам на лицевой панели прибора. У каждого гнезда цифрами обозначены пределы измеряемых величин. В середине лицевой панели размещен переключатель рода измерения с обозначениями: «=», «~» и «Ω».

Включение авометра.

Схема авометра составлена так, что в случае измерения тока в цепь включается шунт, соответствующий заданному пределу измерения, а при измерении постоянного напряжения — добавочное сопротивление.

ние. Если измеряют переменное напряжение, то, кроме добавочного сопротивления, включается также полупроводниковый выпрямитель. При измерении сопротивлений используют оба варианта принципиальной схемы омметра — последовательную и параллельную.

К измеряемой цепи прибор подключают двумя цветными проводниками с наконечниками (штеккерами). Так, если надо измерить постоянное напряжение, переключатель рода измерений устанавливают в положение, обозначенное знаком «=». Наконечник одного из проводников вставляют в гнездо с надписью *общий*, наконечник второго проводника в верхнее гнездо, обозначенное буквой *U*, знаком «=» и числом, соответствующим выбранному пределу измерения. Свободные наконечники проводников подключают к тем точкам цепи, между которыми следует измерить напряжение. Такую же последовательность операций соблюдают, измеряя ток, переменное напряжение и сопротивление.

Упражнения и задачи

1. По графику поправок, приведенному на рисунке 15, определите действительное значение измеренного напряжения, если показания прибора соответственно были 10 в; 40 в; 55 в; 70 в; 135 в.
 Ответ: 11 в; 40 в; 53,5 в; 68 в; 137,5 в.

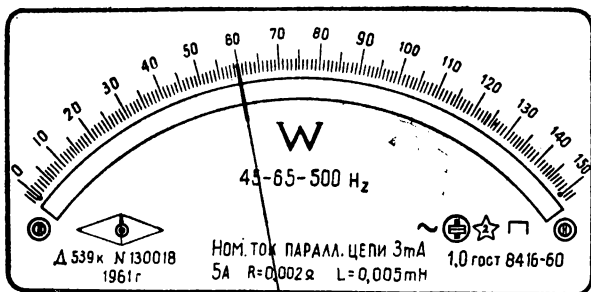


Рис. 37. К задаче № 3.

2. Чему равна относительная погрешность при измерении тока величиной $I = 3$ а, если ток измеряется двумя амперметрами класса 0,5, первый из которых имеет верхний предел измерения 5 а, а второй — 10 а?
 Ответ: 0,83 %; 1,66 %.

3. Определите, какую мощность указывает ваттметр, шкала которого изображена на рисунке 37, если номинальное напряжение $U_n = 300$ в.
 Ответ: 600 вт.

4. Ваттметр электродинамической системы с номинальным током $I_n = 5$ а, номинальными напряжениями $U_{n1} = 150$ в, $U_{n2} =$

$= 300$ в и шкалой на $a_n = 150$ делений включен в цепь с актив-
ноиндуктивной нагрузкой. Стрелка ваттметра отклонилась на
 $\alpha = 50$ делений. Чему равна мощность P нагрузки, если ток

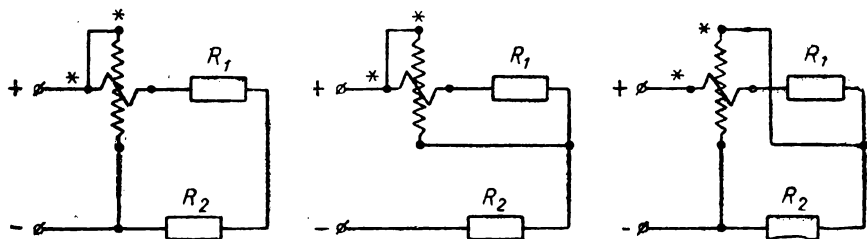


Рис. 38. К задаче № 5.

в цепи был $I = 4$ а, а напряжение на ее зажимах $U = 220$ в? Подсчитайте постоянные ваттметра на обоих пределах, а также $\cos \varphi$ нагрузки.

Ответ: $C_{w1} = 5$ вт/дел; $C_{w2} = 10$ вт/дел; $P = 500$ вт; $\cos \varphi \approx 0,6$.

5. Схемы рисунка 38 изображают различные виды включения ваттметра по отношению к сопротивлениям. Укажите в каждом отдельном случае, на каких сопротивлениях ваттметр измеряет мощность.

6. На рисунке 39 представлены фотографии щитка индукционного счетчика, сделанные с интервалом 30 дней. Определите номинальную постоянную счетчика и стоимость израсходованной энергии, зарегистрированной счетчиком за 30 дней, если стоимость 1 квт·ч равна 4 коп.

Ответ:

$$K_n = 1440 \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{об}}; 6 \text{ руб. } 38 \text{ коп.}$$

7. Определите номинальную постоянную счетчика K_n , его действительную постоянную K_d , абсолютную погрешность $\Delta K = K_n - K_d$ и относительную погрешность счетчика β , если при проверке счетчика при напряжении

$U = 120$ в и неизменной величине тока $I = 4$ а, диск счетчика сделал $N = 22$ оборота за время $t = 60$ сек.

Паспортные данные счетчика: номинальное напряжение $U_n = 120$ в, номинальный ток $I_n = 5$ а, 1 квт·ч соответствует 2500 об/диска.

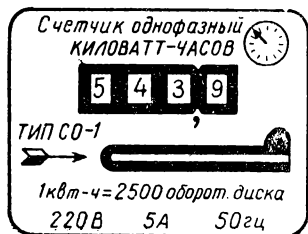
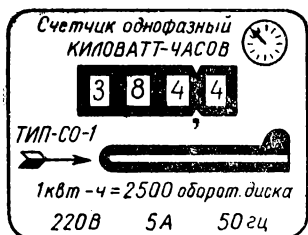


Рис. 39. К задаче № 6.

Ответ: $K_n = 1440 \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{об}}$; $K_d = 1309 \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{об}}$; $\Delta K = 131 \frac{\text{вт} \cdot \text{сек}}{\text{об}}$;
 $\beta \approx 10\%$.

8. На рисунке 36 изображена лицевая панель авометра. Укажите, в какие гнезда прибора следует вставить штыри с соединительными проводами и в каком положении должна находиться рукоятка переключателя при измерении этим прибором сопротивления 200 ом, постоянного тока 0,5 а и постоянного напряжения 300 в.

Определите постоянную прибора при измерениях тока и напряжения.

Ответ: $C_I = 10 \text{ ма/дел}$; $C_V = 20 \text{ в/дел}$.

Раздел второй

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ

ГЛАВА III

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

§ 12. ПРИНЦИП УСТРОЙСТВА МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Основные части машин. Машина постоянного тока, как и всякая электрическая машина, состоит из двух основных частей: неподвижной части — статора и вращающейся части — ротора. Статор предназначен для создания магнитного поля и является механическим остовом машины. Ротор машины постоянного тока принято называть якорем.

С помощью якоря механическая энергия вращательного движения преобразуется в электрическую энергию постоянного тока (или электрическая энергия — в механическую).

В машинах постоянного тока магнитное поле возбуждается либо постоянными магнитами, либо электромагнитами постоянного тока. Они устанавливаются на статоре и называются полюсами возбуждения.

Машина с кольцевым якорем. Изучение машин постоянного тока целесообразно начать с рассмотрения простейших машин, применявшихся в 80-х годах прошлого столетия. Хотя они и менее совершенны в техническом отношении, чем современные, однако никакой разницы в принципе действия этих машин нет.

На рисунке 40 изображена модель одной из машин постоянного тока. Ее статор изготовлен в форме стального кольца 1, на внутренней поверхности которого укреплены два постоянных магнита 2, обращенных своими полюсами противоположной полярности к внешней поверхности якоря. Якорь машины представляет собой стальное кольцо 3, плотно обмотанное по спирали изолированным проводом. Такой якорь называют *кольцевым*.

Концы спиральной обмотки 4 кольцевого якоря накоротко соединены друг с другом, образуя замкнутую цепь. Для создания электрического контакта подвижной обмотки якоря с внеш-

ней электрической цепью ее наружная поверхность зачищена от изоляции и на нее наложены угольные щетки 5. Щетки укрепляют в неподвижном щеткодержателе и соединяют с проводами внешней цепи.

Параллельные ветви обмотки якоря.

Представим себе, что якорь машины приведен во вращение в направлении движения часовой стрелки с постоянной скоростью, а внешняя цепь отключена от щеток.

При вращении обмотки ее проводники, расположенные на внешней поверхности кольцевого якоря, будут пересекать магнитные линии поля статора и в них наведется электродвижущая сила. Эти проводники обмотки называют активными проводниками.

В проводниках обмотки, расположенных на внутренней и торцовых сторонах якоря, э.д.с. наводиться не будет, так как они не пересекают магнитных линий поля. Эти проводники служат только для последовательного соединения активных проводников. Их называют соединительными проводниками.

Направление действия э.д.с. активных проводников может быть определено по известному из курса физики правилу «правой руки». Применяя это правило к рассматриваемому случаю, можно убедиться, что направление действия э.д.с. во всех проводниках, движущихся в зоне северного полюса, будет одинаковым, а именно — от переднего торца якоря к заднему. На рисунке это направление условно показано знаком креста (+).

Подобная картина будет наблюдаться и во второй половине обмотки, расположенной под горизонтальной плоскостью симметрии, однако с тем отличием, что э.д.с. всех проводников, движущихся в зоне южного полюса, действуют в направлении от заднего торца якоря к переднему. На рисунке это направление условно показано знаком точки (·).

В момент перехода активных проводников из зоны одного полюса в зону другого (в местах установки щеток) э.д.с. в них наводиться не будет, так как они лишь скользят вдоль магнитных линий, а не пересекают их.

Наложенные на якорь щетки делят его обмотку на две части с одинаковым числом последовательно соединенных активных проводников. Эти части обмотки называют параллельными ветвями.

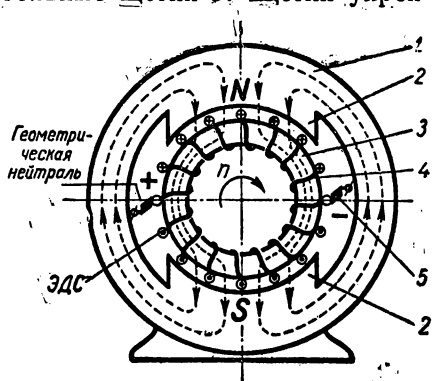


Рис. 40. Простейшая модель машины постоянного тока с кольцевым якорем.

Параллельные ветви вращающейся якорной обмотки образуются активными проводниками, которые в данное мгновение находятся в зоне одного из полюсов.

Несмотря на то, что э. д. с. в каждом активном проводнике вращающейся обмотки будет переменной, на щетках машины установится постоянное напряжение. Это объясняется тем, что направление действия э. д. с. в проводниках, образующих параллельную ветвь, сохраняется неизменным.

Поскольку обмотка симметрична, то э. д. с. одной параллельной ветви равна э. д. с. другой ветви. Направление действия этих э. д. с. по отношению к щеткам одинаково. Если, например, э. д. с. ветви, находящейся под северным полюсом, действует в направлении от правой щетки к левой (см. рис. 40), то э. д. с. ветви, находящейся под южным полюсом, также действует в направлении от правой щетки к левой. Поэтому напряжение на щетках численно будет равно э. д. с. одной ветви.

Параллельные ветви якорной обмотки образуют замкнутый контур, в котором суммарная э. д. с. равна нулю, так как в этом контуре э. д. с. параллельных ветвей действуют навстречу друг другу. Поэтому в контуре обмотки внутреннего тока не возникает.

Действие э. д. с. параллельных ветвей якорной обмотки (рис. 41, а) аналогично действию э. д. с. двух одинаковых параллельно соединенных аккумуляторов, включенных на нагрузку (рис. 41, б).

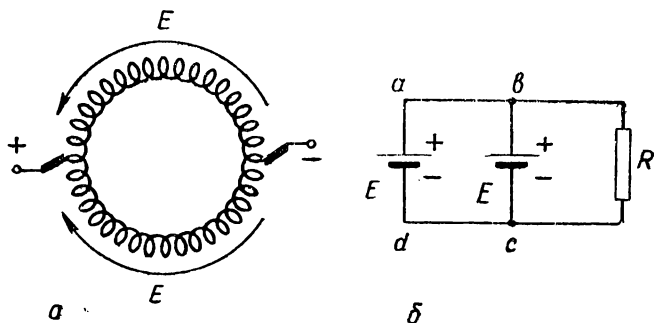


Рис. 41. Параллельное соединение источников постоянной э. д. с.:

а — ветвей вращающейся обмотки якоря; б — аккумуляторов.

Электродвижущие силы аккумуляторов действуют взаимно противоположно в контуре $a-b-c-d$, образованном двумя аккумуляторами, но они одинаково действуют относительно зажимов батареи или по отношению к нагрузке R . Если каждый из аккумуляторов развивает э. д. с. величиной равной, например, два вольта, то нагрузка будет находиться под действием постоянного напряжения также в два вольта. При отключении нагрузки ток в батарее будет отсутствовать.

Коллектор. В рассмотренной нами модели щетки прямо накладываются на обмотку якоря. Однако такой упрощенный способ присоединения щеток к местам стыка параллельных ветвей не применяют. Дело в том, что при прямом контакте щеток с оголенными проводниками обмотки последние будут быстро изнашиваться, загрязняться и могут замкнуться друг с другом.

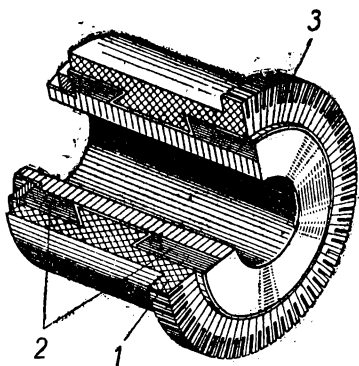


Рис. 42. Коллектор (разрез).

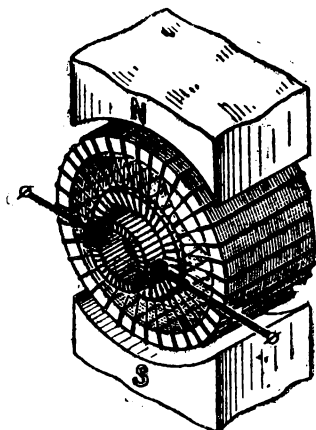


Рис. 43. Спиральная обмотка кольцевого якоря с коллектором.

Во всех машинах постоянного тока соединение щеток с обмоткой якоря осуществляют при помощи коллектора. Коллектор представляет собой устройство (рис. 42), состоящее из нескольких десятков медных пластин 1, изолированных друг от друга слюдяными прокладками. Пластины удерживаются обжимными шайбами 2. Каждая пластина коллектора имеет короткий выступ 3 — «петушок», к которому припаивают проводники, соединенные с витками якорной обмотки. Коллектор неподвижно укреплен на валу якоря и вращается вместе с якорем (рис. 43).

Щетки накладывают на коллектор в местах стыка параллельных ветвей. Таким образом, посредством коллектора и щеток обмотка якоря машины соединяется с внешней электрической цепью.

§ 13. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

<p>Работа машины в режиме генератора.</p>	<p>Машина постоянного тока может работать в двух режимах: генераторном и двигательном. Если машину привести во вращение каким-либо двигателем, а к щеткам присоединить нагрузку, то машина будет работать в режиме генератора (рис. 44). Под действием э. д. с. параллельных ветвей якорной обмотки в цепи</p>
--	--

нагрузки установится постоянный ток, равный сумме токов параллельных ветвей. В этом случае в каждом проводнике обмотки якоря э. д. с. и ток имеют одинаковое направление.

Появление тока в проводниках обмотки, вращающейся в неподвижном магнитном поле, сопровождается возникновением электромагнитных сил F , направление которых определяется правилом левой руки. Нетрудно убедиться, что все электромагнитные силы действуют на якорь машины в направлении, противоположном его вращению. Из этого можно заключить, что *машина постоянного тока, работающая в режиме генератора, создает противодействующий момент.*

Для поддержания тока в цепи двигатель должен непрерывно преодолевать противодействующий момент генератора.

**Работа
машины
в режиме
двигателя.**

Для осуществления двигательного режима работы машины постоянного тока необходимо на ее щетки подать напряжение от какого-либо внешнего источника питания, например аккумуляторной батареи (рис. 45).

Под действием э. д. с. внешнего источника питания в цепи машины установится ток, разветвляющийся по параллельным ветвям якорной обмотки. В рассматриваемом примере ток в каждом проводнике, расположенном на наружной поверхности якоря в зоне северного полюса, будет направлен от заднего торца якоря к переднему, а в зоне южного полюса — от переднего торца к заднему. Направления тока показаны стрелками на соединительных проводниках обмотки. Поскольку на каждый проводник с током, находящийся в магнитном поле, всегда действует электромагнитная сила F , то под действием этих сил

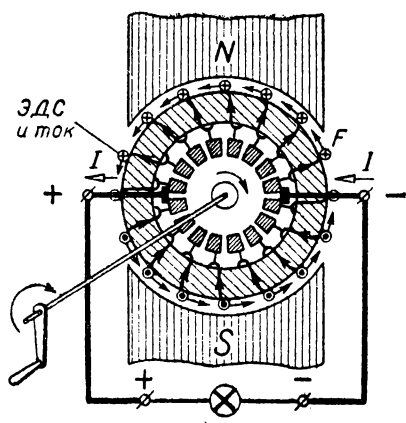


Рис. 44. Схема включения генератора постоянного тока.

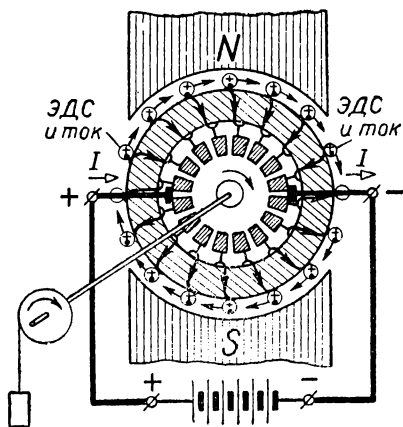


Рис. 45. Схема включения двигателя постоянного тока.

Ленц, Эмилий Христианович (1804—1865 гг.) — выдающийся русский физик, академик. Открыл закон теплового действия тока, сформулировал правило, определяющее направление индуктированного тока («правило Ленца»). Впервые доказал обратимость электрических машин — двигателей и генераторов. Разработал оригинальные методы электрических и магнитных измерений.



якорь двигателя придет во вращение и может совершать работу, например поднимать груз. Однако, как только якорь машины станет вращаться, в параллельных ветвях его обмотки наведется э. д. с.

Правило правой руки убеждает нас, что в каждом активном проводнике обмотки ток и э. д. с. направлены навстречу друг другу, а суммарные э. д. с. каждой из параллельных ветвей действуют навстречу э. д. с. внешнего источника питания. Из этого следует вывод: *машина постоянного тока, работающая в режиме электрического двигателя, создает противодействующую э. д. с. (противо-э. д. с.)*.

Величина противодействующей э. д. с. двигателя тем больше, чем выше скорость вращения его якоря. Противодействующая э. д. с. оказывает влияние на величину тока в цепи якоря: с ростом скорости вращения ток якоря уменьшается. При неподвижном якоре ток в его обмотке имеет наибольшее значение, так как противодействующая э. д. с. отсутствует.

Свойство обратимости. Электрическая машина постоянного тока может работать, следовательно, как в режиме генератора, так и в режиме двигателя.

Машина, работающая в режиме генератора, воспринимает механическую энергию вращательного движения и преобразует ее в электрическую энергию постоянного тока. Машина, работающая в режиме двигателя, наоборот, воспринимает электрическую энергию и преобразует ее в механическую. В этом и заключается основное свойство электрической машины.

Во всякой электрической машине направление преобразования энергии может быть изменено на обратное. Это свойство называют обратимостью электрической машины.

Следует иметь в виду, что хотя обратимость является неотъемлемым свойством любой электрической машины, однако обычно их рассчитывают для длительной работы либо в качестве генератора, либо в качестве двигателя.

§ 14. КОНСТРУКЦИЯ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

Барabanный якорь.

Кольцевой якорь со спиральной обмоткой в настоящее время не применяется, так как при спиральной обмотке более половины всей длины провода, обвивающего якорь, не участвует в образовании э. д. с. Наличие такого большого количества неактивной меди удорожает стоимость машины. Значительно лучше использована медь в обмотке барабанного якоря, применяемого в современных машинах. Барабанный якорь представляет собой цилиндр, собранный из листовой электротехнической стали (рис. 46). Вдоль образующих цилиндрической поверхности якоря делают канавки-пазы. В них размещают проводники обмотки, которая образуется путем последовательного соединения катушек, имеющих

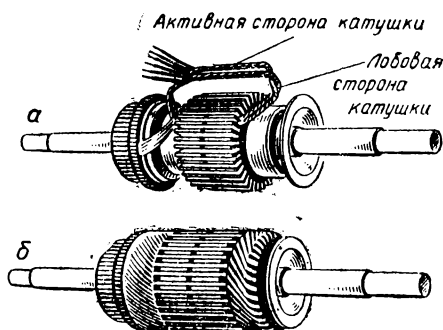


Рис. 46. Барабанный якорь:
а — якорь с одной катушкой; б — обмотанный якорь с коллектором.

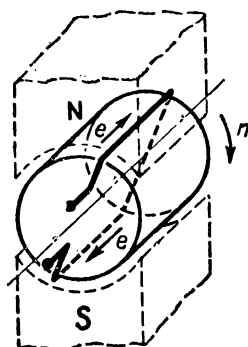


Рис. 47. Схема соединения активных проводников барабанного якоря.

несколько витков. Стороны катушек, расположенные в пазах якоря, называют активными сторонами.

Для того чтобы э. д. с. активных проводников, образующих отдельные витки, складывались друг с другом, активные стороны катушек размещают в пазах, расположенных под полюсами противоположной полярности (рис. 47).

Обмотка барабанного якоря так же, как и спиральная обмотка кольцевого якоря, представляет собой короткозамкнутую обмотку, состоящую из параллельных ветвей. Электрический контакт щеток с местами стыка параллельных ветвей осуществляется посредством коллектора. Для этого каждая пластина коллектора соединена с соответствующей катушкой.

Полюсы возбуждения.

Машины с постоянными магнитами на статоре имеют малую мощность, так как постоянные магниты возбуждают относительно слабое магнитное поле. В подавляющем большинстве современных машин магнитное поле возбуждается специальными электромагнитами постоянного тока — полюсами возбуждения.

Каждый полюс возбуждения состоит (рис. 48) из намагничивающей катушки 1 и стального сердечника 3, имеющего наконечник 2. Сердечники полюсов небольших машин отковываются из мягкой стали, а крупных машин — набираются из стальных пластин.

Полюсы крепятся на внутренней поверхности станины 4, которая изготовляется из чугуна или стали и имеет форму полого цилиндра. Кроме полюсов, к станине крепятся еще подшипниковые щиты, на одном из которых находится щеткодержатель.

Полюсные намагничивающие катушки машины обычно соединяют последовательно друг с другом, образуя обмотку возбуждения.

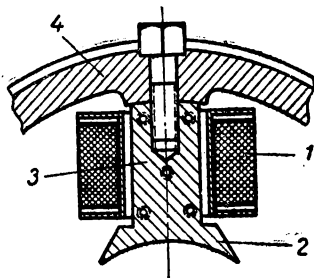


Рис. 48. Полюсный сердечник с намагничивающей катушкой.

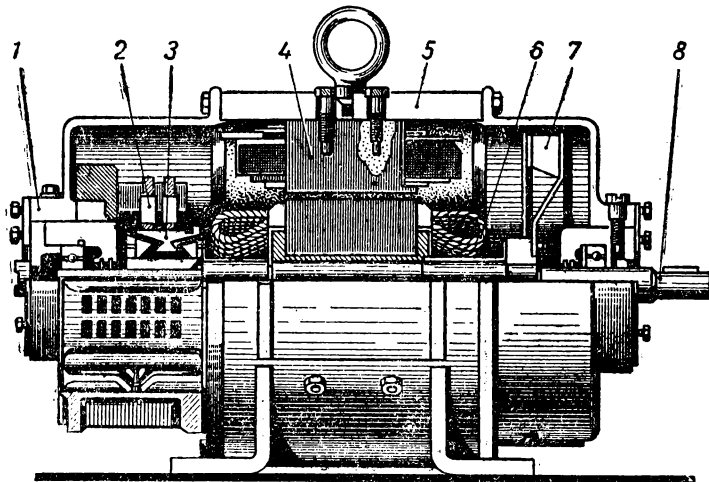


Рис. 49. Современная машина постоянного тока:

1 — подшипниковый щит; 2 — щеткодержатель со щеткой; 3 — пластинка коллектора; 4 — полюс возбуждения; 5 — станина; 6 — обмотка якоря; 7 — вентилятор; 8 — вал.

На рисунке 49 показано устройство современной машины постоянного тока.

Электромагнитное возбуждение дает возможность не только усиливать магнитное поле, но и управлять его интенсивностью. Для этого необходимо изменять величину постоянного тока в цепи обмотки возбуждения.

**Способы
соединения
обмоток якоря
и возбуждения.**

Цепь обмотки возбуждения может получать питание от специального источника постоянного тока и не иметь электрического соединения с обмоткой якоря. Такие машины называют машинами независимого возбуждения (рис. 50, а). Но обычно обмотка возбуждения имеет электрическое соединение с обмоткой якоря.

В зависимости от способа этого соединения различают три типа машин постоянного тока.

1. Машины параллельного возбуждения (шунтовые). Оба зажима обмотки возбуждения непосредственно присоеди-

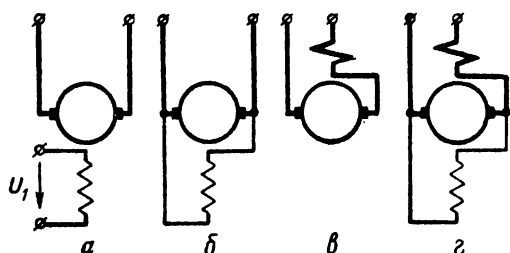


Рис. 50. Способы соединения обмотки возбуждения с обмоткой якоря машин постоянного тока.

обмоткой якоря (рис. 50, б). Полюсные катушки этих машин имеют мало витков из толстого провода.

2. Машины последовательного возбуждения (сериесные). Обмотка возбуждения включается последовательно с обмоткой якоря (рис. 50, в). Полюсные катушки этих машин имеют мало витков из толстого провода.

3. Машины смешанного возбуждения (компаундные). На каждом полюсном сердечнике этих машин имеется две полюсные катушки по типу шунтовой и сериесной. Шунтовая обмотка возбуждения компаундной машины соединяется параллельно якорной обмотке, а сериесная — последовательно (рис. 50, г).

Способ соединения обмотки возбуждения с обмоткой якоря оказывает сильное влияние на электрические свойства генераторов и механические свойства двигателей постоянного тока.

§ 15. ГЕНЕРАТОРЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Внешняя
характери-
стика.**

Одной из важнейших величин, характеризующих работу генератора, является напряжение на его щетках (или зажимах). Величина этого напряжения зависит от тока во внешней цепи. Такую зависимость принято изображать графически. *График зависимости напряже-*

ния генератора от тока в цепи нагрузки называют *внешней характеристикой генератора*. Внешняя характеристика строится для случая, когда скорость вращения якоря постоянна и равна номинальной, то есть указанной на щитке или в паспорте машины. Отметим, кстати, что все величины, указанные заводом-изготовителем в паспорте машины, называются *номинальными*. Рассмотрим внешние характеристики генераторов независимого и параллельного возбуждения.

Генератор независимого возбуждения.

В генераторе независимого возбуждения (рис. 51) полюсные катушки получают питание от вспомогательного источника постоянного напряжения. При вращении якоря в его обмотке наводится э. д. с.

Величина э. д. с. индукции, как известно, пропорциональна числу линий магнитного поля, пересекаемых движущимся проводником за одну секунду. Поэтому э. д. с. генератора E пропорциональна магнитному потоку полюса Φ и скорости вращения якоря (числу оборотов якоря в одну секунду — $\frac{n}{60}$), то есть

$$E = k\Phi \cdot \frac{n}{60} = C_E \Phi n,$$

где C_E — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции машины и выбранной системы единиц;
 n — скорость вращения якоря в об/мин.

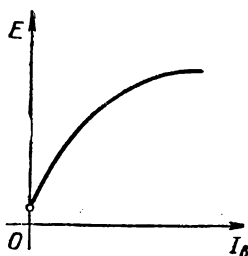


Рис. 52. Зависимость э. д. с. от тока возбуждения генератора.

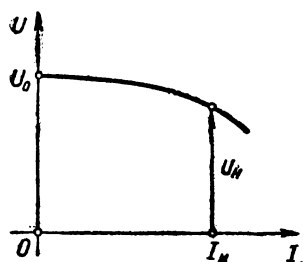


Рис. 53. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения.

Величина магнитного потока Φ , возбуждаемого полюсами, будет зависеть от величины тока в намагничивающих катушках. Поскольку э. д. с. E якорной обмотки при постоянной скорости

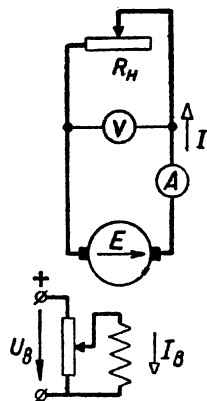
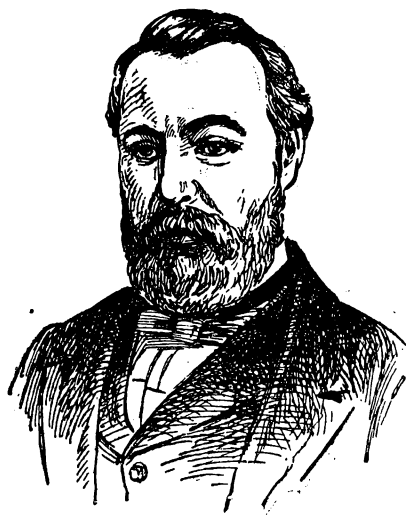


Рис. 51. Схема генератора независимого возбуждения.



Грамм, Зеноб Теофил (1826—1901 гг.) — сотрудник французской машиностроительной Компании «Альянс». Изобрел электрический генератор постоянного тока с самовозбуждением и кольцевым якорем (1870 г.). Эта машина была первым электрическим генератором промышленного типа.

вращения прямо пропорциональна потоку, то, изменяя ток в обмотке возбуждения, можно регулировать э. д. с. генератора. Зависимость э. д. с. генератора от тока возбуждения представлена на рисунке 52.

Если к щеткам генератора подключить нагрузку, то напряжение на его зажимах будет меньше э. д. с. E на величину внутреннего падения напряжения в сопротивлении $r_{\text{я}}$ обмотки якоря, создаваемом током нагрузки I .

$$U = E - Ir_{\text{я}}.$$

С ростом нагрузки ток I во внешней цепи генератора соответственно увеличивается, а внутреннее падение напряжения $Ir_{\text{я}}$ возрастает. Благодаря этому напряжение на зажимах генератора уменьшается, однако незначительно, так как сопротивление обмотки якоря очень мало. При номинальном токе $I_{\text{н}}$ нагрузки и номинальном токе возбуждения напряжение на щетках генератора также будет номинальным $U_{\text{н}}$. Внешняя характеристика генератора независимого возбуждения показана на рисунке 53.

Генератор параллельного возбуждения (см. рисунок 50, б) для своей работы не требует вспомогательного источника питания. Ток в обмотке возбуждения такого генератора возникает в процессе самовозбуждения.

Рассмотрим процесс возбуждения магнитного поля в машине. После изготовления машины на заводе ее магнитную цепь предварительно намагничивают, подключая обмотку возбуждения к источнику постоянного тока. При отключении обмотки возбуждения в сердечниках полюсов статора и якоря сохра-

няется слабая намагниченность. Слабое магнитное поле, сохраняющееся в магнитной цепи машины, называют полем остаточного намагничивания. Если теперь привести якорь во вращение (рис. 54), то в параллельных ветвях обмотки якоря поток остаточного намагничивания $\Phi_{ост}$ наведет весьма слабую э. д. с. $E_{ост}$ (несколько вольт). Однако она достаточна для того, чтобы вызвать в цепи обмотки возбуждения, подключенной к якорю, начальный ток. Начальный ток возбуждения намагничивает полюсы. Поток возбуждения Φ_v растет, а вместе с ним увеличивается и э. д. с. якорной обмотки. Вслед за этим ток возбуждения опять увеличится, магнитный поток и э. д. с. снова возрастут и т. д. В этом и заключается процесс самовозбуждения.

Возрастание тока возбуждения I_v и увеличение э. д. с. E обмотки якоря прекратятся, как только э. д. с., развиваемая машиной, станет равной падению напряжения в цепи обмотки возбуждения и якоря, обладающей сопротивлением $R_v + r_a$, то есть когда

$$E = I_v (R_v + r_a).$$

При этом магнитная цепь машины еще не достигнет состояния насыщения.

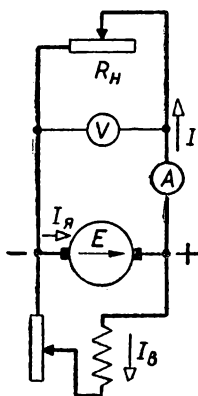


Рис. 55. Схема генератора параллельного возбуждения.

Вместе с этим закончится процесс самовозбуждения: э. д. с., развиваемая машиной, работающей вхолостую, и ток в цепи ее обмотки возбуждения будут

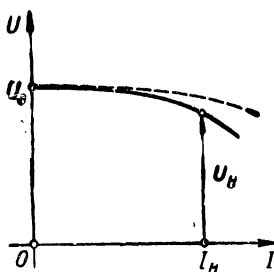


Рис. 56. Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения.

неизменными. Величину э. д. с. генератора можно изменять введением регулировочного реостата в цепь обмотки возбуждения.

Если к возбужденному генератору подключить нагрузку (рис. 55), то напряжение на его щетках уменьшится. Происходит это по двум причинам. Во-первых, вследствие падения напряжения в обмотке якоря (так же, как и в генераторе независимого возбуждения); во-вторых, из-за уменьшения э. д. с. якоря. Э. д. с. якоря уменьшается вследствие ослабления магнитного потока, так как ток возбуждения зависит от напряжения на щетках генератора.

Внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения изображена на рисунке 56 сплошной линией. Для сравнения там же показана внешняя характеристика генератора независимого возбуждения (пунктирная линия).

§ 16. ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Механическая характеристика. Важнейшими величинами, характеризующими работу двигателя, являются скорость вращения его якоря и развиваемый им момент электромагнитных сил. Зависимость между ними обычно изображают графически. *График зависимости скорости вращения ротора (якоря) двигателя от развиваемого им вращающего момента называется механической характеристикой электрического двигателя.*

Механические свойства двигателя постоянного тока зависят от способа соединения его обмотки возбуждения с обмоткой якоря. Ограничимся рассмотрением механической характеристики двух типов двигателей постоянного тока: независимого и последовательного возбуждения.

Двигатель независимого возбуждения. В двигателе независимого возбуждения (рис. 57) полюсные катушки получают питание от вспомогательного источника постоянного тока. Прежде чем включить обмотку якоря двигателя в сеть, необходимо в цепи обмотки возбуждения установить номинальный ток. Тем самым магнитный поток каждого полюса будет иметь также номинальное значение Φ_n . Теперь обмотку якоря можно включить в питающую сеть постоянного тока. В первый момент пуска якорь машины неподвижен, а следовательно, противодействующая э. д. с. не создается. Если обмотку неподвижного якоря, обладающую малым сопротивлением $r_{я}$, включить непосредственно под полное напряжение U сети, то ток в якоре $I_{пуск}$ будет чрезмерно большим, так как сопротивление якорной обмотки составляет единицы или даже доли ома

$$I_{пуск} = \frac{U}{r_{я}}.$$

Большой ток в якоре может оказать пагубное действие на коллектор и обмотку якоря. Поэтому последовательно с якорем включают реостат (пусковой реостат), который ограничивает

ток в цепи якоря до допустимых значений. Обычно сопротивление пускового реостата $R_{\text{п}}$ выбирают таким, чтобы пусковой ток $I_{\text{пуск}}$ был больше номинального лишь в 1,1—1,5 раза

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U}{r_{\text{я}} + R_{\text{п}}} = (1,1 \div 1,5) I_{\text{н}}.$$

Как только якорь придет во вращение, то в его обмотке возникнет противо-э. д. с., уменьшающая ток в якоре

$$I = \frac{U - E}{r_{\text{я}} + R_{\text{п}}}.$$

По мере нарастания скорости вращения якоря величина противо-э. д. с. возрастает и для поддержания тока, обеспечивающего заданный вращающий момент, необходимо вывести пусковой реостат.

Когда пусковой реостат будет полностью выведен, ток в цепи якоря станет равным

$$I = \frac{U - E}{r_{\text{я}}}.$$

Наращение скорости вращения якоря, а следовательно, противодействующей э. д. с. E происходит до тех пор, пока вращающий момент $M_{\text{в}}$, действующий на якорь, не станет равным тормозному моменту $M_{\text{т}}$, который создается устройством, приводимым в движение данным электрическим двигателем (станком, генератором, лифтом и т. д.). Механическое равновесие вращающего и тормозного моментов является непрерывным условием равномерного вращательного движения.

Величина вращающего момента $M_{\text{вр}}$ двигателя пропорциональна величине электромагнитных сил ($F = BI$), действующих на якорь. Так как радиус якоря величина постоянная, а магнитная индукция является функцией магнитного потока, то

$$M_{\text{вр}} = C_{\text{м}} \Phi I,$$

где $C_{\text{м}}$ — коэффициент пропорциональности, зависящий от конструкции машины и выбранной системы единиц.

Поэтому равенство вращающего и тормозного моментов можно записать в следующей форме:

$$M_{\text{вр}} = C_{\text{м}} \Phi I = M_{\text{т}},$$

откуда

$$I = \frac{M_{\text{т}}}{C_{\text{м}} \Phi}.$$

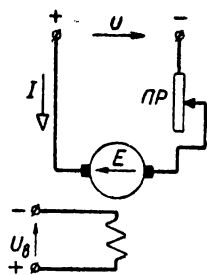


Рис. 57. Схема двигателя независимого возбуждения.

Таким образом, величина тока в цепи равномерно вращающегося якоря двигателя при постоянном магнитном потоке зависит только от величины тормозного момента. Зависимость тока якоря от момента нагрузки показана на рисунке 58. При номинальном моменте M_n на валу двигателя ток в цепи якоря будет также номинальным I_n .

Из выражений $E = C_E \Phi n$ и $I = \frac{U - E}{r_a}$ легко получить уравнение скорости вращения якоря двигателя постоянного тока:

$$n = \frac{U - I r_a}{C_E \Phi}.$$

Падение напряжения в обмотке якоря $I r_a$ незначительно даже при номинальном токе, так как сопротивление якоря мало. Магнитный поток Φ постоянен и не зависит от нагрузки. Поэтому скорость вращения якоря двигателя независимого возбуждения практически определяется напряжением сети и мало изменяется с увеличением тормозного момента (нагрузки).

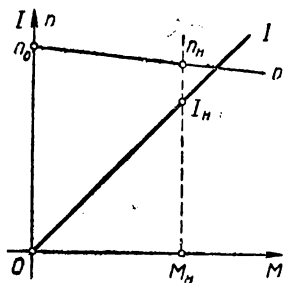


Рис. 58. Механическая характеристика и характеристика тока в обмотке якоря двигателя независимого возбуждения.

Механическая характеристика двигателя независимого возбуждения изображена на графике рисунка 58.

Уравнение скорости вращения якоря двигателя независимого возбуждения, приведенное выше, показывает, что регулировать скорость, то есть изменять ее при заданной механической нагрузке на валу, можно двумя способами: 1) изменяя напряжение на зажимах якоря (при уменьшении напряжения скорость вращения снижается); 2), ослабляя магнитный поток полюсов путем уменьшения тока в цепи обмотки возбуждения (при уменьшении тока возбуждения скорость вращения двигателя возрастает).

Для изменения направления вращения якоря двигателя постоянного тока — реверсирования — достаточно изменить направление тока либо в обмотке якоря, либо в обмотке возбуждения. В справедливости этого можно легко убедиться, применив правило левой руки.

Обмотка якоря и обмотка возбуждения рассмотренного двигателя могут быть подключены на общий источник питания. В этом случае обмотка возбуждения оказывается включенной параллельно якорю (см. рис. 50, б). Характеристики двигателя параллельного возбуждения аналогичны характеристикам двигателя независимого возбуждения.

**Двигатель
последова-
тельного
возбуждения.**

Обмотка возбуждения этого двигателя соединена последовательно с обмоткой якоря (рис. 59), благодаря чему ток якоря I является одновременно намагничивающим током, то есть током возбуждения.

Для ограничения пускового тока этот двигатель снабжается пусковым реостатом $ПР$, который в момент пуска полностью вводится в цепь якоря и обмотки возбуждения, а затем, по мере нарастания скорости вращения и противодействующей э. д. с., постепенно выводится.

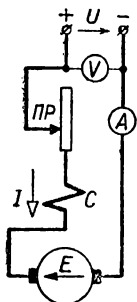


Рис. 59. Схема двигателя последовательного возбуждения.

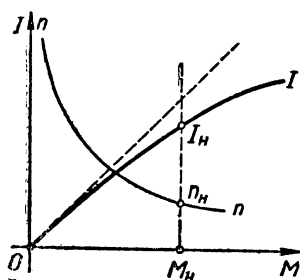


Рис. 60. Механическая характеристика и характеристика тока в обмотке якоря двигателя последовательного возбуждения.

При равномерном вращении якоря вращающий и тормозной моменты будут взаимно уравновешены:

$$M_{\text{вр}} = C_M \Phi I = M_T.$$

Но в двигателе последовательного возбуждения магнитный поток Φ зависит от тока якоря I . Если допустить, что поток полюса пропорционален намагничивающему току, то есть

$$\Phi = kI,$$

то уравнение моментов получит следующий вид:

$$M_{\text{вр}} = k_M I^2 = M_T,$$

откуда

$$I = \sqrt{\frac{M_T}{k_M}}.$$

Следовательно, величина тока в цепи равномерно вращающегося якоря двигателя последовательного возбуждения определяется только величиной тормозного момента, создаваемого механической нагрузкой на его валу.

График зависимости тока якоря от момента, развиваемого двигателем последовательного возбуждения, изображен на рисунке 60. Для сравнения на этом графике показана зависимость тока якоря от момента, развиваемого двигателем независимого возбуждения (пунктирная линия). В отличие от двигателя независимого (или параллельного) возбуждения ток в цепи якоря двигателя последовательного возбуждения с увеличением нагрузки на его валу возрастает относительно медленно. Следовательно, при одном и том же моменте на валу ток в цепи якоря двигателя последовательного возбуждения будет меньше тока в цепи якоря двигателя независимого возбуждения. Это является ценным свойством двигателя последовательного возбуждения.

Применительно к двигателю последовательного возбуждения уравнение скорости целесообразно записать в следующем виде:

$$n = \frac{U - I r_{\text{я}}}{C_E \Phi} = \frac{U - I r_{\text{я}}}{C_E k_M I}.$$

Из этого уравнения следует, что скорость вращения якоря такого двигателя почти обратно пропорциональна току, так как падение напряжения $I r_{\text{я}}$ незначительно увеличивается с ростом нагрузки.

Итак, в двигателе последовательного возбуждения вращающий момент приблизительно пропорционален квадрату тока, а скорость вращения якоря — обратно пропорциональна току. Зависимость между скоростью вращения якоря двигателя последовательного возбуждения и развиваемым им моментом показана на рисунке 60. Из рассмотрения графика рисунка следует, что изменение момента, создаваемого нагрузкой, сильно сказывается на скорости вращения якоря двигателя. При нагрузках, меньших примерно одной четверти от номинальной, якорь вращается с недопустимо большой для механической целостности машины скоростью. Как говорят, двигатель «идет вразнос». По этой причине такие двигатели никогда не соединяют с приводимыми ими в движение машинами посредством ременной передачи.

Применяются двигатели последовательного возбуждения для электрической тяги (трамвай, метро, электрические железные дороги) и в крановых механизмах.

Упражнения и задачи

1. По данным, содержащимся на паспортном щитке машины (рис. 61), определите ее электрическую мощность и к.п.д. Нарисуйте электрическую схему машины.

Ответ: $P \approx 5,4 \text{ кВт}$; $\eta = 0,76$.

2. На рисунке 62 дана упрощенная схема двигателя. Направление тока в проводниках якорной обмотки условно показано знаками (+) и (·). Определите направление вращения якоря.

3. На рисунке 63 показана неполная схема для реверсирования якоря двигателя. Дополните ее таким образом, чтобы реверсирование можно было бы производить путем изменения направления тока в обмотке якоря.

Завод Динамо им. Кирова			
Москва 1952г.			
Двигатель постоянного тока			
Госг	184-47	Зав. №	370390
Тип	ПН-10	Кат. №	РП 1067
кВт	4,1	ПВ%	25
Ампер	49	Вольт	110
об/мин	1450	Возбужд	ПАРАЛ
шунт. сьм.	110	V	ВЕС
			185

Рис. 61. К задаче № 1.

4. Генератор независимого возбуждения имеет следующие данные:

$$U_n = 115 \text{ в}; I_n = 15 \text{ а}; r_a = 0,2 \text{ ом}.$$

Определите напряжение на зажимах генератора при отсутствии нагрузки, если его якорь вращается с неизменной скоростью.

Ответ: $U_0 = 118 \text{ в}.$

5. Как изменится скорость вращения якоря двигателя неза-

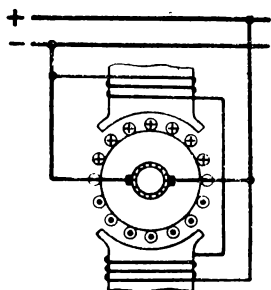


Рис. 62. К задаче № 2.

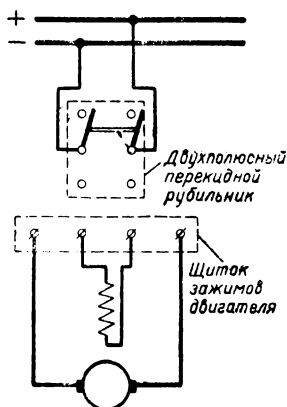


Рис. 63. К задаче № 3.

висимого возбуждения при уменьшении тока возбуждения, если тормозной момент нагрузки не изменяется?

6. Определите величину сопротивления пускового реостата, вводимого в цепь якоря двигателя независимого возбуждения, если он включается в сеть с напряжением $U_n = 110 \text{ в}$; сопротивление якоря $r_a = 0,2 \text{ ом}$, а пусковой ток не должен превышать 25 а .

Ответ: $R_{пр} = 4,2 \text{ ом}.$

ГЛАВА IV

ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

§ 17. ЭЛЕМЕНТЫ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ

Трехфазный генератор.

В настоящее время электрическая энергия переменного тока вырабатывается, передается и распределяется между отдельными токоприемниками в системе трехфазных цепей.

Системой трехфазных цепей называют такую совокупность электрических цепей, в которой токоприемники получают питание от общего трехфазного генератора.

Трехфазным называется такой генератор, который имеет обмотку, состоящую из трех частей. Каждая часть этой обмотки называется **фазой**. Поэтому эти генераторы и получили название трехфазных.

Следует отметить, что термин «фаза» в электротехнике имеет два значения: 1) в смысле определенной стадии периодического колебательного процесса и 2) как наименование части электрической цепи переменного тока (например, часть обмотки электрической машины).

Для уяснения принципа действия трехфазного генератора обратимся к модели, схематически изображенной на рисунке 64.

Модель состоит из статора, изготовленного в виде стального кольца, и ротора — постоянного магнита. На кольце статора расположена трехфазная обмотка с одинаковым числом витков в каждой фазе. Фазы обмотки смещены в пространстве одна относительно другой на угол 120° .

Представим себе, что ротор модели генератора приведен во вращение с постоянной скоростью против движения часовой стрелки. Тогда, вследствие непрерывного движения полюсов постоянного магнита относительно проводников обмотки статора, в каждой ее фазе будет наводиться э. д. с.

Применяя правило правой руки, можно убедиться, что э. д. с., наводимая в фазе обмотки северным полюсом вращающегося магнита, будет действовать в одном направлении, а наводимая южным полюсом — в другом. Следовательно, э. д. с. фазы генератора будет переменной.

Крайние точки (зажимы) каждой фазы генератора всегда размечают: одну крайнюю точку фазы называют началом, а дру-

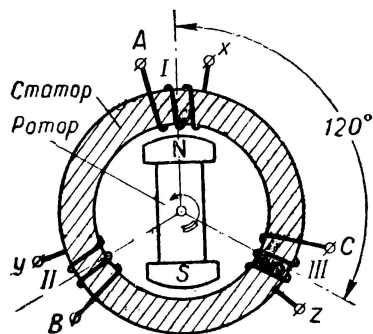


Рис. 64. Схема трехфазного генератора.

гую — концом. Начала фаз обозначают латинскими буквами *A*, *B*, *C*, а концы их соответственно — *X*, *Y*, *Z*. Наименования «начало» и «конец» фазы дают, руководствуясь следующим правилом: *положительная э. д. с. генератора действует в направлении от конца фазы к ее началу.*

Э. д. с. генератора условимся считать положительной, если она наведена северным полюсом вращающегося магнита. Тогда разметка зажимов генератора для случая вращения его ротора против движения часовой стрелки должна быть такой, как показано на рисунке 64.

При постоянной скорости вращения полюсов ротора амплитуда и частота э. д. с., создаваемых в фазах обмотки статора, сохраняются неизменными. Однако в каждое мгновение величина и направление действия э. д. с. одной из фаз отличаются от величины и направления действия э. д. с. двух других фаз. Это объясняется пространственным смещением фаз. Все явления во второй фазе повторяют явления в первой фазе, но с опозданием. Говорят, что э. д. с. второй фазы отстает во времени от э. д. с. первой фазы. Они, например, в разное время достигают своих амплитудных значений. Действительно, наибольшее значение э. д. с., наведенной в какой-либо фазе, будет в тот момент, когда центр полюса ротора проходит середину этой фазы. В частности, для момента времени, соответствующего расположению ротора, показанному на рисунке 64, электродвижущая сила первой фазы генератора будет положительной и максимальной. Положительное максимальное значение э. д. с. второй фазы наступит позже, когда ротор повернется на угол 120° . Поскольку за один оборот двухполюсного ротора генератора происходит полный цикл изменения э. д. с., то время T одного оборота является периодом изменения э. д. с. Очевидно, что для поворота ротора на 120° необходимо время, равное одной трети периода $\left(\frac{T}{3}\right)$.

Следовательно, все стадии изменения э. д. с. второй фазы наступают позже соответствующих стадий изменения э. д. с. первой фазы на одну треть периода. Такое же отставание в периодическом изменении э. д. с. наблюдается в третьей фазе по отношению ко второй. Само собой разумеется, что по отношению к первой фазе периодические изменения э. д. с. третьей фазы совершаются с опозданием на две трети периода $\left(\frac{2}{3} T\right)$.

Путем придания соответствующей формы полюсам магнитов можно добиться изменения э. д. с. во времени по закону, близкому к синусоидальному.

Следовательно, если изменение э. д. с. первой фазы генератора происходит по закону синуса

$$e_1 = E_m \sin \omega t,$$

то закон изменения э. д. с. второй фазы может быть записан формулой

$$e_2 = E_m \sin \omega \left(t - \frac{T}{3} \right),$$

а третьей — формулой

$$e_3 = E_m \sin \omega \left(t - \frac{2}{3} T \right).$$

Сказанное иллюстрирует график рисунка 65.

Таким образом, можно сделать следующий вывод: при равномерном вращении полюсов ротора во всех трех фазах генератора наводятся переменные э. д. с. одинаковой частоты и амплитуды, периодические изменения которых по отношению друг к другу совершаются с запаздыванием на $\frac{1}{3}$ периода.

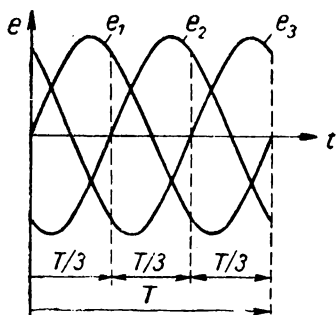


Рис. 65. Кривые мгновенных значений трехфазной системы э. д. с.

Трехфазные токоприемники. Трехфазный генератор служит источником питания как однофазных,

так и трехфазных электрических устройств. Однофазные токоприемники, как известно, имеют два внешних зажима. К ним относятся, например, осветительные лампы, различные бытовые приборы, электродвигатели

с однофазной обмоткой.

Трехфазные устройства в общем случае имеют шесть внешних зажимов. Каждое такое устройство состоит из трех, обычно одинаковых, электрических цепей, которые называются фазами. Примерами трехфазных токоприемников могут служить электрические дуговые печи с тремя электродами или электродвигатели с трехфазной обмоткой.

§ 18. СПОСОБЫ СОЕДИНЕНИЯ ФАЗ ГЕНЕРАТОРА И ТОКОПРИЕМНИКОВ

Несвязанная и связанная трехфазные цепи.

Трехфазную цепь называют несвязанной, если каждая фаза генератора независимо от других соединена двумя проводами со своим токоприемником (рис. 66). Основным недостатком несвязанной

трехфазной цепи заключается в том, что для передачи энергии от генератора к приемникам нужно применять шесть проводов. Число проводов может быть уменьшено до четырех или даже до трех, если фазы генератора и токоприемников соеди-

нить между собой соответствующим способом. В этом случае трехфазную цепь называют связанной трехфазной цепью.

На практике почти всегда применяют связанные трехфазные цепи, как более совершенные и экономичные. Существует два основных способа соединения фаз генератора и фаз приемников: соединение звездой и соединение треугольником.

Соединение фаз генератора звездой.

При соединении фаз генератора звездой (рис. 67, а) все «концы» фазных обмоток X, Y, Z соединяют в одну общую точку O , называемую нейтральной* или нулевой точкой генератора.

На рисунке 67, б схематически показаны три фазы генератора в виде катушек, оси которых смещены в пространстве одна относительно другой на угол 120° .

Напряжение между началом и концом каждой фазы генератора называют фазным напряжением, а между началами фаз — линейным.

Поскольку фазные напряжения изменяются во времени по синусоидальному закону, то линейные напряжения также будут

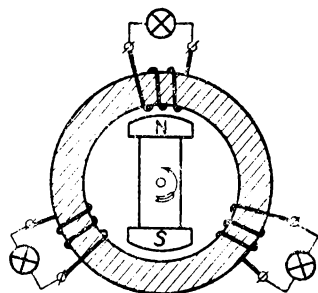


Рис. 66. Схема несвязанной трехфазной цепи.

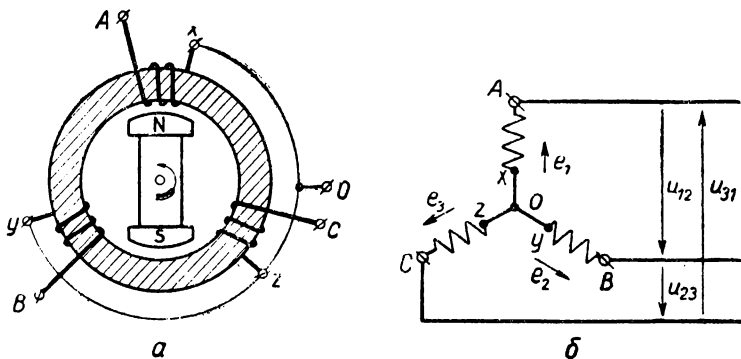


Рис. 67. Трехфазная обмотка, соединенная звездой:

а — схема соединения; б — схема обмотки.

изменяться по синусоидальному закону. Условимся за положительное направление действия линейных напряжений считать то направление, когда они действуют: от зажима A первой фазы к зажиму B второй фазы; от зажима B второй фазы к зажиму C

* Латинское *neutralis* — не принадлежащий ни к тому, ни к другому роду.

третьей фазы; от зажима *С* третьей фазы к зажиму *А* первой фазы. Эти три условно положительных направления действия линейных напряжений на рисунке 67, б показаны стрелками.

Расчеты и измерения показывают, что действующее значение линейного напряжения генератора, три фазы которого соединены в звезду, в $\sqrt{3}$ раз больше действующего значения фазного напряжения.

Для передачи энергии от генератора, соединенного звездой, к однофазным или трехфазным токоприемникам, в общем случае нужны четыре провода. Три провода присоединяют к началам фаз генератора (*А*, *В*, *С*). Эти провода называют линейными проводами. Четвертый провод соединяют с нейтральной точкой (*О*) генератора и называют нейтральным (нулевым) проводом.

Трехфазная цепь с нейтральным проводом дает возможность использовать два напряжения генератора. Приемники в такой цепи можно включать между линейными проводами на линейное напряжение или между линейными проводами и нейтральным проводом на фазное напряжение.

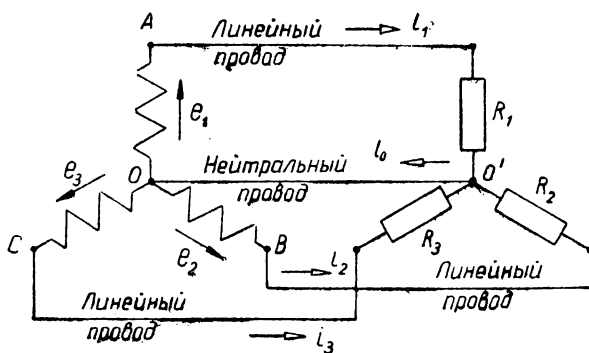


Рис. 68. Четырехпроводная трехфазная цепь.

На рисунке 68 показана схема включения токоприемников, рассчитанных на фазное напряжение генератора. В этом случае фазы токоприемников будут иметь общую точку соединения — нейтральную точку *О'*, а токи в линейных проводах (линейные токи) будут равны токам в соответствующих фазах нагрузки (фазным токам).

Каждая фаза нагрузки может быть образована как одним токоприемником, так и несколькими токоприемниками, включенными между собой параллельно (рис. 69).

Если фазные токи и углы сдвига фаз этих токов по отношению к фазным напряжениям одинаковы, то такая нагрузка на-

зывается симметричной. Если хотя бы одно из указанных условий не соблюдается, то нагрузка будет несимметричной.

Симметричная нагрузка может быть создана, например, лампами накаливания одинаковой мощности. Допустим, что каждая фаза нагрузки образована тремя одинаковыми лампами (рис. 70). Путем непосредственных измерений можно убедиться, что при включении нагрузки звездой с нейтральным проводом

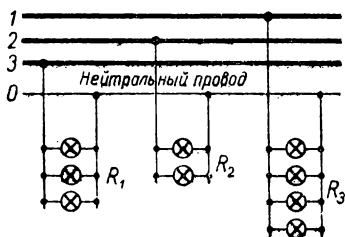


Рис. 69. Схема включения однофазных токоприемников в четырехпроводную сеть.

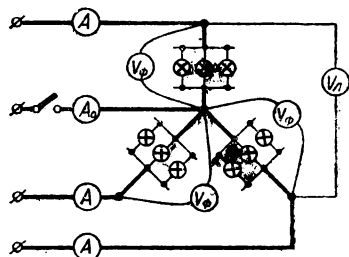


Рис. 70. Схема соединения симметричной нагрузки звездой.

напряжение на каждой фазе нагрузки U_ϕ будет меньше линейного напряжения U_λ в $\sqrt{3}$ раз, подобно тому, как это было при включении звездой фаз обмоток генератора

$$U_\lambda = \sqrt{3} U_\phi.$$

На практике широкое распространение получили трехфазные цепи с нейтральными проводами при напряжениях

$$U_\lambda = 380 \text{ в}; \quad U_\phi = 220 \text{ в}$$

или

$$U_\lambda = 220 \text{ в}; \quad U_\phi = 127 \text{ в}.$$

Из рисунка 70 видно, что ток в линейном проводе (I_λ) равен току в фазе (I_ϕ)

$$I_\lambda = I_\phi.$$

Величина тока в нейтральном проводе при симметричной нагрузке равна нулю, в чем можно убедиться также путем непосредственного измерения.

Но если ток в нейтральном проводе отсутствует, то зачем же нужен этот провод?

Для выяснения роли нейтрального провода сделаем следующий опыт. Допустим, что в каждой фазе нагрузки имеется по три одинаковых лампы и одному вольтметру, а в нейтральный провод включен амперметр (см. рис. 70). Когда в каждой фазе включены по три лампы, то все они находятся под одним и тем же напряжением и горят с одинаковым накалом, а ток

в нейтральном проводе равен нулю. Изменяя число включенных ламп в каждой фазе нагрузки, мы убедимся в том, что фазные напряжения не изменяются (все лампы будут гореть с прежним наклоном), но в нейтральном проводе появится ток.

Отключим нейтральный провод от нулевой точки приемников и повторим все изменения нагрузки в фазах. Теперь мы заметим, что большее напряжение будет приходиться на ту фазу, сопротивление которой больше других, то есть, где включено меньшее количество ламп. В этой фазе лампы будут гореть с наибольшим накалом и даже могут перегореть. Это объясняется тем, что в фазах нагрузки с большим сопротивлением происходит и большее падение напряжения.

Следовательно, *нейтральный провод необходим для выравнивания фазных напряжений нагрузки, когда сопротивления этих фаз различны.*

Благодаря нейтральному проводу, каждая фаза нагрузки оказывается включенной на фазное напряжение генератора, которое практически не зависит от величины тока нагрузки, так как внутреннее падение напряжения в фазе

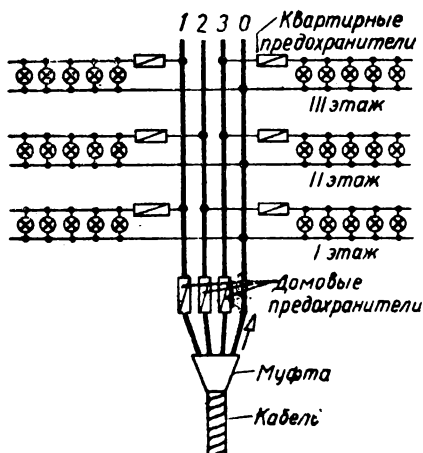


Рис. 71. Схема осветительной сети жилого дома при соединении фаз нагрузки звездой.

генератора незначительно. Поэтому напряжение на каждой фазе нагрузки будет практически неизменным при изменениях нагрузки.

Если сопротивления фаз нагрузки будут равными по величине и однородными, то нейтральный провод не нужен (рис. 70). Примером такой нагрузки являются симметричные трехфазные токоприемники.

Обычно осветительная нагрузка не бывает симметричной, поэтому без нейтрального провода ее не соединяют звездой (рис. 71). Иначе это привело бы к неравномерному распределению напряжений на фазах нагрузки: на одних лампах напряжение было бы выше нормального и они могли бы перегореть, а другие, наоборот, находились бы под пониженным напряжением и горели бы тускло.

По этой же причине никогда не ставят предохранитель в нейтральный провод, так как перегорание предохранителя может вызвать недопустимые перенапряжения на отдельных фазах нагрузки (см. рис. 71).

Соединение фаз токоприемников треугольником.

Если три фазы нагрузки включить непосредственно между линейными проводами, то мы получим такое соединение фаз токоприемников, которое называется треугольником (рис. 72).

Допустим, что первая фаза нагрузки R_1 включена между первым и вторым линейными проводами; вторая R_2 — между вторым и третьим проводами, а третья R_3 — между третьим и первым проводами. Нетрудно видеть, что каждый линейный провод соединен с двумя различными фазами нагрузки.

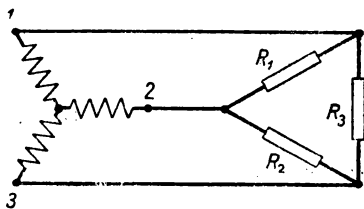


Рис. 72. Трехпроводная трехфазная цепь.

Соединять треугольником можно любые нагрузки. На рисунке 73 дана более общая схема соединения фаз нагрузки треугольником. Соединение треугольником осветительной нагрузки жилого дома показано на рисунке 74. При соединении фаз нагрузки треугольником напряжение на каждой фазе нагрузки равно линейному напряжению

$$U_{\Delta} = U_{\Phi}.$$

Это соотношение сохраняется и при неравномерной нагрузке.

Линейный ток при симметричной нагрузке фаз, как показывают измерения, будет больше фазного тока в $\sqrt{3}$ раз

$$I_{\Delta} = \sqrt{3} I_{\Phi}.$$

Однако следует иметь в виду, что при несимметричной нагрузке фаз это соотношение между токами нарушается.

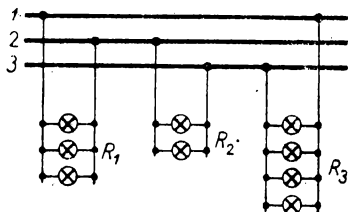


Рис. 73. Схема включения однофазных токоприемников в трехпроводную сеть.

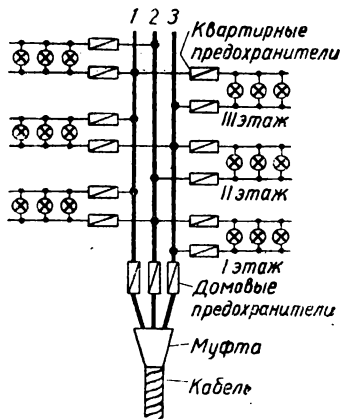


Рис. 74. Схема осветительной сети жилого дома при соединении фаз нагрузки треугольником.

Принципиально можно соединять треугольником и фазы генератора, но обычно этого не делают. Дело в том, что для создания заданного линейного напряжения каждая фаза генератора

при соединении треугольником должна быть рассчитана на напряжение, в $\sqrt{3}$ раз большее, чем в случае соединения звездой. Более высокое напряжение в фазе генератора требует увеличения числа витков и усиленной изоляции для обмоточного провода, что увеличивает размеры и стоимость машины. Именно поэтому фазы трехфазных генераторов почти всегда соединяют звездой.

Приемники электрической энергии независимо от способа соединения обмоток генератора могут быть включены либо звездой, либо треугольником. Выбор того или иного способа соединения определяется величиной напряжения сети и номинальным напряжением приемников.

Упражнения и задачи

1. К четырехпроводной трехфазной сети (рис. 75) с линейным напряжением 380 в необходимо подключить лампы накаливания с номинальным напряжением 220 в. Нарисуйте схему соединения ламп с проводами сети.

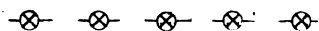
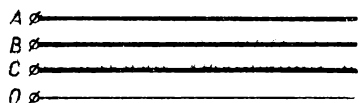


Рис. 75. К задаче № 1.

2. На рисунке 76 дана схема включения ламп накаливания в трехфазную сеть. Все лампы одинаковы. Определите вид соединения ламп. К чему приведет обрыв нейтрального провода?

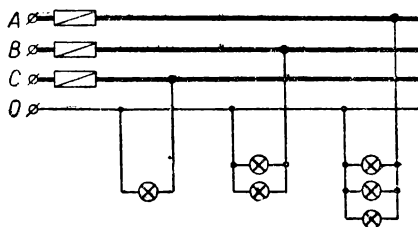


Рис. 76. К задаче № 2.

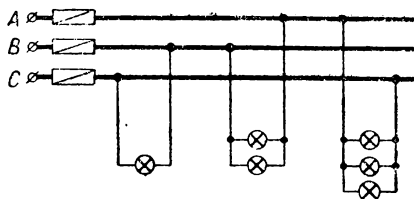


Рис. 77. К задаче № 3.

4. В трехфазную сеть включены три группы ламп накаливания. Каждая группа образована из 100 параллельно включенных ламп с номинальным током $I_n = 0,6$ а при нормальном напряжении $U_n = 127$ в. Определите ток в линейных проводах и линейное напряжение сети, если лампы соединены звездой.

Ответ: $I_\pi = 60$ а; $U_\pi = 220$ в.

5. В трехфазную сеть с линейным напряжением 220 в включены три группы ламп, соединенных треугольником. При равном числе ламп в каждой фазе ток в линейных проводах $I_{\text{л}} = 173$ а. Определите, какое количество ламп включено в каждую фазу, если номинальный ток лампы $I = 0,5$ а. Ответ: $n = 200$ ламп.

6. В трехфазную сеть с линейным напряжением 220 в включены три активных сопротивления $R_A = R_B = R_C = 10$ ом, соединенные звездой.

Найдите фазные и линейные токи. Как изменятся токи в сопротивлениях $R_B = R_C$ при обрыве провода фазы А?

Ответ: $I_A = I_B = I_C = 12,7$ а; при обрыве провода $I_B = I_C = 11$ а.

7. В трехфазную сеть с линейным напряжением 220 в включены треугольником активные сопротивления: $R_{AB} = 10$ ом; $R_{BC} = 5$ ом; $R_{CA} = 5$ ом. Определите токи в фазах нагрузки. Какими будут токи в фазах при обрыве линейного провода фазы А?

Ответ: $I_{AB} = 22$ а; $I_{BC} = 44$ а; $I_{CA} = 44$ а; при обрыве провода $I_{AB} = I_{CA} \approx 14,7$ а; $I_{BC} = 44$ а.

ГЛАВА V

ТРАНСФОРМАТОРЫ

§ 19. ПРИНЦИПЫ УСТРОЙСТВА И ДЕЙСТВИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Назначение трансформаторов.	<i>Трансформатором называется электромагнитный аппарат, осуществляющий преобразование энергии переменного тока одного напряжения в энергию переменного тока другого напряжения без изменения частоты.</i>
------------------------------------	---

Трансформаторы используют прежде всего при передаче и распределении электрической энергии. Потребителям электрической энергии — двигателям, печам, осветительным приборам и т. д., нужно низкое напряжение, измеряемое сотнями, а иногда и десятками вольт. Однако линии электропередачи не могут экономично работать при низком напряжении. Поэтому с увеличением дальности передачи увеличивают и линейное напряжение. Например, линия электропередачи Волжская ГЭС имени В. И. Ленина — Москва работает под напряжением 500 кв. Генераторы не могут быть построены на высокое напряжение линий электропередач. Следовательно, возникает необходимость изменять напряжение. Это и делают с помощью трансформаторов: повышают напряжение генераторов до требуемого в линиях электропередачи, а в районе потребления его многократно понижают.

Трансформаторы используют также для разнообразных преобразований переменного тока в промышленных установках

(печные трансформаторы, сварочные, трансформаторы для выпрямителей и т. д.).

Наконец, трансформаторы применяют в устройствах проводной связи, радио, автоматики и т. д.

В соответствии с назначением трансформаторов их выпускают различной мощности и напряжения: от долей вольтампера и вольт до сотен тысяч киловольтампер и сотен киловольт.

Однофазный трансформатор.

Однофазный трансформатор, схематически показанный на рисунке 78, состоит из двух неподвижных катушек, расположенных на стальном замкнутом сердечнике. Одну из них (катушку, имеющую w_1 витков) подключают к внешнему источнику переменного напряжения и называют первичной обмоткой. Другую (имеющую w_2

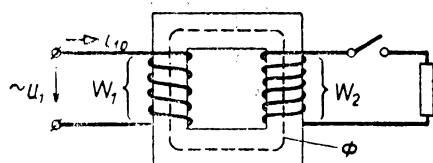


Рис. 78. Принципиальная схема устройства однофазного трансформатора.

витков) называют вторичной обмоткой. К ней присоединяют приемник энергии переменного тока (нагрузку).

При подключении первичной обмотки к источнику переменного напряжения в ней возникает переменный ток i_1 , который создает в сердечнике переменный магнитный поток

Φ , одна из линий которого на рисунке показана пунктиром. Замыкаясь по сердечнику, поток пронизывает витки как первичной, так и вторичной обмоток трансформатора, индуцируя в них электродвижущие силы.

Если вторичную обмотку трансформатора соединить с приемником электрической энергии, то под действием э.д.с. этой обмотки во вторичной цепи трансформатора возникнет ток. Таким образом, электрическая энергия с помощью переменного магнитного поля передается из первичной цепи трансформатора во вторичную.

Режим холостого хода.

Представим себе вначале, что первичная обмотка подключена к источнику переменного напряжения u_1 , а цепь вторичной обмотки разомкнута (рис. 79). В этом случае говорят, что трансформатор работает в режиме холостого хода.

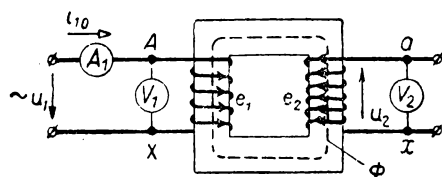


Рис. 79. Схема включения в сеть трансформатора, работающего в режиме холостого хода.

Переменный ток i_{10} первичной обмотки — ток холостого хода — возбуждает переменное магнитное поле в сердечнике трансформатора.

Обе обмотки трансформатора пронизываются одним и тем же магнитным

Яблочков, Павел Николаевич (1847—1894 гг.) — русский электротехник. Изобрел дуговую лампу (свеча Яблочкова). Впервые применил многофазный генератор переменного тока для питания установок электрического освещения. Разработал систему распределения электрической энергии переменного тока при помощи простейших трансформаторов с разомкнутой магнитной цепью.



потоком, поэтому мгновенные э. д. с. отдельных витков e_v будут равны между собой, а общая э. д. с. какой-либо обмотки, состоящей из w последовательно соединенных витков, будет определяться выражением

$$e_{\text{общ}} = we_v.$$

Таким образом, э. д. с. первичной обмотки будет равна

$$e_1 = w_1 e_v,$$

а э. д. с. вторичной обмотки

$$e_2 = w_2 e_v.$$

Отсюда следует, что

$$\frac{e_1}{e_2} = \frac{w_1}{w_2} = k.$$

Отношение величин э. д. с. обмоток трансформатора, равное отношению чисел витков этих обмоток, называется коэффициентом трансформации (k).

Важная особенность трансформатора с замкнутым сердечником заключается в том, что при отсутствии тока в цепи вторичной обмотки ток в его первичной обмотке (ток холостого хода) очень мал. Величина тока холостого хода, как показывают измерения, в 15—20 раз меньше величины тока первичной обмотки трансформатора при его полной нагрузке.

Небольшой ток холостого хода создает весьма незначительное падение напряжения $I_0 r_1$ в сопротивлении r_1 первичной обмотки: его величина не превышает 0,5% от величины приложенного напряжения U_1 . Возникает вопрос: чем же тогда уравновешена основная часть приложенного напряжения? Эта часть

напряжения уравновешена э.д.с. e_1 первичной обмотки. Поэтому, пренебрегая незначительным падением напряжения в первичной обмотке при холостом ходе трансформатора, можно считать, что

$$e_1 \approx u_1.$$

Если напряжение, приложенное к первичной обмотке, изменяется во времени по синусоидальному закону, то уравновешивающая его э. д. с. первичной обмотки будет также изменяться по синусоидальному закону:

$$e_1 = E_{m1} \sin \omega t.$$

Э. д. с. вторичной обмотки создается тем же магнитным потоком, что и э. д. с. первичной обмотки. Поэтому

$$e_2 = E_{m2} \sin \omega t.$$

Поскольку величина э. д. с. e_1 практически равна величине приложенного напряжения u_1 , а напряжение на разомкнутых зажимах вторичной обмотки численно равно э. д. с. e_2 , то выражение для коэффициента трансформации можно записать в следующем виде:

$$k = \frac{w_1}{w_2} = \frac{e_1}{e_2} = \frac{E_{m1}}{E_{m2}} = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}}.$$

Следовательно, коэффициент трансформации приближенно может быть определен отношением величин напряжений на зажимах первичной и вторичной обмоток трансформатора при холостом ходе.

Подбирая число витков w_2 вторичной обмотки, можно при заданном первичном напряжении U_1 получить желаемую величину напряжения U_2 на зажимах вторичной обмотки.

Если число витков w_2 вторичной обмотки больше числа витков w_1 первичной, то трансформатор служит в качестве повышающего. При обратном соотношении витков трансформатор является понижающим.

Режим нагрузки.

При подключении нагрузки к зажимам вторичной обмотки возбужденного трансформатора образуется электрическая цепь (рис. 80), в которой под действием э. д. с. e_2 вторичной обмотки создается переменный ток i_2 . Величина тока зависит от сопротивления нагрузки. Вторичную обмотку трансформатора можно рассматривать как новый (вторичный) источник переменного тока, не имеющий электрической связи с внешним (первичным) источником питания. При передаче электрической энергии из первичной цепи трансформатора во вторичную неизбежно возникают потери. Часть энергии источника питания бесполезно расходуется на нагрев обмоток и сердечника. Потери электрической энергии характеризуют мощностью потерь ΔP , которую в свою очередь

удобно представить состоящей из двух слагающих: мощности электрических потерь $\Delta P_{\text{э}}$ и мощности магнитных потерь $\Delta P_{\text{м}}$. Мощностью электрических потерь характеризуют нагрев обмоток, обладающих сопротивлением r_1 и r_2 ; она пропорциональна квадрату тока. По закону Джоуля—Ленца можно записать, что

$$\Delta P_{\text{э}} = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2.$$

Мощностью магнитных потерь $\Delta P_{\text{м}}$ характеризуют нагрев сердечника, вызванный вихревыми токами в нем, а также циклическим перемагничиванием сердечника.

Вследствие потерь ΔP , мощность P_2 передачи энергии в нагрузку будет меньше мощности P_1 потребления энергии в первичной обмотке трансформатора.

Отношение количества энергии, израсходованной в нагрузке, к количеству энергии, воспринятой трансформатором от источника питания за тот же промежуток времени, называют коэффициентом полезного действия трансформатора. Его обычно выражают отношением активных мощностей P_1 и P_2 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1},$$

где $P_1 = P_2 + \Delta P$.

Современные мощные трансформаторы имеют очень высокий к. п. д. (97—99%). Если пренебречь потерями энергии в трансформаторе, то

$$P_1 \approx P_2.$$

Далее, считая, что углы сдвига фаз тока по отношению к напряжению в первичной и вторичной цепях трансформатора приблизительно одинаковы, можно написать

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

или

$$\frac{I_1}{I_2} \approx \frac{U_2}{U_1},$$

то есть токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны напряжениям, действующим на зажимах этих обмоток.

Трехфазный трансформатор. Для трансформирования трехфазных напряжений можно воспользоваться тремя однофазными трансформаторами (рис. 81). Соединяя концы X, Y, Z первичных обмоток этой группы трансформаторов между

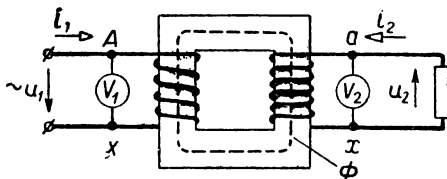


Рис. 80. Схема включения в сеть трансформатора с нагрузкой.

собой, а их начала A, B, C с проводами трехфазной линии, получим соединение первичных обмоток звездой. В этом случае напряжение на первичной обмотке каждого трансформатора (фазное напряжение) будет в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного напряжения.

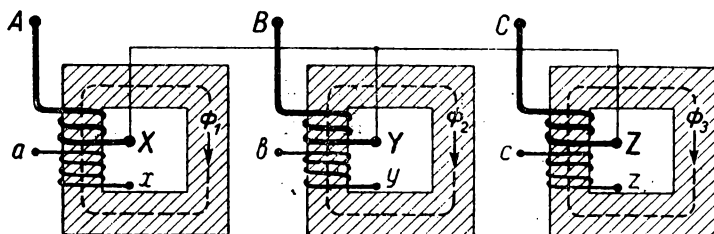


Рис. 81. Трехфазная группа из трех однофазных трансформаторов.

Обычно первичные обмотки трехфазной группы так и соединяются. Вторичные обмотки могут соединяться звездой или треугольником (рис. 82).

Нейтральная точка вторичных обмоток группы трансформаторов соединяется с нейтральным (нулевым) проводом. Нагрузку присоединяют или к двум линейным проводам, или к нейтральному и любому линейному проводу. Такой вид соединения фаз трансформатора называют соединением звездой с выведенной нулевой точкой. Это соединение дает возможность иметь у потребителя два напряжения, одно из которых равно фазному, а другое — линейному напряжению.

Три однофазных трансформатора можно объединить в одно общее устройство с одним трехстержневым сердечником — трехфазный трансформатор (рис. 83).

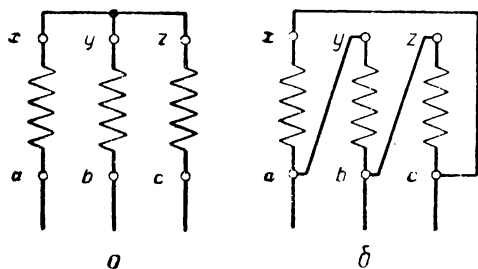


Рис. 82. Схемы соединений вторичных обмоток трансформаторов трехфазной группы:

a — звездой; b — треугольником.

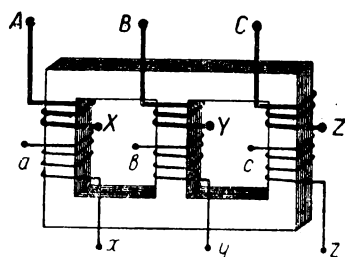
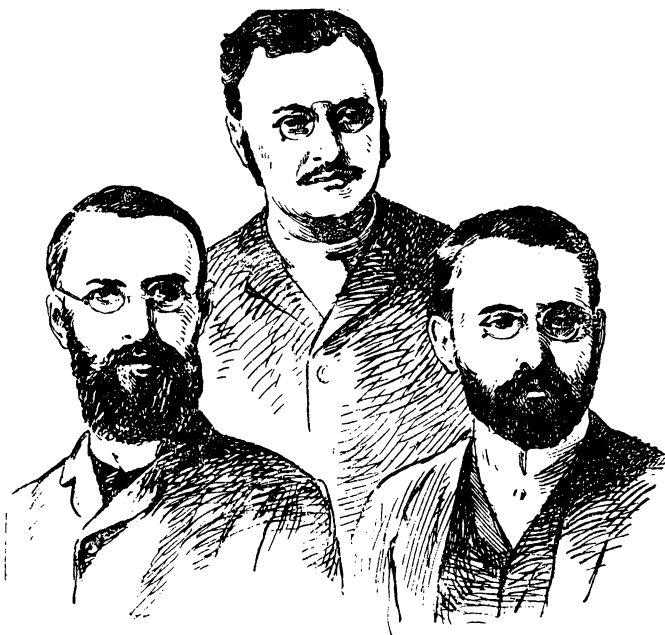


Рис. 83. Трехфазный трансформатор с трехстержневым магнитопроводом.

Фазы обмоток трехфазного трансформатора соединяют так же, как и в рассмотренном примере с трехфазной группой однофазных трансформаторов.



Блати, Отто Титус (1860—1938 гг.), Дери, Миклош (1854—1934 гг.), Циперновский, Карл (1853—1942 гг.) — венгерские инженеры-электротехники. Создали первые броневые и стержневые однофазные трансформаторы с замкнутыми магнитными сердечниками. Предложили термин «трансформатор».

§ 20. КОНСТРУКЦИЯ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Конструкция сердечников и обмоток.

Сердечник трансформатора представляет собой замкнутый магнитопровод. Его собирают из пластин электротехнической стали толщиной 0,35—0,5 мм. Стальные пластины изолируют одну от другой лаком или тонкой бумагой. Иногда достаточной изоляцией является пленка окиси, возникающая на поверхности пластин. Пластины, образующие сердечник, собирают в пакет и стягивают болтами. Сердечник однофазного трансформатора имеет два стержня с обмотками. Два ярма соединяют стержни и замыкают таким образом магнитную цепь трансформатора (рис. 84).

Обмотки трансформатора бывают концентрическими и дисковыми.

Концентрическая обмотка выполняется в виде цилиндрических катушек, расположенных на стержнях сердечника (рис. 85, а). Ближе к стержню располагают обмотку низшего напряжения (н. н.). Ее охватывает обмотка высшего напряжения (в. н.).

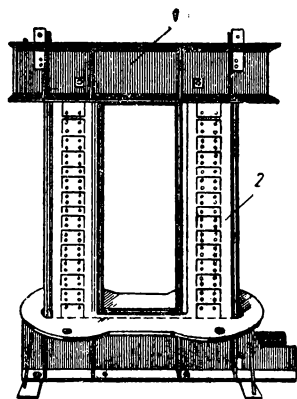
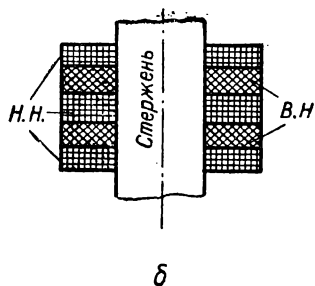


Рис. 84. Сердечник однофазного трансформатора большой мощности:
1 — ядро; 2 — стержень.



Рис. 85. Виды обмоток трансформатора:
а — концентрическая; б — дисковая.



Дисковая обмотка (рис. 85, б) собирается из катушек низшего и высшего напряжения, имеющих форму плоских дисков, чередующихся по высоте стержней.

В зависимости от формы сердечника различают стержневые (рис. 86, а) и броневые трансформаторы (рис. 86, б). В броневом трансформаторе обмотки расположены на среднем стержне, а магнитный поток делится на две части и замыкается по крайним стержням.

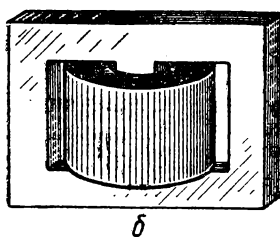
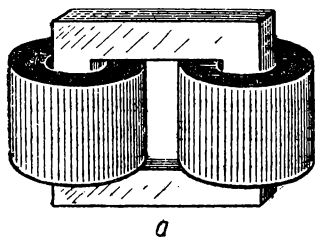


Рис. 86. Типы магнитопроводов трансформаторов:
а — стержневой; б — броневой.

Система охлаждения.

Когда трансформатор работает, его обмотки нагреваются. Температура обмоток не должна превышать допустимого предела, зависящего от теплостойкости изоляции.

Поэтому трансформаторы охлаждают воздухом или при помощи масла.

В трансформаторах с воздушным охлаждением тепло от обмоток отдается непосредственно окружающему воздуху. Такая система охлаждения применяется в маломощных трансформаторах.

В трансформаторах с масляным охлаждением сердечник вместе с обмотками находится в баке, заполненном специальным минеральным маслом (трансформаторным). Масло не только способствует лучшему отводу тепла от обмоток и сердечника, но и улучшает изоляцию токоведущих частей между собой и от бака. Для улучшения условий охлаждения масла стенки бака делают ребристыми или приваривают трубы, которые способствуют естественной циркуляции масла (рис. 87). В мощных

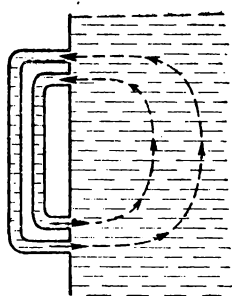


Рис. 87. Циркуляция масла в радиаторных трубах.

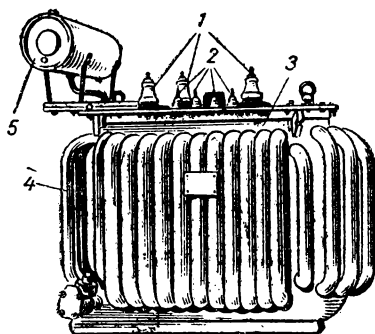


Рис. 88. Общий вид трехфазного трансформатора:

1 — ввод обмотки высшего напряжения;
2 — ввод обмотки низшего напряжения;
3 — кожух трансформатора; 4 — трубы для охлаждения; 5 — маслорасширитель.

трансформаторах применяют искусственную циркуляцию масла. Внешний вид трансформатора с трубчатым баком показан на рисунке 88.

Упражнения и задачи

1. Однофазный понижающий трансформатор включен в сеть с напряжением 380 в.

К зажимам вторичной обмотки включена активная нагрузка с сопротивлением $r = 10 \text{ ом}$. Определите ток в нагрузке, если коэффициент трансформации $k = 4$. Ответ: $I_2 = 9,5 \text{ а}$.

2. Однофазный трансформатор имеет номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1н} = 380 \text{ в}$ и число витков $w_1 = 300$.

Напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе $U_{20} = 127$ в. Определить число витков вторичной обмотки.

Ответ: $w_2 \approx 100$ витков.

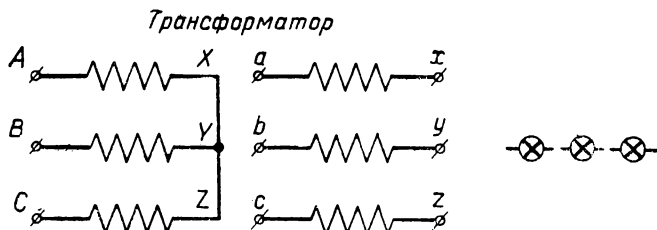


Рис. 89. К задаче № 3.

3. На рисунке 89 дана схема трехфазного трансформатора с напряжением на каждой фазе вторичной обмотки 127 в. Как следует соединить вторичные обмотки трансформатора для питания ламп накаливания с напряжением 220 в? Нарисуйте схему соединения фаз вторичной обмотки и осветительной нагрузки.

ГЛАВА VI

АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

§ 21. ПРИНЦИПЫ УСТРОЙСТВА И ДЕЙСТВИЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Назначение асинхронных двигателей.

Среди всех типов электрических двигателей самыми простыми по устройству, наиболее дешевыми и надежными в работе являются асинхронные двигатели. Поэтому их применяют во всех отраслях народного хозяйства.

Из общего количества электрических двигателей, изготавливаемых заводами, асинхронные двигатели составляют примерно 95%.

Мощность асинхронных двигателей колеблется в широких пределах — от нескольких ватт до нескольких тысяч киловатт.

Двигатели мощностью до 0,5 кВт обычно выполняют однофазными. Их применяют в автоматических устройствах, для привода электрифицированного инструмента, медицинского оборудования и т. д. Более мощные двигатели выполняют трехфазными и они служат для привода станков, подъемно-транспортных и других машин.

Вращающееся магнитное поле.

Трехфазный асинхронный двигатель получает питание от трехфазного генератора. При работе двигателя электрическая энергия трехфазной системы токов преобразуется в механическую энергию вращательного движения. Преобразование энергии осуществляется посредством магнитного поля, возбуждаемого внутри машины трехфаз-

ной системой токов. Это поле непрерывно вращается относительно оси двигателя с постоянной скоростью и называется вращающимся магнитным полем.

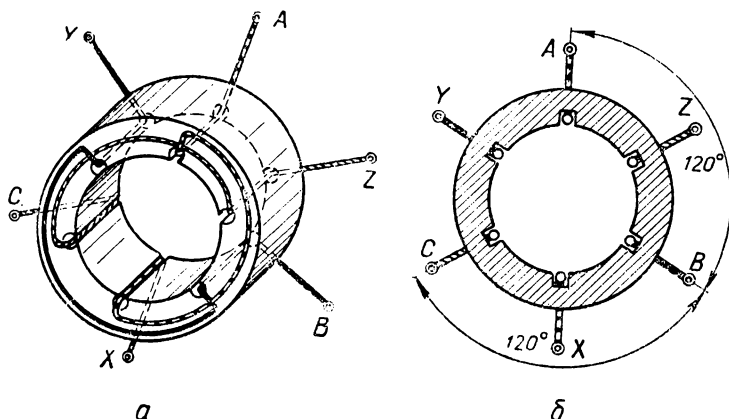


Рис. 90. Электромагнитное устройство с тремя одновитковыми катушками:

a — кольцевой сердечник с 6-ю пазами; *б* — поперечный разрез.

Для получения общего представления о возбуждении вращающегося магнитного поля рассмотрим электромагнитное устройство, схематически показанное на рисунке 90. Оно состоит из стального кольцевого сердечника и трех катушек. Стороны этих катушек уложены в диаметрально противоположные пазы внутренней поверхности сердечника. Каждая из них выполнена в виде одного витка и обозначена двумя буквами: *A* — *X*, *B* — *Y*, *C* — *Z*. Буквами *A*, *B*, *C* обозначены начала, а буквами *X*, *Y*, *Z* — концы катушек, смещенных в пространстве одна относительно другой на 120° .

Графики изменения токов i_1 , i_2 и i_3 в катушках *A* — *X*, *B* — *Y*, *C* — *Z* представлены на рисунке 91.

Условимся считать ток в любой катушке положительным, когда он направлен от ее начала к концу, и отрицательным — при обратном направлении. Каждая катушка с током создает переменное магнитное поле. Три переменных магнитных поля,

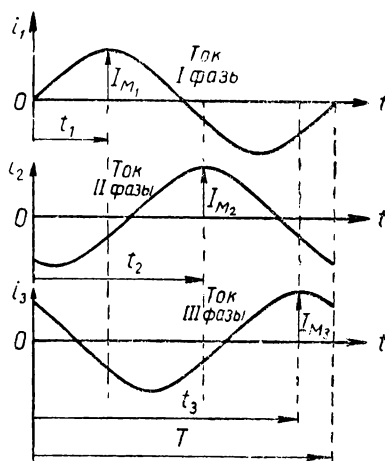


Рис. 91. График мгновенных значений симметричной трехфазной системы токов.

складываясь, образуют результирующее магнитное поле. Картина результирующего поля непрерывно изменяется, но ее можно построить для любых мгновений времени.

Построим картину результирующего поля для момента времени t_1 (см. рис. 91), когда ток в первой катушке положителен и максимален. Направление тока в сторонах катушки $A-X$

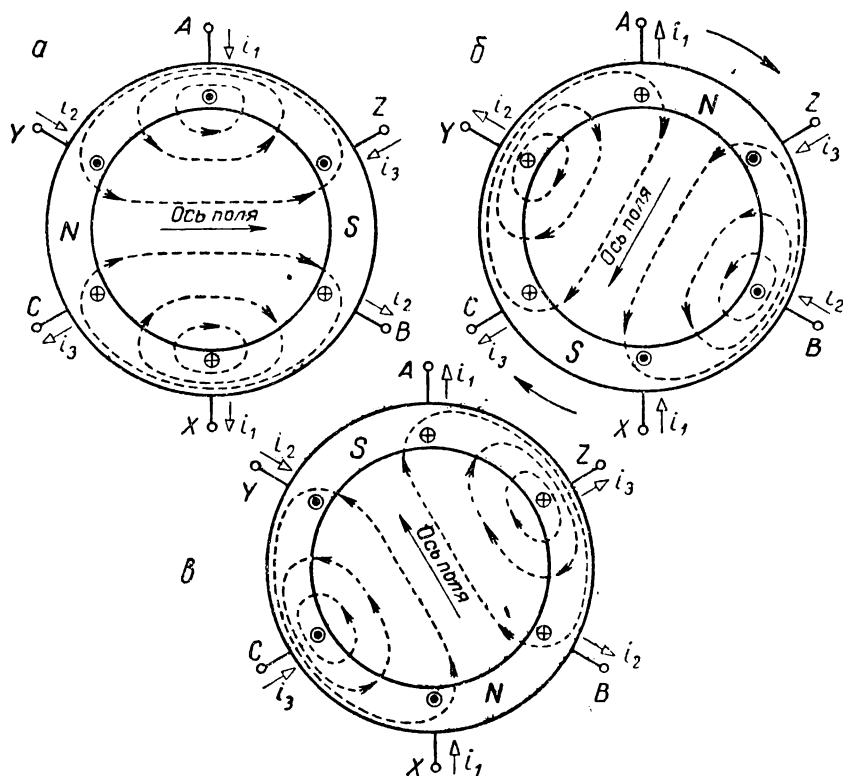


Рис. 92. Условное изображение двухполюсного вращающегося магнитного поля.

условно показано в сечении витка на рисунке 92, а знаками креста и точки. Из графика токов можно заключить, что в рассматриваемое мгновение времени токи во второй и третьей катушках отрицательны, то есть они направлены от концов катушек к их началам (во второй — от зажима Y к зажиму B , в третьем — от Z к C).

Зная направления токов в сторонах катушек, можно построить приближенную картину результирующего поля. Для этого следует очертить замкнутыми линиями группы проводников с одинаковым направлением тока. Пользуясь известным

Тесла, Никола (1856—1943 гг.) — выдающийся югославский электротехник. Открыл явление вращающегося магнитного поля и создал первый двухфазный асинхронный двигатель, получивший практическое применение. Известен исследованиями электрических токов высоких напряжений и частот. Н. Тесла принадлежит несколько сотен изобретений в области электротехники (электрические двигатели, генераторы, трансформаторы токов высокой частоты и др.).



правилом буравчика, отметим стрелками условно положительное направление линий поля.

Всматриваясь в построенную картину поля, мы видим, что в левой половине сердечника магнитные линии направлены из стали в воздух, а в правой половине они направлены из воздуха в сталь. Ту часть поверхности сердечника, где линии магнитного поля направлены из стали в воздух, называют северным полюсом, а ту часть, где они имеют противоположное направление, — южным.

Следовательно, в рассматриваемый момент времени левая половина внутренней поверхности сердечника представляет собой северный полюс, а правая — южный полюс. Расположение полюсов сердечника отмечено на рисунке буквами *N* и *S*. Ось полюсов (или ось магнитного потока) занимает в выбранный нами момент времени горизонтальное положение.

Итак, три пространственно смещенные катушки с токами, сдвинутыми во времени друг относительно друга на $\frac{1}{3}$ периода, создают двухполюсное магнитное поле.

Теперь выберем другое мгновение времени t_2 , когда ток во второй катушке будет положительным и максимальным, а токи в первой и третьей катушках будут отрицательными. Путем тех же рассуждений можно построить приближенную картину поля. Она показана на рисунке 92, б. Из нее видно, что ось магнитного потока занимает новое положение в пространстве. Наконец, если построить картину поля для момента времени t_3 (рис. 92, в), когда ток в третьей катушке будет положительным и максимальным, то легко установить, что положение магнитного потока в пространстве опять будет иным. Картины результирующего

поля, построенные на рисунке 92 для различных моментов времени, показывают, что магнитный поток по мере изменения

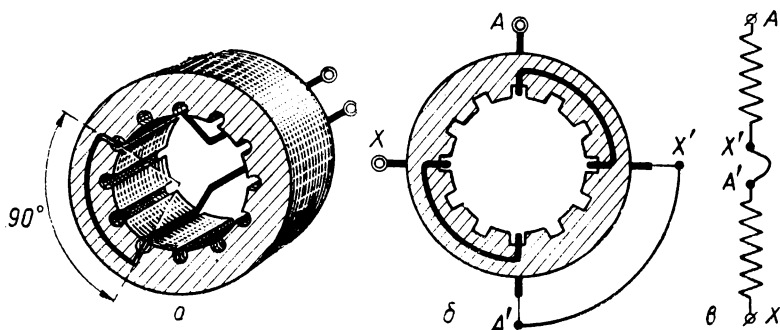


Рис. 93. Электромагнитное устройство с шестью однофазовыми катушками:

a — кольцевой сердечник с двенадцатью пазами; *б* — расположение катушек в пазах; *в* — электрическое соединение катушек.

токов в катушках непрерывно поворачивается в направлении движения стрелки часов.

Магнитный поток двухполюсного вращающегося магнитного поля поворачивается на 360° , то есть совершает один оборот за время T , равное периоду изменения тока. Очевидно, что за одну

минуту магнитное поле сделает $\frac{60}{T}$ оборотов. Учитывая, что частота тока катушек $f = \frac{1}{T}$, найдем скорость вращения двухполюсного поля:

$$n_1 = 60f \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

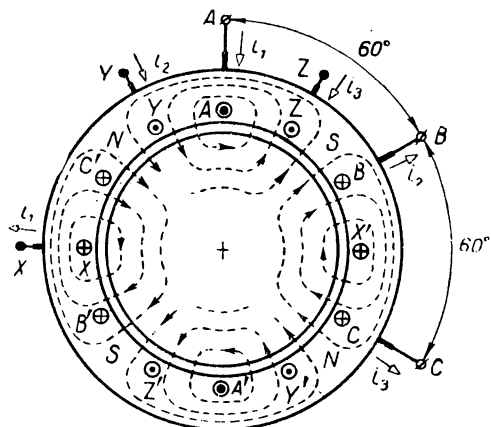


Рис. 94. Условное изображение четырехполюсного вращающегося магнитного поля.

двенадцать пазов и по две последовательно включенные катушки на каждую фазу (рис. 93), то аналогичным образом можно показать, что возникнет четырехполюсное магнитное поле (рис. 94). Скорость вращения магнитного поля, образующего две пары

Токи в трехфазной обмотке могут возбуждать не только двухполюсное, но и многополюсное вращающееся магнитное поле.

Если сердечник будет иметь, например, двенадцать

полюсов, будет в два раза меньше, чем скорость вращения двухполюсного поля, так как за время одного периода изменения тока полюсы поворачиваются только на 180° . В этом случае

$$n_1 = \frac{60f}{2} \frac{\text{об}}{\text{мин}},$$

где 2—число пар полюсов вращающегося поля.

Таким образом, при неизменной частоте питающего тока *многополюсное поле вращается в пространстве медленнее двухполюсного в число раз, равное числу пар полюсов p* . Поэтому скорость n_1 вращения магнитного поля может быть выражена формулой

$$n_1 = \frac{60f}{p} \frac{\text{об}}{\text{мин}},$$

то есть при постоянной частоте f скорость вращения магнитного поля обратно пропорциональна числу пар полюсов.

Принцип действия.

Для уяснения принципа действия трехфазного асинхронного двигателя рассмотрим упрощенную модель машины, показанную на рисунке 95.

Эта модель состоит из двух сердечников: внешнего 1 и внутреннего 2.

Внешний сердечник (статор) неподвижен. Он изготовлен в форме полого цилиндра с пазами, в которых размещены три катушки.

Внутренний сердечник (ротор) представляет собой стальной цилиндр, насаженный на валу. Этот сердечник может вращаться.

Статор и ротор отделены друг от друга равномерным воздушным зазором. Ротор также имеет пазы. В них уложены проводники, замкнутые между собой по торцам ротора кольцами.

Если катушки статора (фазы статорной обмотки) включить в трехфазную сеть, то в машине возникнет вращающееся магнитное поле. Это поле образует одну пару полюсов (N и S).

При равномерном вращении магнитного поля токов статора со скоростью n_1 в проводниках ротора будут наведены электро-

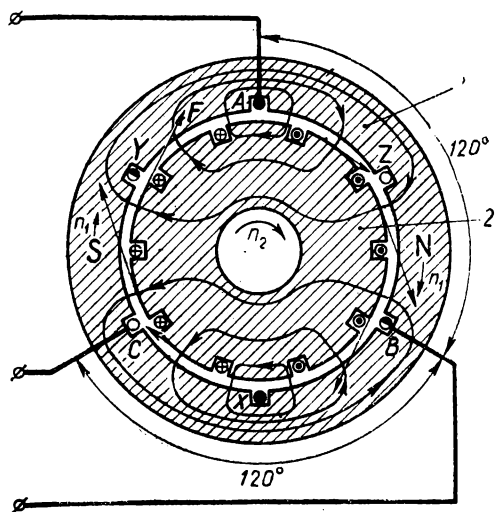


Рис. 95. Разрез упрощенной модели трехфазного асинхронного двигателя.



Доливо-Добровольский, Михаил Осипович (1862—1919 гг.) — выдающийся русский электротехник. Изобрел трехфазный асинхронный двигатель, трехфазный трансформатор, искрогасительные устройства для выключателей, различные измерительные приборы для трехфазных цепей. Впервые осуществил дальнюю (на 170 км) передачу электроэнергии трехфазной системой токов.

движущие силы. Направление наведенных э. д. с. может быть определено по правилу правой руки. При этом надо принять во внимание направление относительного движения проводников ротора в поле: оно противоположно направлению движения поля. Под влиянием наведенных э. д. с. в проводниках ротора, замкнутых торцовыми кольцами, возникнут токи. Их направление показано на рисунке 95 знаками креста и точки.

Токи в проводниках ротора взаимодействуют с вращающимся магнитным полем. В результате возникают электромагнитные силы, действующие на ротор. Направление действия этих сил может быть определено по правилу левой руки: они направлены в сторону движения магнитного поля. Поэтому, если момент сил, действующий на неподвижный ротор, превысит тормозной момент на его валу, то ротор получит движение в направлении вращения поля.

По мере возрастания скорости вращения ротора относительная скорость движения его проводников в равномерно вращающемся поле уменьшается, вследствие чего будет уменьшаться э. д. с. и величина тока в них. Процесс изменения тока и скорости вращения ротора n_2 прекратится, как только наступит устойчивое равновесие между моментом электромагнитных сил, вызывающих вращение ротора, и моментом сил, препятствующих вращению. В этих условиях ротор машины будет вращаться с постоянной скоростью и в его короткозамкнутых контурах установятся токи, обеспечивающие создание вращающего момента, равного тормозному.

Таким образом, *работа асинхронного двигателя основана на взаимодействии вращающегося магнитного поля с токами, которые наводятся этим полем в проводниках ротора.*

§ 22. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КОНСТРУКЦИЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Соотношение
скоростей
поля и ротора.**

Наведение э. д. с. в роторе и создание вращающего момента возможны лишь тогда, когда имеет место относительное движение проводников ротора в магнитном поле машины. *Ротор и магнитное поле асинхронного двигателя вращаются в пространстве в одном направлении, но с разными скоростями: скорость вращения ротора всегда меньше скорости вращения магнитного поля.*

Магнитное поле двигателя вращается с постоянной скоростью (n_1 оборотов в минуту), называемой синхронной скоростью, а ротор — с меньшей несинхронной, или, как ее еще называют, асинхронной скоростью (n_2 оборотов в минуту). При неизменной частоте фазных токов в обмотке статора синхронная скорость зависит только от числа пар полюсов p вращающегося поля, то есть от конструкции обмотки. Как отмечалось выше, наибольшую синхронную скорость имеют двигатели с двухполюсной обмоткой ($p = 1$). В частности, при $f = 50$ гц скорость вращения поля будет

$$n_1 = 60f = 60 \cdot 50 = 3000 \frac{\text{об}}{\text{мин}}.$$

В двигателях с многополюсной обмоткой синхронная скорость соответственно имеет следующие значения:

P	1	2	3	4	5	6
n_1	3000	1500	1000	750	600	500

Асинхронная скорость вращения ротора — величина переменная. Она зависит от механической нагрузки на валу двигателя. Чем больше механическая нагрузка, то есть чем больше тормозной момент, создаваемый устройством, приводимым во вращение двигателем, тем меньше скорость вращения ротора по сравнению с соответствующей синхронной скоростью. В этом и заключается основное свойство рассматриваемого двигателя, получившее отражение в его названии.

Скольжение. Разность скоростей поля и ротора асинхронного двигателя принято оценивать в долях синхронной скорости вращения поля, то есть безразмерной величиной s , называемой скольжением:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

или в процентах

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%.$$

Величина скольжения характеризует процесс наведения э. д. с. и токов в роторе асинхронного двигателя: с увеличением скольжения величины э. д. с. и токов в роторе тоже возрастают. Скольжение асинхронного двигателя может изменяться в пределах от 1 до 0. В момент пуска двигателя, когда его ротор неподвижен ($n = 0$), скольжение $s = 1$. При работе двигателя под нагрузкой величина скольжения будет меньше единицы. Наконец, при свободном вращении ротора, когда тормозной момент на его валу не действует (режим холостого хода), величина скольжения практически будет равна нулю, так как в этом случае ротор будет вращаться почти с синхронной скоростью ($n_2 \approx n_1$).

Современные асинхронные двигатели конструируют с таким расчетом, чтобы номинальное скольжение, то есть скольжение при наибольшей длительно допустимой нагрузке было небольшим — около 2% у мощных двигателей и 10% у двигателей малой мощности. Это объясняется стремлением обеспечить высокий коэффициент полезного действия двигателя, так как увеличение скольжения всегда сопровождается возрастанием токов в роторе, а следовательно, увеличением потерь энергии на нагрев обмоток машины.

Механическая характеристика. С увеличением тормозного момента скольжение увеличивается, но незначительно, поэтому скорость вращения ротора двигателя изменяется тоже незначительно. На рисунке 96 показана зависимость скорости вращения ротора от моментов на валу — механическая

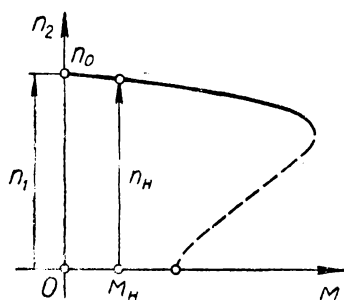


Рис. 96. Механическая характеристика трехфазного асинхронного двигателя.

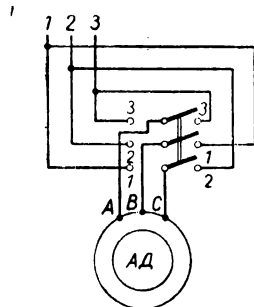


Рис. 97. Схема реверсирования асинхронного двигателя.

характеристика двигателя. Точка n_0 соответствует скорости ротора при холостом ходе двигателя, а точка n_H — при номинальной нагрузке.

Реверсирование ротора. Поскольку ротор асинхронного двигателя всегда вращается в сторону вращения магнитного поля, то для изменения направления вращения ротора (реверсирования) следует изменить направление вращения маг-

нитного поля. Для этого достаточно поменять места включения двух из трех проводов, которые соединяют зажимы двигателя с трехфазной сетью, то есть изменить порядок чередования токов в фазах статора.

В справедливости этого можно убедиться путем построения картины поля, аналогичной рассмотренной выше (см. рис. 92).

На рисунке 97 представлена схема реверсирования ротора двигателя с помощью трехполюсного рубильника.

Пусковой ток. Величина тока в каждой фазе обмотки статора зависит от скорости вращения ротора двигателя. График зависимости этих двух величин показан на рисунке 98. Своего наибольшего значения токи достигают при неподвижном роторе, то есть в момент пуска. Обычно пусковой ток асинхронных двигателей превышает номинальный ток в 5—7 раз.

Появление большого тока при пуске двигателя объясняется тем, что в момент пуска, когда ротор двигателя неподвижен ($n_2 = 0$), скорость пересечения проводников ротора вращающимся магнитным полем наибольшая и в них наводится большая э.д.с.

Асинхронный двигатель с неподвижным ротором можно сравнить с трехфазным трансформатором: роль первичной обмотки трансформатора выполняет обмотка статора двигателя, а вторичной — обмотка ротора. Поэтому появление большого тока в обмотке неподвижного ротора сопровождается возникновением значительного тока и в обмотке статора.

По мере увеличения скорости вращения ротора скольжение уменьшается и наводимая в нем э.д.с. также уменьшается. Уменьшение э.д.с. ведет к уменьшению тока в роторе, а следовательно, и тока в статорной обмотке двигателя.

Большой пусковой ток не может причинить вред обмоткам двигателя, так как время разгона ротора незначительно. Поэтому при пуске двигателя перегрев его обмоток не происходит.

Конструктивные элементы асинхронного двигателя. Основными конструктивными элементами трехфазного асинхронного двигателя являются стальные сердечники статора и ротора, отделенные друг от друга небольшим воздушным зазором, и электрические обмотки, размещаемые в пазах этих сердечников.

Для уменьшения вихревых токов сердечники выполняют в виде пакетов, набираемых из тонких стальных дисков (рис. 99).

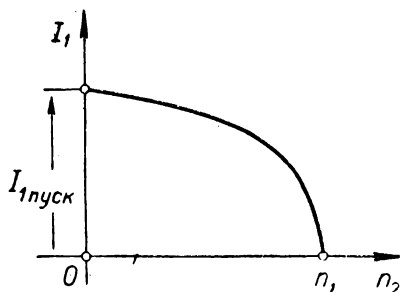


Рис. 98. График зависимости тока в обмотке статора от скорости вращения ротора асинхронного двигателя.

Пакеты статора запрессовывают в станину (рис. 100). Пакеты стальных листов ротора насаживают на вал (рис. 101, *а*). К станине крепят боковые щиты с шариковыми или роликовыми подшипниками, в которых удерживается ротор. Для улучшения охлаждения машины на ее вал обычно насаживают специальный вентилятор.

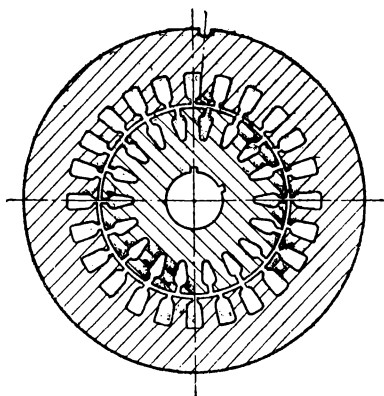


Рис. 99. Стальные листы статора и ротора асинхронной машины.

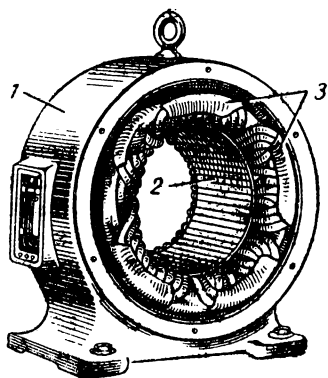


Рис. 100. Статор асинхронного двигателя:

1 — станина; 2 — сердечник; 3 — обмотка.

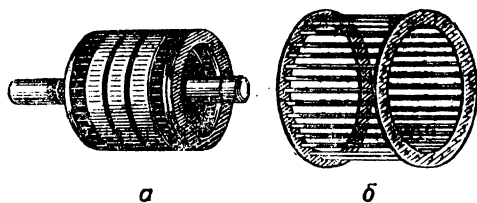


Рис. 101. Короткозамкнутый ротор (*а*) и его обмотка (*б*).

Обмотка ротора большинства асинхронных двигателей представляет собой цилиндрическую клетку, выполненную в форме беличьего колеса и называемую беличьей клеткой (рис. 101, *б*).

В старых типах машин клетка изготовлялась из медных стержней круглого или овального сечения, которые плотно вставлялись без изоляции в закрытые пазы сердечника ротора. Концы этих стержней замыкались между собой на торцах ротора медными кольцами. В настоящее время беличью клетку часто изготовляют прямой заливкой пазов ротора расплавленным алюми-

нием. Замыкающие кольца отливаются в этом случае вместе с вентиляционными лопастями и они составляют одно целое со стержнями.

Асинхронный двигатель с беличьей клеткой на роторе называют короткозамкнутым.

Фазы обмотки статора соединяют либо треугольником, либо звездой. Эти соединения могут быть сделаны внутри машины при ее изготовлении. В этом случае двигатель имеет три наружных вывода и он может работать только при одном номинальном напряжении. Если соединения внутри машины не сделаны, то двигатель имеет шесть наружных выводов. Это позволяет в зависимости от величины линейного напряжения питающей сети соединять фазы обмотки статора как звездой, так и треугольником.

Если в паспорте двигателя указано: $\Delta/Y - 127/220$ в, то это означает, что при напряжении сети 127 в обмотки соединяются треугольником, а при напряжении сети 220 в — звездой. В обоих случаях напряжение на фазах обмотки статора будет одинаковым и равным 127 в.

Упражнения и задачи

1. На рисунке 102 изображен паспортный щиток короткозамкнутого асинхронного двигателя. Определите скольжение при номинальной нагрузке и способ соединения фаз статорной обмотки, если линейное напряжение сети 380 в. Ответ: $s = 4\%$.

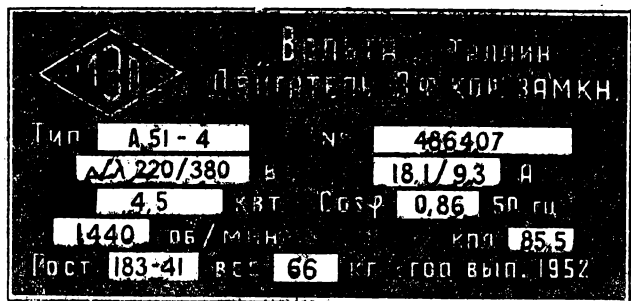


Рис. 102. К задаче № 1.

2. По данным паспортного щитка двигателя (см. рис. 102) определите активную электрическую мощность двигателя при номинальной нагрузке. Ответ: $P_1 \approx 5,25$ кВт.

3. Определите скорость вращения магнитного поля при частоте $f = 50$ гц для двухполюсного, четырехполюсного и шестиполюсного двигателей. Ответ: 3000, 1500, 1000 об/мин.

4. Определите скорость вращения ротора шестиполюсного асинхронного двигателя, если частота $f = 50$ гц, а скольжение составляет 4%¹. Ответ: 960 об/мин.

5. Определите способ соединения статорных обмоток асинхронного двигателя, если в паспорте двигателя указано Δ/Y — 220/380 в, а линейное напряжение трехфазной сети равно 220 в.

ГЛАВА VII

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

§ 23. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Общие сведения о выпрямителях. Современные мощные электрические станции вырабатывают электрическую энергию переменного тока. Однако потребители электрической энергии нуждаются не только в переменном, но и в постоянном токе. Гальванопластика, электрометаллургия, электрифицированный транспорт, радиотехнические устройства, автоматическое управление — вот далеко не полный перечень отраслей техники, где используют энергию постоянного тока.

Использовать аккумуляторы или машинные генераторы постоянного тока часто бывает неудобно или экономически невыгодно. В большинстве случаев применяют специальные выпрямительные устройства, преобразующие переменный ток в постоянный.

Основным элементом любого выпрямительного устройства является **вентиль** — прибор, обладающий односторонней электрической проводимостью. К электрическим вентилям относятся, например, кенотрон, газотрон, ртутная выпрямительная колба, полупроводниковые диоды и т. д. Выбор того или иного вентиля определяется мощностью и напряжением потребителя.

В настоящее время в устройствах, выпрямляющих напряжение до 250 в, широкое распространение получили полупроводниковые диоды (купроксные, селеновые, германиевые и др.).

Собственная проводимость. Рассмотрим принцип действия полупроводниковых вентилях на примере германиевого вентиля. Полупроводники так же, как и металлы, обладают кристаллическим строением. Атомы этих веществ располагаются симметрично друг относительно друга, создавая пространственную кристаллическую решетку.

Плоская схема одной ячейки кристаллической решетки германия Ge, который принадлежит к элементам четвертой группы, показана на рисунке 103. Атомы германия, находящиеся в узлах кристаллической решетки, прочно связаны между собой

электронными парами (ковалентная связь), когда каждый из четырех валентных электронов германия движется не только вокруг собственного ядра, но и вокруг соседних симметрично расположенных ядер.

При температуре, близкой к абсолютному нулю, кристалл германия, лишенный примесей, является изолятором, так как он не имеет свободных электронов. Однако валентные электроны германия связаны с атомами слабее, чем в диэлектриках. Поэтому с повышением температуры германия ковалентные связи частично разрушаются и возникают свободные электроны. Германий даже при комнатной температуре становится полупроводником.

В момент образования свободных электронов (электронов проводимости) в ковалентных связях образуются незанятые места — электронные вакансии, или, как их условно называют, «дырки». Дырки ведут себя подобно положительным зарядам. С повышением температуры количество дырок и свободных электронов в полупроводнике возрастает. Однако электропроводность полупроводников будет во много раз меньше, чем металла. Проводимость германия, лишенного примесей, называют собственной проводимостью.

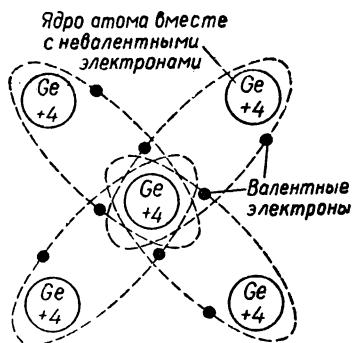


Рис. 103. Идеальная кристаллическая решетка германия (Ge).

Примесная проводимость.

Свойства полупроводника изменяются, если внести в него примеси. Например, если к германию добавить небольшое количество сурьмы Sb , которая принадлежит к элементам пятой группы и обладает пятью валентными электронами, то четыре валентных электрона каждого атома сурьмы будут участвовать в ковалентных связях, а пятый электрон, оставшись вне этих связей, становится свободным электроном проводимости (рис. 104). Потеряв из сферы своего влияния пятый валентный электрон, атомы сурьмы тем самым становятся положительными ионами, закрепленными в узлах пространственной решетки.

Таким образом, за счет увеличения числа свободных электронов, отданных примесью, проводимость германия возрастает. Преобладающими (основными) носителями зарядов в германии становятся электроны. Про такой германий говорят, что он обладает электронной проводимостью или проводимостью n -типа (от латинского *negative* — отрицательный).

Если же к германию добавить примесь элемента третьей группы, например индия In , то три валентных электрона вступят

в ковалентную связь с тремя соседними атомами германия, а в связях с четвертым атомом появится электронная вакансия — дырка (рис. 105). В это свободное место может перейти электрон из соседних связей и атом примеси станет отрицательным ионом. Дырка получает возможность перемещать-

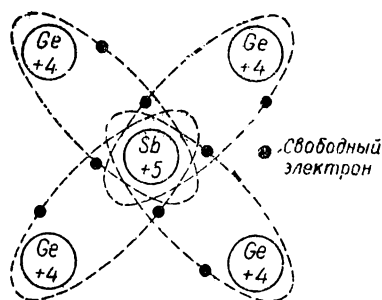


Рис. 104. Кристаллическая решетка германия (Ge) с примесью сурьмы (Sb).

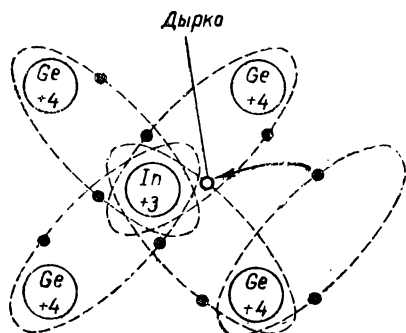


Рис. 105. Кристаллическая решетка германия (Ge) с примесью индия (In).

ся из одной ячейки, кристаллической решетки в другую и т. д., что эквивалентно перемещению положительного заряда по величине равного заряду электрона.

Таким образом, эта примесь отнимает электроны от основных атомов кристалла германия, усиливая в нем дырочную про-

водимость. Поэтому германий с примесью индия будет обладать преимущественно дырочной проводимостью или проводимостью *p*-типа (от латинского *positive* — положительный). Дырки будут являться основными носителями электрического заряда.

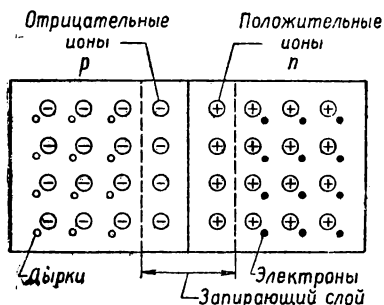


Рис. 106. Схема образования запирающего слоя.

Соединяя полупроводники различного характера проводимости (рис. 106), можно получить устройство для выпрямления переменного тока. В

частности, можно использовать германий *p*-типа и германий *n*-типа. В месте соединения будет происходить диффузия электронов из полупроводника *n*-типа в полупроводники *p*-типа, а дырок — в обратном направлении. В граничном слое по обе стороны от границы раздела полупроводников произойдет рекомбинация электронов и дырок: справа от границы возникает положительный заряд, создаваемый положительными ионами

сурьмы, а слева — отрицательный заряд, создаваемый отрицательными ионами индия. Между разноименно заряженными ионами образуется электрическое поле, препятствующее дальнейшей диффузии электронов и дырок.

Граничный слой, обедненный основными носителями зарядов (электронами и дырками), обладает большим сопротивлением. Этот слой получил название запирающего слоя или *p-n* перехода.

Режим прямого тока.

При соединении полупроводника *p*-типа с плюсом батареи, а полупроводника *n*-типа с минусом батареи (рис. 107) в полупроводниках создается стороннее электрическое поле с напряженностью E . Электроны и дырки под влиянием этого поля начнут двигаться к границе соприкосновения полупроводников навстречу друг другу, обогащая запирающий слой носителями зарядов и, тем самым, уменьшая его сопротивление. На границе полупроводников происходит рекомбинация электронов и дырок. Убыль электронов в полупроводнике *n*-типа компенсируется их поступлением с отрицательного полюса источника, а убыль дырок в полупроводнике *p*-типа — уходом электронов из полупроводника на положительный полюс источника.

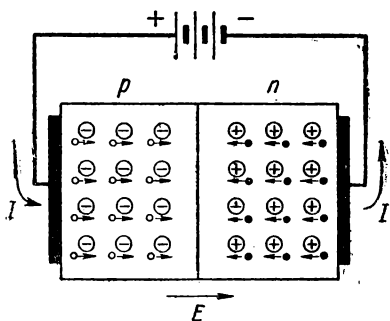


Рис. 107. Прямое включение полупроводникового вентиля.

Если цепь остается замкнутой, то процесс идет непрерывно и в цепи установится ток. Этот ток называется прямым током, а напряжение, его вызывающее, — прямым напряжением.

Прямой ток достигает значительной величины при сравнительно небольшом прямом напряжении, следовательно, сопротивление граничного слоя (прямое сопротивление) относительно мало.

Полупроводник *p*-типа является анодом, а полупроводник *n*-типа — катодом. Поэтому данный вентиль можно по аналогии с электронной лампой назвать диодом.

Режим обратного тока.

При изменении полярности напряжения, то есть в случае, когда полупроводник *n*-типа будет соединен с положительным, а полупроводник *p*-типа — с отрицательным полюсом источника, изменится и направление стороннего поля в полупроводниках (рис. 108). Основные носители электрических зарядов в полупроводниках (электроны в полупроводнике *n*-типа и дырки в полупроводнике *p*-типа) будут теперь двигаться в противоположные стороны от граничного

слоя. Такое движение основных носителей зарядов вызовет расширение запирающего слоя и увеличение его сопротивления.

Движение электронов и дырок в противоположные стороны друг от друга носит кратковременный характер, так как по обе стороны от запирающего слоя в связи с уходом основных носителей зарядов происходит образование объемных зарядов, напоминающих собой как бы две заряженные конденсаторные пластины. Когда разность потенциалов между объемными зарядами уравнивает напряжение, приложенное к полупровод-

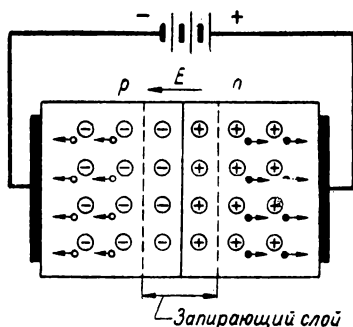


Рис. 108. Обратное включение полупроводникового вентиля.

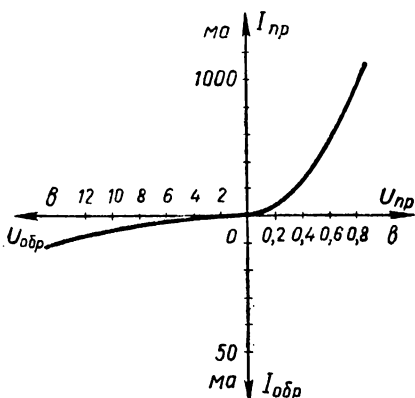


Рис. 109. Вольтамперная характеристика полупроводникового вентиля.

никам, дальнейшее перемещение основных носителей зарядов прекратится. Обратный ток должен был бы прекратиться, если бы в полупроводниках существовали только основные носители зарядов. Но в полупроводниках имеется незначительное количество неосновных носителей зарядов, для которых возникающая разность потенциалов между объемными зарядами будет способствовать их переходу из одного полупроводника в другой и в цепи установится слабый обратный ток.

Расширение запирающего слоя с ростом обратного напряжения происходит медленнее, чем возрастание напряжения, поэтому при чрезмерном возрастании напряжения происходит пробой запирающего слоя.

Граничный слой между двумя полупроводниками практически обладает односторонней проводимостью, что позволяет его использовать в целях выпрямления переменного тока. Зависимость прямого и обратного токов вентиля от напряжения, приложенного к его электродам, называют вольтамперной характеристикой вентиля (рис. 109).

§ 24. УСТРОЙСТВО ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Медноза- кис- ный вентиль.

Меднозаакисный (купроксный) вентиль (рис. 110) состоит из медной пластины 1, покрытой тонким слоем закисы меди 2, и контактного электрода 3.

В результате термической обработки внутренний слой закисы меди, обращенный к медной пластине (рис. 111), насыщается атомами меди и приобретает электронную проводимость (n -типа), а наружный слой, обогащаемый кислородом, — дырочную проводимость (p -типа). Таким образом, слой закисы меди представляет собой два полупроводниковых слоя с различными типами проводимости. Между эти-

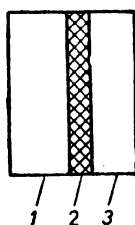


Рис. 110. Схема меднозаакисного вентиля.

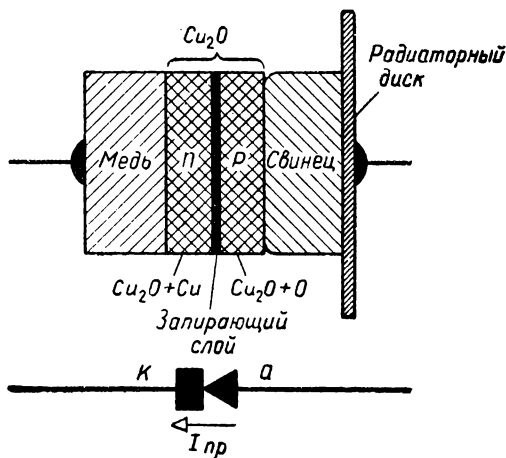


Рис. 111. Схема образования запирающего слоя в меднозаакисном вентиле.

ми слоями внутри закисы меди возникает запирающий слой, обладающий преимущественно односторонней проводимостью.

Контактным электродом служит либо свинцовая пластинка, либо нанесенный на наружную поверхность закисы меди тонко-размельченный графит, смешанный с шеллаком и покрытый тонким металлическим слоем.

Анодом меднозаакисного вентиля является наружный слой закисы с контактным электродом, а катодом — медная пластинка с внутренним слоем закисы меди. Прямой ток внутри диода будет иметь направление от анода к катоду, то есть от слоя с проводимостью p -типа к слою с проводимостью n -типа.

Условное обозначение полупроводникового вентиля на электрических схемах показано в нижней части рисунка 111.

Электрические свойства меднозаакисного вентиля зависят от температуры окружающей среды. С ростом температуры возрастают значения прямого и обратного токов. Это иллюстрирует

семейство вольтамперных характеристик, показанных на рисунке 112. При температуре 50°C обратный ток достигает таких

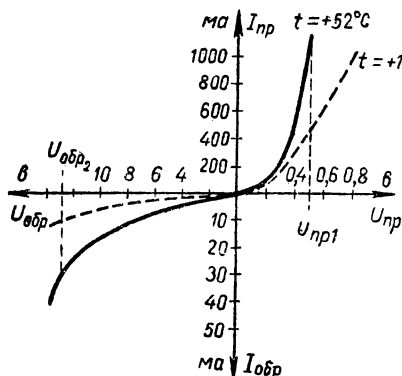


Рис. 112. Семейство вольтамперных характеристик меднозакисного вентилля.

больших значений, что становится соизмеримым с прямым током, то есть меднозакисный вентиль теряет свойство односторонней проводимости.

При температуре ниже -30°C вентиль практически перестает работать, так как при сильном его охлаждении прямой ток резко уменьшается.

Основными параметрами меднозакисных вентиляей являются: допустимая плотность прямого тока, которая составляет около $50 \frac{\text{ма}}{\text{см}^2}$, и допусти-

мая амплитуда обратного напряжения, равная примерно 12 в.

Селеновый вентиль.

Селеновый вентиль (рис. 113) состоит из стальной или алюминиевой пластины 1, называемой опорным электродом, тонкого слоя селена 2, покрывающего опорный электрод, покровного металла 3, напыленного поверх слоя селена, и контактной шайбы 4. Покровный металл представляет собой сплав олова, кадмия и висмута.

В результате особой обработки вентилля при его изготовлении на на-



Рис. 113. Схема селенового вентилля.

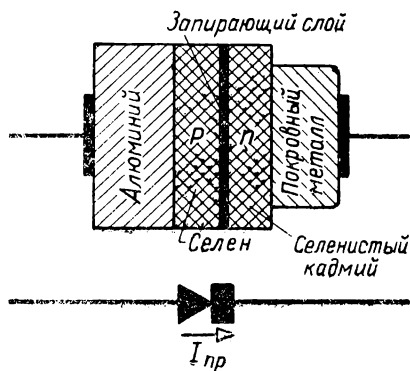


Рис. 114. Схема образования запирающего слоя в селеновом вентиле.

ружной поверхности селена образуется химическое соединение (селенид кадмия), обладающее электронной проводимостью. Сам селен обладает дырочной проводимостью, поэтому на границе между селеном и селенидом создается запирающий слой (рис. 114).

Анодом селенового вентиля является опорный электрод, а катодом — покровный металл.

Для предотвращения короткого замыкания между анодом и катодом покровный металл наносится не по всей поверхности селена. Поэтому рабочая поверхность выпрямительного элемента составляет примерно 75% поверхности опорного электрода.

Допустимое значение плотности прямого тока для селенового диода составляет $50 \frac{\text{ма}}{\text{см}^2}$. Однако селеновые диоды способны выдерживать кратковременную перегрузку (8—10 сек) приблизительно до 2—5-кратного значения от номинального тока. Допустимая амплитуда обратного напряжения — около 25 в.

На выпрямляющие свойства селеновых вентилях (так же, как и меднозакисных) сильное влияние оказывает температура окружающей среды. Но селеновые вентили могут быть использованы в более широком температурном интервале: от -40 до $+70^\circ \text{C}$.

С повышением температуры окружающей среды допустимая плотность тока уменьшается.

Германиевый вентиль.

Германиевые вентили обычно представляют собой диоды плоскостного типа. Основным элементом таких диодов является пластинка монокристалла германия, обладающая электронной проводимостью. Если на одну из сторон пластины германия наплавить каплю индия, то эта сторона пластинки будет обладать дырочной проводимостью.

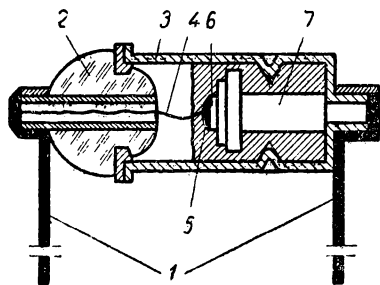


Рис. 115. Схема плоскостного германиевого вентиля (диода):

1 — контактные выводы; 2 — стеклянный изолятор; 3 — корпус; 4 — анод; 5 — индий; 6 — германий; 7 — катод.

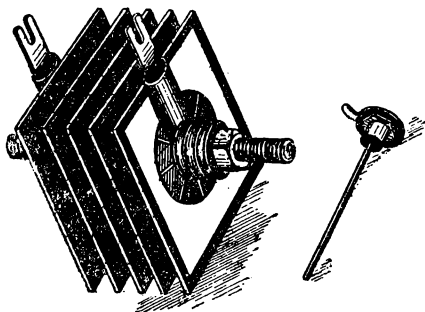


Рис. 116. Внешний вид селенового и германиевого выпрямителя.

Таким образом, в пластинке германия создаются два полупроводниковых слоя, обладающие различными видами проводимости. Между этими слоями внутри пластинки и возникает запирающий слой с односторонней проводимостью.

Германиевые диоды чрезвычайно чувствительны к влаге, которая резко ухудшает их свойства. Поэтому конструкция герма-

ниевых диодов предусматривает надежную их герметизацию. На рисунке 115 представлено схематическое устройство плоскостного германиевого диода.

Прямой ток германиевого диода с плоским контактом может достигать нескольких ампер, а допустимое обратное напряжение — нескольких сотен вольт. С повышением температуры окружающей среды допустимое обратное напряжение значительно снижается. Температурный интервал, в котором могут работать рассматриваемые диоды, составляет от $+70$ до -60°C .

Германиевые вентили имеют значительно меньшие размеры, чем меднозакисные и селеновые вентили при равном прямом токе (рис. 116).

§ 25. СХЕМЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Полупроводниковые выпрямители. *Устройство, в котором осуществляется выпрямление переменного тока при помощи вентилей, называют электрическим выпрямителем.* Рассмотрим те из них, у которых выпрямляющим элементом является полупроводниковый вентиль.

Полупроводниковые выпрямители выгодно отличаются от кенотронных (ламповых) выпрямителей тем, что они, во-первых, способны выпрямлять большие токи, во-вторых, они имеют более высокий к. п. д., в-третьих, не имеют цепей накала и не нуждаются во вспомогательных источниках питания.

Выпрямители однофазного тока подразделяют на однополупериодные и двухполупериодные. Для обеспечения заданного значения выпрямленного напряжения каждый из этих выпрямителей обычно снабжают трансформатором.

Однополупериодный выпрямитель. Схема однополупериодного выпрямителя представлена на рисунке 117. В течение одного полупериода переменного напряжения вторичной обмотки трансформатора анод вентиля будет иметь по отношению к катоду положительный потенциал. В этот полупериод вентиль работает в режиме прямого тока. Спустя полупериод анод приобретает отрицательный потенциал и вентиль будет работать в режиме обратного тока.

Следовательно, ток в цепи нагрузки будет только в течение половины каждого периода — пульсирующий ток i_2 (рис. 117, б).

Пульсирующий ток в сопротивлении нагрузки R создает падение напряжения u_R , которое так же, как и ток, действует только в течение половины каждого периода. Это напряжение называют выпрямленным напряжением.

В проводящий полупериод на вентиле создается незначительное падение напряжения $u_{пр}$, которое называют прямым напряжением.

В непроводящий полупериод анод имеет отрицательный потенциал по отношению к катоду и тока в цепи нагрузки нет.

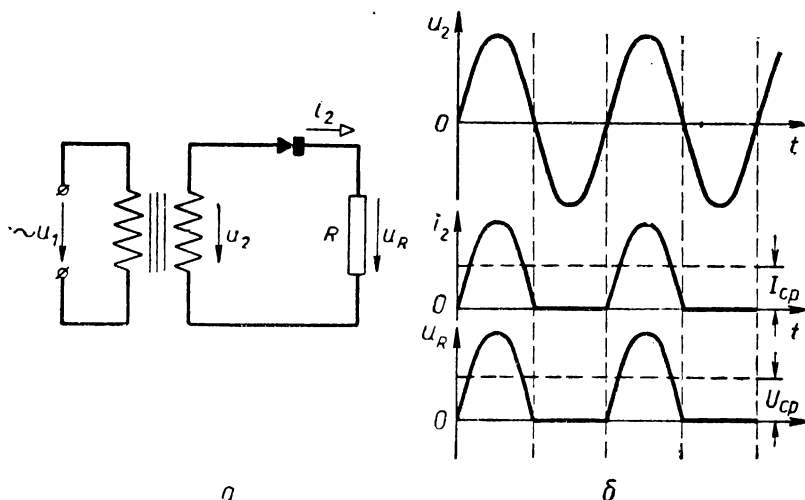


Рис. 117. Схема однополупериодного выпрямителя (а) и графики напряжения и тока (б).

В этом случае все напряжение вторичной обмотки трансформатора будет приложено к вентилю. Его называют обратным напряжением $U_{обр}$. Максимальное значение этого напряжения рав-

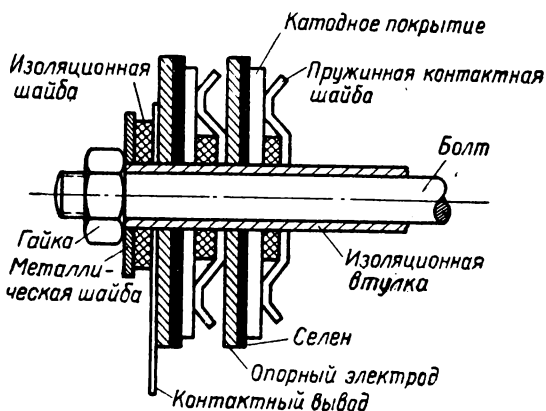


Рис. 118. Детали селенового столбика.

но амплитудному значению напряжения вторичной обмотки трансформатора.

Если обратное напряжение превышает допустимое значение для каждого вентиля, то вентили соединяют последовательно.

Число вентиляй выбирают таким, чтобы обратное напряжение на каждом вентиле не превышало допустимого значения.

Последовательно соединенные вентили образуют так называемые «выпрямительные столбики» (рис. 118).

Двухполупериодные выпрямители.

Двухполупериодные выпрямители собирают по двум схемам: со средней точкой вторичной обмотки трансформатора (рис. 119) и по мостовой схеме (рис. 120).

В выпрямителе со средней точкой вторичной обмотки трансформатора (рис. 119) работа вентиляй в режиме прямого тока происходит поочередно, так как потенциалы их относительно

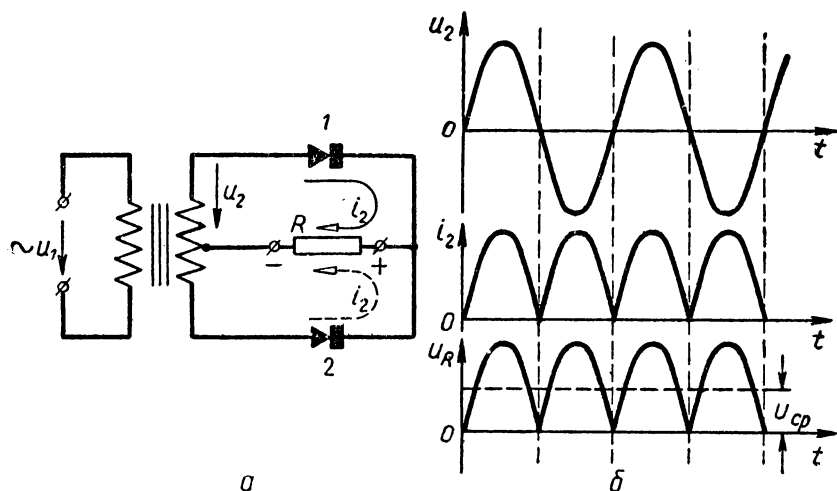


Рис. 119. Схема двухполупериодного выпрямителя со средней точкой (а) и графики напряжения и тока (б).

средней точки поочередно меняются. При положительном потенциале анода вентиля 1 в цепи нагрузки будет ток, показанный на схеме сплошной стрелкой, а при положительном потенциале анода вентиля 2 — ток, показанный пунктирной стрелкой.

Следовательно, ток в нагрузке будет в течение обеих половин периода (см. графики рисунка 119, б).

Схема мостового выпрямителя изображена на рисунке 120. Когда зажим M вторичной обмотки трансформатора будет иметь положительный потенциал, в цепи установится ток, направленный через вентиль 1, нагрузку и вентиль 3 (указано сплошной стрелкой). В этот момент вторая пара вентиляй — 2 и 4 — работает в режиме обратного тока, так как к ним приложено обратное напряжение.

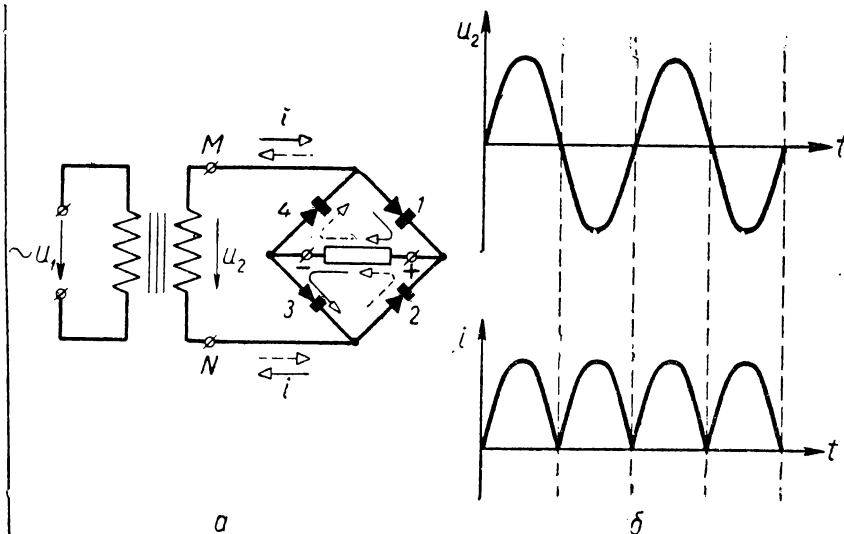


Рис. 120. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя (а) и графики напряжения и тока (б).

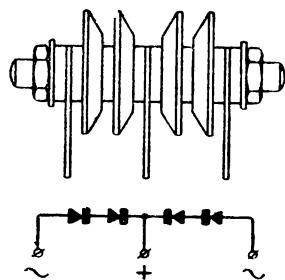


Рис. 121. Соединение вентилей выпрямителя, собранного по схеме с выведенной средней точкой трансформатора.

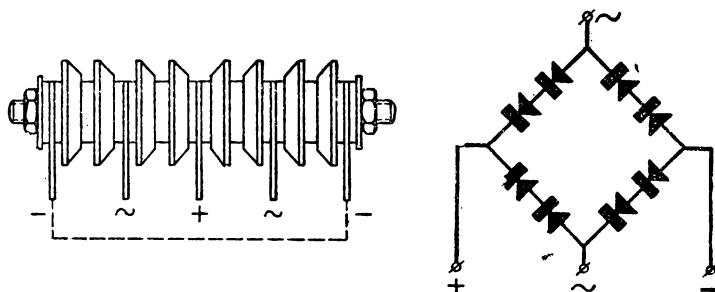


Рис. 122. Соединение вентилей выпрямителя, собранного по мостовой схеме.

При положительном потенциале зажима N вторичной обмотки трансформатора вентили 2 и 4 работают в режиме прямого тока.

Каждая пара вентиля работает в режиме прямого тока только в течение половины периода, но ток в нагрузке не будет прерываться в течение обеих половин периода.

Вентили в двухполупериодных выпрямителях также собирают последовательно, чтобы уменьшить обратное напряжение на каждом из них. На одном монтажном болту часто собирают не только последовательно соединенные элементы, но и несколько самостоятельных секций выпрямителя с соответствующими выводами. На рисунке 121 показано соединение диодов в столбик с выведенной средней точкой. Такой столбик применяется для выпрямителей со средней точкой вторичной обмотки трансформатора. На рисунке 122 показано соединение элементов в столбик по мостовой схеме.

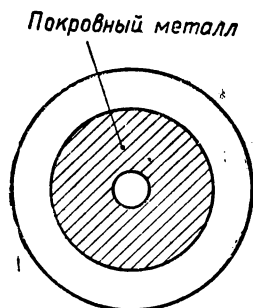


Рис. 123. К задаче № 1.

Упражнения и задачи

1. На рисунке 123 изображена шайба селенового выпрямителя в натуральную величину. Определите величину максимально допустимого тока для шайбы данных размеров. Ответ: $I_{\text{доп}} \approx 0,38 \text{ а}$.
2. Амплитуда напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора равна 300 в. Выпрямитель собран по мостовой схеме. Определите минимальное число селеновых шайб в каждом плече моста. Ответ: 6 шайб.
3. Определите рабочую поверхность вентиля, если ток нагрузки $I_0 = 0,6 \text{ а}$, допустимая плотность тока $I = 50 \frac{\text{ма}}{\text{см}^2}$. Ответ: $S = 12 \text{ см}^2$.

ГЛАВА VIII

ПРОИЗВОДСТВО И ПЕРЕДАЧА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

§ 26. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Типы электрических станций. Электрическая энергия вырабатывается на специальных предприятиях — электрических станциях. На этих станциях различные виды энергии (воды, ветра, топлива) преобразуются в энергию электрическую. Этот процесс осуществляется при помощи электрических генераторов, связанных с первичными двигателями

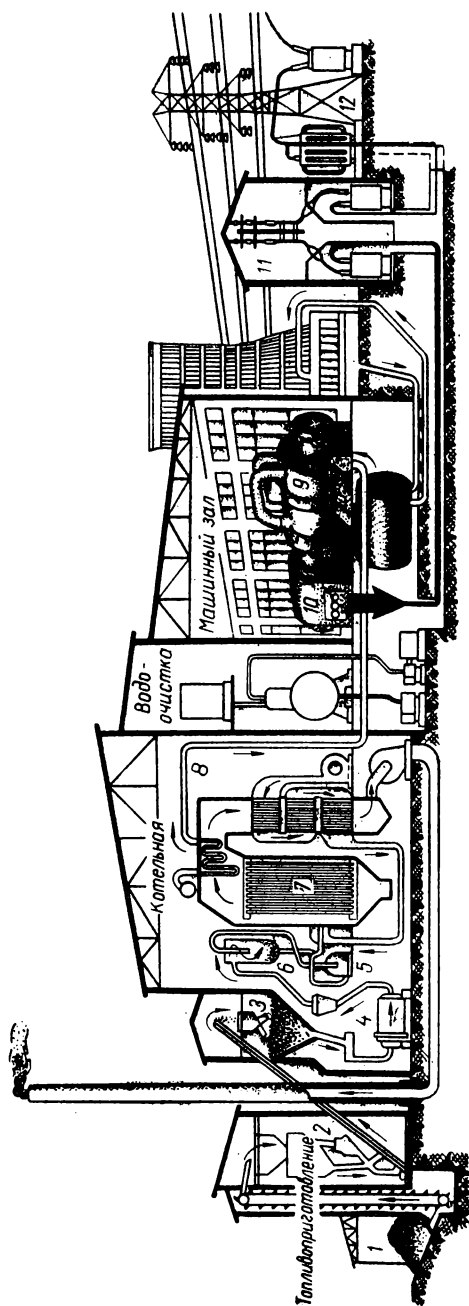


Рис. 124. Схема паротурбинной электростанции.

(паровыми, гидравлическими или газовыми турбинами, двигателями внутреннего сгорания и др.).

В зависимости от вида природной энергии, преобразуемой в электрическую, электростанции подразделяют на тепловые, гидравлические, атомные и другие.

Тепловые электрические станции.

Основным типом тепловых электростанций являются паротурбинные электростанции. Они оборудуются паровыми турбинами и котлами. Паротурбинные электростанции сооружаются главным образом как станции большой мощности.

Тепловые электростанции могут снабжать потребителей не только электрической энергией, но также паром и горячей водой для производственных нужд и бытовых целей.

Паротурбинные электростанции, которые вырабатывают только электрическую энергию, называют государственными районными электростанциями (ГРЭС). Электростанции, которые одновременно с электрической энергией снабжают потребителей паром и горячей водой, называют теплоэлектроцентралями (ТЭЦ).

На рисунке 124 приведена схема паротурбинной электростанции, работающей на твердом (пылеугольном) топливе. Схема позволяет рассмотреть технологический процесс работы такой станции.

Уголь из топливоприемника 1 с помощью транспортера

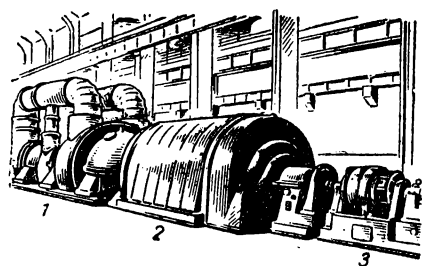


Рис. 125. Турбогенератор 50 000 ква, 10,75 кв, 50 гц, 3000 об/мин:

1 — паровая турбина; 2 — трехфазный генератор; 3 — генератор постоянного тока в цепи обмотки возбуждения трехфазного генератора.

элеваторного типа подается в дробильное устройство 2. Из бункера 3 раздробленный уголь по трубопроводам подается в угольные мельницы 4, где высушивается горячим воздухом и превращается в пыль. Угольная пыль втягивается мельничными вентиляторами 5 в бункер 6, откуда через специальные пылеугольные горелки подается в топку парового котла 7. Пар, образующийся в паровом котле, по трубопроводу 8 поступает в паровую турбину 9, установленную в машинном зале. Паровая турбина вращает ротор трехфазного генератора 10. Энергия, вырабатываемая электрическими генераторами, передается к потребителям через главное распределительное устройство 11 и повысительную подстанцию 12.

Трехфазные генераторы, соединенные с паровыми турбинами, называют турбогенераторами (рис. 125). Роторы турбогенераторов вращаются с постоянной скоростью 3000 об/мин или 1500 об/мин.

Атомные электростанции. Источником энергии на атомных электростанциях является ядерная энергия, которая освобождается при делении ядер атомов тяжелых элементов. Делятся ядра в специальном устройстве — реакторе. Вещество, используемое для работы ядерного реактора, называют ядерным топливом.

Простейшая схема атомной электростанции дана на рисунке 126. Станция имеет четыре цеха. Первый цех называется реакторным. В нем находится атомный реактор, в котором протекает цепная реакция с выделением большого количества тепла. Во втором, смежном с ним цехе, находится парогенератор. Сюда поступает тепло, отводимое из активной зоны реактора теплоносителем по трубопроводу. Теплоноситель может быть в виде воды, газа или жидкого металла. Циркулируя по специальным каналам в активной зоне реактора, он омывает тепловыделяю-

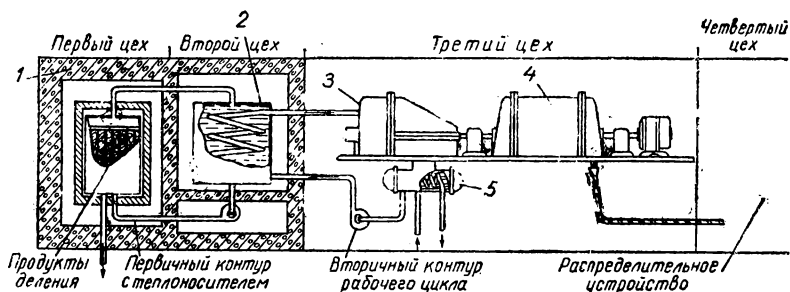


Рис. 126. Схема двухконтурной атомной электростанции:

1 — реактор; 2 — парогенератор; 3 — турбина; 4 — генератор; 5 — конденсатор.

щие элементы, нагревается и переносит тепло в парогенератор. Непрерывную циркуляцию теплоносителя обеспечивают циркуляционные насосы.

В парогенераторе, в среде нагретого теплоносителя помещен трубопровод в виде змеевика, в котором вода нагревается и превращается в пар. Пар поступает в турбины, установленные в третьем (турбинном) цехе. Паровые турбины приводят во вращение турбогенераторы. Четвертым цехом является распределительное устройство.

Гидроэлектрические станции. Гидроэлектрические станции (ГЭС) обычно сооружаются на реках. Для их работы необходима разность уровней водного потока. Это достигается сооружением плотин. Для рек с крутыми берегами характерны высокие плотины (сотни метров). На равнинных реках с отлогими берегами сооружают относительно невысокие плотины (десятки метров).

На рисунке 127 показан схематический разрез машинного здания ГЭС. Гидротурбину 5 устанавливают в нижней части

здания. Электрический генератор 6, помещенный над турбиной, имеет с ней общий вал.

Вода на лопасти турбины поступает через спиральную камеру 3 и направляющий аппарат 4. Направляющий аппарат

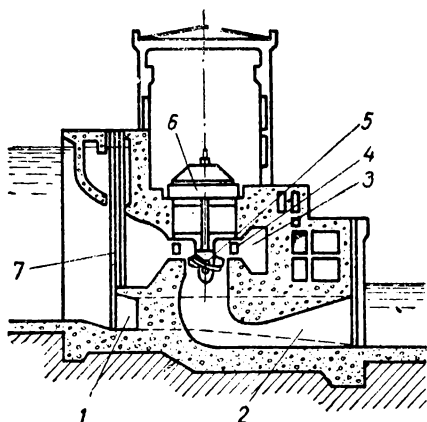


Рис. 127. Схематический разрез машинного здания гидроэлектростанции.

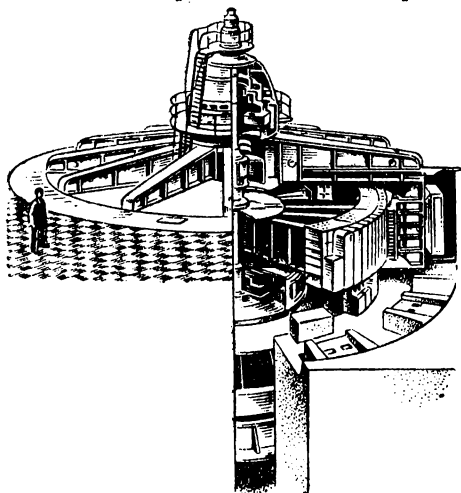


Рис. 128. Гидрогенератор Волжской ГЭС имени В. И. Ленина.

имеет поворотные лопасти, которыми регулируют количество воды, поступающей на лопасти турбины. Тем самым регулируют активную мощность турбины. Из турбины воду отводят через отсасывающую трубу 2.

Для сброса излишков воды в нижней части здания ГЭС между турбинами предусмотрены специальные водосбросные отверстия 1, перекрываемые стальными затворами 7.

Генераторы, приводимые во вращение гидравлическими турбинами, называют гидрогенераторами (рис. 128). Скорости вращения гидрогенераторов колеблются в пределах от 60 до 750 об/мин.

§ 27. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Передача электрической энергии.

В непосредственной близости от машинного зала электростанции строят повысительную трансформаторную подстанцию, которая может быть как закрытого, так и открытого типа (то есть внутри самого здания электростанции или вне его).

Трансформаторные повысительные подстанции районных электрических станций представляют собой сооружения (рис. 129), главными частями которых являются трансформаторы *T*, распределительные устройства, масляные выключатели *МВ* и разъединители *Р*.

Масляные выключатели необходимы для отклонения и включения линии электропередачи, соединяющей повысительную трансформаторную подстанцию с районом потребления. Масляные выключатели отличаются от обычных рубильников тем, что

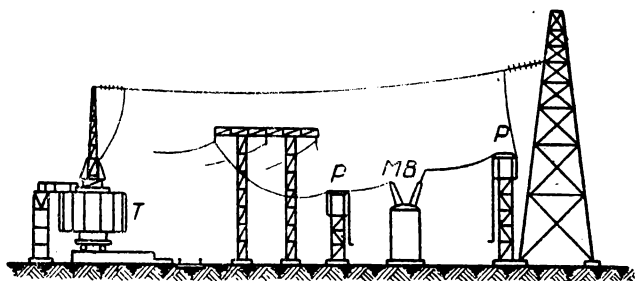


Рис. 129. Трансформаторная повысительная подстанция.

разрыв цепи под нагрузкой происходит в баке с маслом. Это обеспечивает быстрое гашение дуги, возникающей между контактами при их расхождении.

В последнее время большое распространение получили воздушные выключатели, где гашение дуги производится струей сжатого воздуха.

Разъединителями отключают от сети отдельные аппараты для безопасного их осмотра и ремонта. Разъединители представляют собой как бы большие рубильники без специального приспособления для гашения дуги, поэтому разъединителями можно разрывать цепь только при отсутствии в ней тока.

С повысительной трансформаторной подстанции электрическая энергия при напряжении в 35, 110 или 220 кВ (в зависимости от дальности передачи) передается в район потребления преимущественно по воздушной линии (рис. 130). Для передачи электрической энергии на очень большие расстояния, например от Волжской ГЭС имени В. И. Ленина в Москву (926 км), используют сверхвысокое напряжение в 500 кВ.

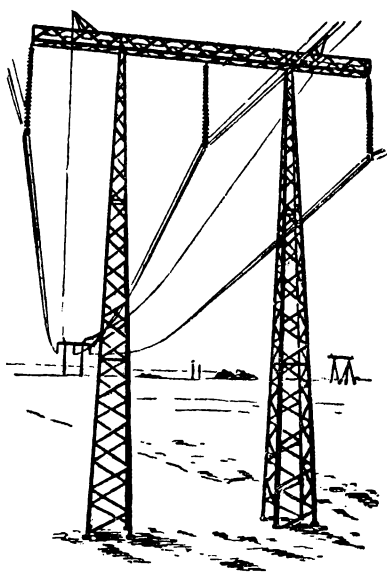


Рис. 130. Воздушная линия электропередачи.

Воздушные линии выполняют голым медным или алюминиевым проводом. Для увеличения прочности алюминиевого провода его объединяют со стальным. Стале-алюминиевый провод представляет собой стальную жилу, вокруг которой навиты алюминиевые проволоки.

Провода с помощью изоляторов укрепляют на опорах. Тип и размеры опор, а также изоляторов зависят от величины рабо-

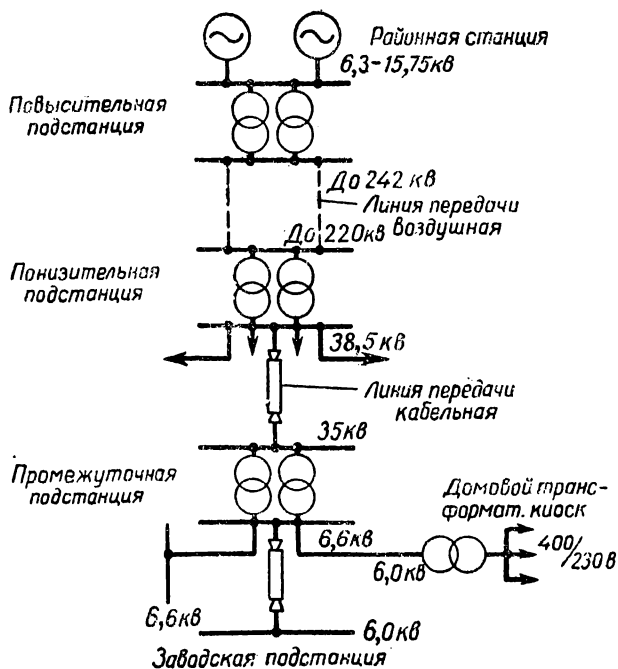


Рис. 131. Схема электроснабжения.

чего напряжения. Для высоковольтных линий передач с напряжением до 35 кВ используют деревянные опоры, а для линий более высокого напряжения — стальные.

Воздушная линия в районе потребления электрической энергии оканчивается понижительной трансформаторной подстанцией, конструктивная схема которой аналогична повысительной.

На понижительной трансформаторной подстанции напряжение понижается до 35 или 6 кВ и по кабельной подземной сети (в крупных населенных пунктах) поступает непосредственно к потребителю. У потребителя напряжение еще раз снижается до рабочего напряжения, например 500 , 220 или 127 В .

Иногда между понизительной трансформаторной подстанцией и подстанцией у потребителей ставят промежуточные понизительные подстанции. То есть на первой понизительной трансформаторной подстанции напряжение понижается с 220 до 35 кВ, на второй, промежуточной, — с 35 до 6 кВ и у потребителя оно еще раз понижается с 6 кВ до рабочего напряжения. На рисунке 131 дана принципиальная схема электроснабжения.

Совместная работа электростанций.

Крупный промышленный район снабжается электроэнергией одновременно несколькими станциями, которые работают на одну общую сеть. Связанные между собой сетью высокого напряжения электрические станции образуют энергетическую систему. Упрощенная схема энергетической системы показана на рисунке 132.

Объединение станций в энергетическую систему позволяет более рентабельно использовать мощность станции, а также гарантирует бесперебойное снабжение электроэнергией данного района. При всяких аварийных случаях на станции ее нагрузка может быть переведена на другие станции.

В ближайшие годы будут созданы единые энергетические системы Европейской части СССР и Центральной Сибири,

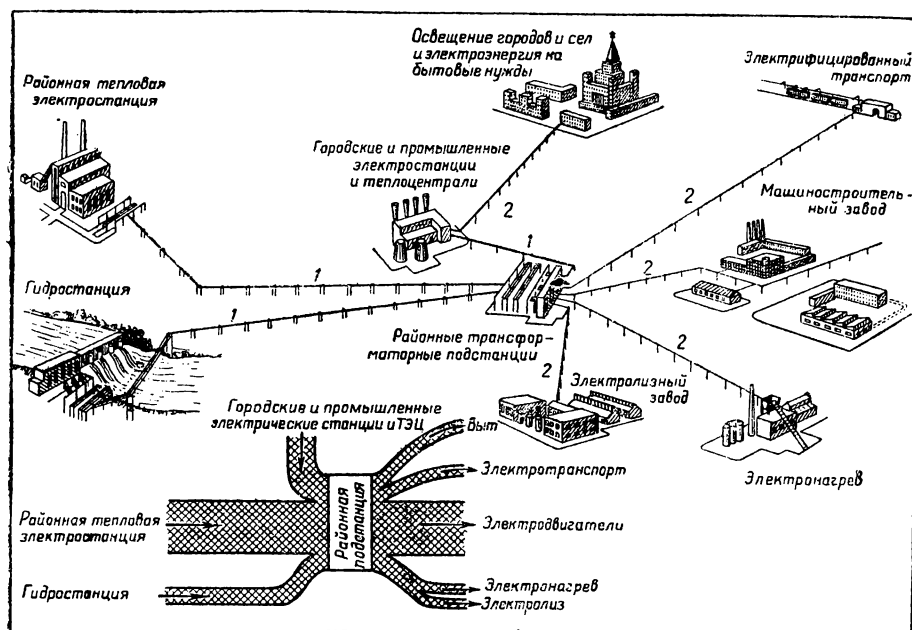


Рис. 132. Схематическое изображение энергетической системы.

Внизу — диаграмма выработки энергии между станциями разного типа и распределения ее между потребителями.

объединенные энергетические системы в районах северо-запада и запада, Закавказья, Казахстана и Средней Азии.

К 1970 г. завершится создание единой энергетической системы европейских стран народной демократии и Европейской части Советского Союза.

§ 28. КОЭФФИЦИЕНТ МОЩНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ И ЕГО ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ

Коэффициент мощности предприятия. Любое современное промышленное предприятие снабжается электрической энергией переменного тока. Основная часть этой энергии расходуется на совершение полезной работы либо преобразуется в тепло. Другая, менее значительная часть электрической энергии связана с образованием магнитных полей в токоприемниках.

Энергию, поступающую в токоприемники и преобразуемую в них в тепло или в энергию механического движения, называют активной энергией переменного тока. Она используется предприятием для выработки продукции. Расход активной энергии покрывается за счет энергии, развиваемой генератором, то есть за счет энергии топлива или падающей воды.

Энергию, связанную с магнитными полями токоприемников, называют реактивной энергией переменного тока. Для выработки продукции реактивная энергия не может быть использована.

Электрические установки переменного тока, в зависимости от особенностей происходящего в них энергетического процесса, можно разделить на две группы.

1. Установки, только расходующие электрическую энергию. К ним относятся электрические печи сопротивления, лампы накаливания, электронагревательные приборы. Такие установки, как известно, характеризуют величиной активной мощности P .

2. Установки, которые наряду с расходом энергии периодически запасают ее в магнитных полях, без которых они работать не могут. К ним относятся асинхронные двигатели, трансформаторы, индукционные печи и другие электромагнитные устройства. Эти установки характеризуют двумя величинами: активной мощностью P и реактивной мощностью Q .

Соотношение между активной и реактивной мощностями отдельного токоприемника оценивается его коэффициентом мощности,¹ величина которого определяется по формуле

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}.$$

¹ Не следует смешивать коэффициент мощности с коэффициентом полезного действия.

Для установок первой группы коэффициент мощности токоприемников равен единице, так как в них реактивная мощность равна нулю.

Для установок второй группы коэффициент мощности всегда меньше единицы. Его величина зависит от режима работы установки. Например, во время холостого хода асинхронного двигателя, когда энергия расходуется только на покрытие небольших потерь в двигателе, его активная мощность мала, а реактивная — велика. Следовательно, коэффициент мощности при холостом ходе будет низким (около 0,1).

При нагрузке двигателя величина активной мощности P увеличивается, а величина реактивной мощности Q практически не изменяется, так как энергия, запасаемая во вращающемся магнитном поле, не зависит от расхода энергии на совершение полезной работы. Таким образом, с увеличением активной мощности возрастает и коэффициент мощности двигателя (см. формулу, приведенную выше). При номинальной нагрузке двигателя его коэффициент мощности достигает 0,7—0,9.

Исходя из величин активной ($P_1; P_2; \dots; P_n$) и реактивной ($Q_1; Q_2; \dots; Q_n$) мощностей отдельных токоприемников, можно определить значение суммарной активной мощности $P_{\text{общ}}$ и реактивной мощности $Q_{\text{общ}}$ всех, одновременно работающих токоприемников предприятия

$$P_{\text{общ}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n,$$

$$Q_{\text{общ}} = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n.$$

Отношение

$$\frac{P_{\text{общ}}}{\sqrt{P_{\text{общ}}^2 + Q_{\text{общ}}^2}} = k_{\text{средн}} = \cos \varphi_{\text{средн}}$$

называют средним коэффициентом мощности предприятия.

Коэффициент мощности предприятия показывает, какая часть энергии, поступающей во все токоприемники предприятия, является активной. Одновременно с этим коэффициент мощности характеризует потребность токоприемников в реактивной энергии. Чем выше коэффициент мощности предприятия, тем меньше потребность в реактивной энергии и тем большая часть всей поступающей энергии непосредственно используется в производственном процессе.

Последствия низкого коэффициента мощности предприятия. Экономичность передачи электрической энергии от генераторов к токоприемникам зависит от величины коэффициента мощности предприятия. Рассмотрим следующий пример. Пусть два предприятия расходуют равное количество активной энергии, но имеют различную потребность в реактивной энергии, то есть на одном из них больше установок второй группы. Иначе говоря, коэффициенты мощности этих предприятий

различны. Будем считать, что каждое предприятие соединено с электростанцией отдельной линией электропередач, а напряжение между проводами обеих линий одинаково. Тогда общее количество энергии, передаваемое вдоль линии, и ток будут больше в той линии, которая соединена с предприятием, имеющим более низкий коэффициент мощности (там, где больше установок второй группы). Однако чем больше будет линейный ток, тем сильнее будут нагреваться провода. Количество активной энергии, теряемой на нагрев линейных проводов, зависит от квадрата тока. Например, если тепловые потери в линии, соединяющей электростанцию с предприятием, имеющим $\cos \varphi_{\text{средн}} = 1$, принять за 100%, то при снижении коэффициента мощности до $\cos \varphi_{\text{средн}} = 0,8$ и том же расходе активной энергии в токоприемниках тепловые потери возрастут до 156%, а при $\cos \varphi_{\text{средн}} = 0,5$ они достигнут 400%. Таким образом, передача электрической энергии к предприятию с низким коэффициентом мощности экономически невыгодна вследствие больших потерь активной энергии на нагрев линейных проводов.

Одновременно с этим электрические установки предприятий с невысоким коэффициентом мощности снижают к. п. д. электрических станций. Это объясняется тем, что величина к. п. д. агрегата турбина-генератор зависит от мощности генерирования активной энергии. С увеличением активной мощности токоприемников к. п. д. турбины и генератора соответственно возрастает. Когда активная мощность нагрузки станет равной номинальной мощности генератора, к. п. д. агрегата турбина — генератор достигнет наибольшей величины. Если коэффициент мощности токоприемников значительно меньше единицы, то турбины и другие агрегаты станции будут недогружены, а следовательно, они будут иметь низкий к. п. д.

Отсюда становится понятным стремление уменьшить долю реактивной энергии в общем потоке энергии, передаваемой от генератора к токоприемникам.

<p>Способы повышения коэффициента мощности.</p>	<p>Задача снижения потребности предприятий в реактивной энергии является важнейшей проблемой электроснабжения, получившей название улучшения или повышения коэффициента мощности.</p>
--	---

Основными приемниками реактивной энергии являются асинхронные двигатели, на долю которых приходится около 70% всей реактивной энергии. Поэтому для повышения коэффициента мощности промышленных предприятий прежде всего стремятся обеспечить рациональную эксплуатацию всех электродвигателей переменного тока.

Асинхронный электродвигатель работает с наилучшим коэффициентом мощности при нагрузке от 75% до 100% его номинальной мощности. Поэтому мощность установленных двигате-

лей должна быть такой, чтобы их нагрузка была близкой к номинальной мощности.

Если средняя нагрузка асинхронного двигателя не превышает 45 % его номинальной мощности, то такой электродвигатель заменяют соответствующим двигателем меньшей мощности.

Далее стремятся избежать бесцельных холостых ходов станков, компрессоров, насосов и других механизмов, приводимых в действие асинхронными двигателями: если на отдельных станках работы нет — электродвигатели отключают от сети.

Холостой ход электродвигателя может быть и во время работы станка. Это так называемые межоперационные периоды, то есть та часть станочного времени, которая затрачивается на замену инструмента, на снятие обработанной детали и установку новой и т. д. Для уменьшения времени холостого хода в межоперационный период применяют специальные ограничители. Они автоматически отключают электродвигатель, если межоперационный период длится более 10 сек.

Низкое качество ремонта асинхронных электродвигателей также может служить причиной снижения их коэффициента мощности. При ремонте электродвигателей их пазы пропиливают, чтобы удобнее было укладывать провода. Увеличение воздушного зазора машины, как показывают измерения, приводит к увеличению реактивной мощности машины и к снижению ее коэффициента мощности. Поэтому после ремонта электродвигатели подвергают испытаниям на специальных стендах. Машины, у которых после ремонта энергетические показатели — коэффициент мощности и к. п. д. — окажутся пониженными, не используют в дальнейшей работе.

Дополнительной мерой для повышения коэффициента мощности является установка на подстанциях промышленных предприятий или в цехах специальных устройств, например конденсаторов, которые обеспечивают уменьшение сдвига фаз тока в нагрузке по отношению к напряжению.

Упражнения и задачи

1. На рисунке 133 изображена принципиальная электрическая схема электроснабжения объектов района потребления от трех электрических станций. Взаимное расположение этих электростанций, трансформаторных подстанций и объектов потребления показано на рисунке 132. На ГРЭС установлены генераторы мощностью 100 000 *квa*, на ГЭС — мощностью 12 000 *квa*, а на ТЭЦ — 25 000 *квa*.

Сопоставив рисунки, укажите: а) С каким напряжением энергия от понизительной трансформаторной подстанции передается на промышленные предприятия? б) Какая станция вы-

работывает электроэнергию при двух повышенных напряжениях? в) Какое напряжение имеют генераторы ГЭС и ГРЭС?

2. К генератору мощностью 1000 *кв*а подключены установки с общей активной мощностью 800 *квт*. Определите коэффициент мощности генератора.

Ответ: $\cos \varphi = 0,8$.

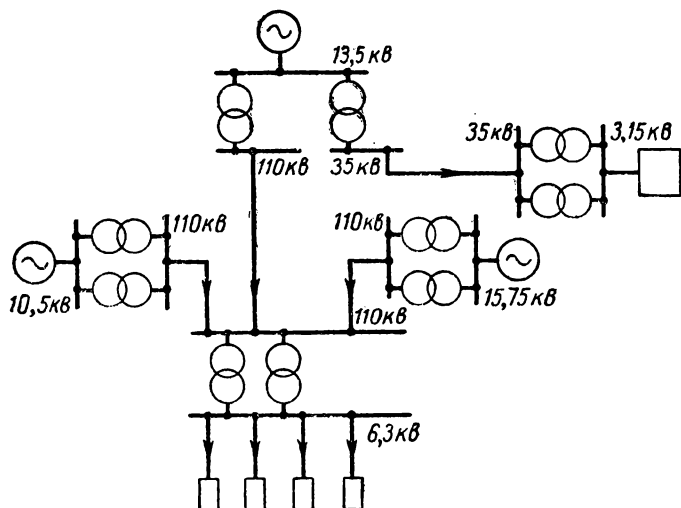


Рис. 133. К задаче № 1.

3. Активная энергия переменного тока, учтенная счетчиком за 10 час., равна 20 *квт* · ч. Определите величину коэффициента мощности приемника, если при напряжении 220 *в* ток в цепи 15 *а*.

Ответ: $\cos \varphi = 0,6$.

Раздел третий

ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ

ГЛАВА IX

СИСТЕМЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

§ 29. УПРАВЛЕНИЕ МАШИНАМИ И КОНТРОЛЬ ЗА ИХ РАБОТОЙ

**Работа машин
под контролем
и управлением
человека.**

На любом современном промышленном предприятии все основные операции производственного процесса выполняют машины и технологические установки. Они обрабатывают материалы и полуфабрикаты, перемещают изделия и грузы, изменяют структуру, состав или состояние вещества и т. д.

Нормальная работа машин и установок обеспечивается либо человеком, либо особой системой технических устройств при косвенном участии человека.

Машины, работающие под непосредственным контролем человека, давно используются для механизации производственных операций. Каждая из них оснащена комплектом показывающих измерительных приборов и снабжена механизмом управления, приводимым в действие вручную. Нормальный режим работы такой машины обеспечивает рабочий: он не только наблюдает за правильностью хода машины, но и управляет ею, переводя из одного режима работы в другой.

Непосредственное участие человека в управлении машинами накладывает некоторые ограничения на их мощность и темп работы. Дело в том, что с увеличением скорости движения и мощности машин ручное управление требует все большего и большего напряжения физических сил рабочего, а по достижении определенных пределов становится просто невозможным. Тем самым производительность машины, контролируемой и управляемой человеком, в сильной степени зависит от профессионального мастерства работающего и ограничена его личными природными данными — остротой органов чувств, физической силой, работоспособностью и т. д.

Работа машин под контролем и управлением автоматических устройств.

Стремление устранить отмеченные выше ограничения мощности и темпа работы машин, а также необходимость повысить точность операций привели к разработке автоматических устройств, способных без прямого содействия человека управлять машинами и контролировать их работу. Название этих устройств происходит от греческого слова «ауто...» — сам, самостоятельный. Некоторые из них следят за исправностью обслуживаемой ими машины или за правильностью ее действий; другие — осуществляют все операции управления или регулирования, требуемые технологией производства. Они частично или полностью освобождают человека от необходимости следить за действующими машинами или управлять ими. Его участие в обеспечении нормальной работы машин становится косвенным и сводится к предварительной настройке, наладке и общему надзору за работой автоматических устройств.

§ 30. АВТОМАТЫ

Машины-автоматы.

В настоящее время работу многих машин полностью направляют и контролируют автоматические устройства. Такие машины вырабатывают продукцию и изготавливают предметы вообще без какого-либо прямого участия и содействия человека. Их называют автоматами.

Это название произошло от древнегреческого слова «аутоматос», что означает самодвижущийся. В античной Греции так называли некоторые механические устройства, выполнявшие ряд согласованных и соподчиненных движений без вмешательства человека.

Однако все известные нам весьма остроумные автоматы древности использовались только как средства религиозного культа или забавы и никакого практического применения не имели. Первым автоматом, созданным для практической цели, были часы. Именно появление часовых механизмов подало мысль применить автоматы в производстве.

Машины-автоматы бывают двух видов. Автоматы первого вида выполняют только одну серию технологических операций. Они называются циклическими автоматами. Последовательность операций в таких машинах регулируется особым внутренним механизмом, приводимым в движение вспомогательным электродвигателем. К ним относятся, например, разнообразные металлорежущие станки — автоматы (рис. 134), выполняющие токарную обработку в соединении со сверлильными и расточными работами, нарезанием резьб и т. д. Циклические автоматы не могут изменить ни заданного темпа, ни заданного режима.

Их самодействующий механизм управления не контролирует ход технологических операций, выполняемых машиной.

Автоматы второго вида могут без прямого содействия человека изменять режим своей работы в зависимости от требований технологии производства или изменений внешних условий. Их называют рефлекторными автоматами. Работу рефлекторного автомата обеспечивает сложное автоматическое

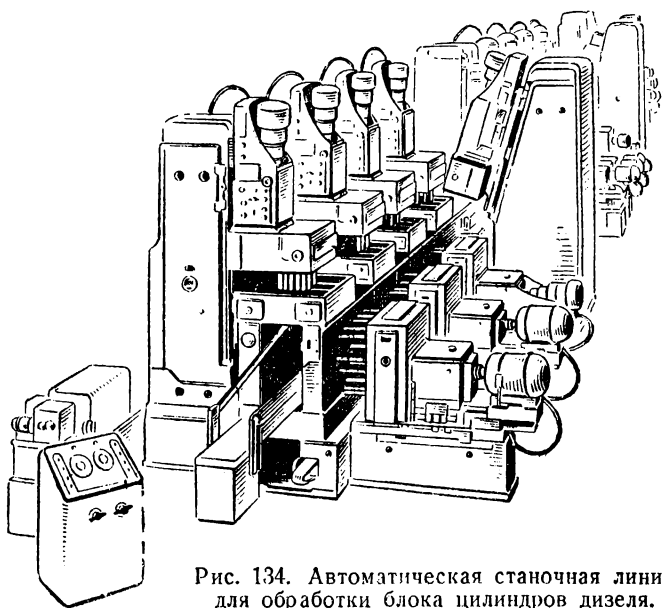


Рис. 134. Автоматическая станочная линия для обработки блока цилиндров дизеля.

устройство, одновременно осуществляющее как контроль за ходом технологического процесса, так и управление машиной в соответствии с заданной программой. Программа заранее устанавливается технологами. В соответствии с выбранной программой обслуживающий персонал производит настройку этого устройства перед пуском машины в работу.

В качестве примера рефлекторного автомата может быть назван гидрогенератор, снабженный особым устройством — «автооператором», осуществляющим без какого-либо вмешательства человека запуск агрегата, управление и контроль за его работой, а также отключение.

Приборы-автоматы. Кроме энергетических и рабочих машин-автоматов, значительную ценность для производства имеют всевозможные приборы и аппараты, предназначенные для автоматического выполнения различных опе-

раций, связанных с эксплуатацией установленного оборудования. К ним относятся, в частности, приборы сигнализации, блокировки, защиты и контроля.

Каждый из этих приборов снабжается соответствующим автоматическим устройством, посредством которого данный прибор может длительно и надежно совершать свойственные ему операции без непосредственного участия обслуживающего персонала.

§ 31. АВТОМАТИКА В СОВРЕМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Разновидности автоматических устройств и их назначение. Автоматические устройства в зависимости от выполняемых ими функций подразделяют на три вида:

1) устройства автоматического контроля, измеряющие основные величины, характеризующие работу производственных установок или качество вырабатываемой продукции;

2) устройства автоматического управления, осуществляющие включение и отключение, а также принудительное изменение режима работы машин и установок;

3) устройства автоматического регулирования, поддерживающие постоянными или, наоборот, изменяющие по заданному закону численные значения основных показателей технологических процессов (температуры, скорости, давления и пр.).

Характерная черта автоматических устройств заключается в том, что они не выполняют технологических и транспортных операций (их выполняют рабочие машины), а осуществляют только процессы измерения, управления и регулирования без непосредственного участия человека.

Устройства автоматического контроля, управления и регулирования дают возможность резко увеличить мощность и темп машин, а следовательно, повысить их экономичность и производительность; они обеспечивают непрерывное ведение механизированных производственных процессов с весьма высокой скоростью и точностью. Наконец автоматические устройства практически устраняют возможность ошибочного выполнения операций и повышают надежность работы машин и установок.

Определение понятия „автоматика“. Подобно тому, как одно орудие труда, например напильник, — это не техника, так и отдельное автоматическое устройство, даже очень сложное, например автопилот, управляющий полетом самолета без участия летчика, — не автоматика.

Автоматика — это область техники, охватывающая всю совокупность контрольно-управляющих устройств, используемых человеком для обеспечения нормальной работы различных ма-

шин и установок без его непосредственного участия в целях увеличения количества и улучшения качества продукции.

Развитие автоматизи- Развитие автоматизации производства началось с создания более или менее сложных механизмов и механических приспособлений, которые обеспечивают автоматическое управление работой различных технологических, транспортных и энергетических машин. На этой базе возникла и в последующем оформилась в самостоятельную отрасль механическая автоматика.

Однако по мере развития электротехники и электроники в автоматике стали применяться разнообразные электрические приборы и электромагнитные устройства. Зародилась новая отрасль автоматизации — электроавтоматика. В течение нескольких последних десятилетий электроавтоматика получила исключительно широкое распространение. Объясняется это тем, что технические средства электроавтоматики являются устройствами повышенной чувствительности и точности, имеют небольшие размеры, малый вес и, наконец, могут осуществлять управление и контроль за работой одной или нескольких машин на расстоянии.

ГЛАВА X

ЭЛЕМЕНТЫ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ

§ 32. НАЗНАЧЕНИЕ УСТРОЙСТВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В АВТОМАТИКЕ

Современная техника располагает чрезвычайно большим разнообразием приборов, механизмов, аппаратов и миниатюрных машин, из которых собирают устройства автоматического контроля, управления и регулирования.

В зависимости от природы вспомогательной энергии, используемой для приведения в действие этих приборов и аппаратов, они могут быть электрическими, гидравлическими, пневматическими и комбинированными.

Хотя приборы и аппараты, применяемые в автоматике, и отличаются друг от друга принципом действия и конструкцией, их можно подразделить на несколько групп в зависимости от выполняемых ими функций, так как в различных системах автоматизации целый ряд их имеет всегда одно и то же назначение. Одна группа приборов и аппаратов выполняет измерительные функции, другая — усилительные, третья — силовые и т. д. Такие группы называются функциональными элементами систем автоматизации. К ним относятся датчики, чувствительные элементы, усилители, реле, исполнительные органы.

§ 33. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДАТЧИКИ

Основное свойство датчиков.

Электрическим датчиком называют такое устройство, которое при включении в электрическую цепь может под влиянием неэлектрического воздействия плавно изменять в ней ток. Электрические датчики устанавливают на самых различных объектах: паровом котле, доменной печи, самолете, станке и т. д. Иногда на одном

объекте устанавливают несколько десятков датчиков. Здесь некоторые из них подвергаются нагреву, другие сжатию, третьи облучению или иному неэлектрическому воздействию.

Одним из примеров таких устройств является термопара (рис. 135). Она представляет собой два разнородных проводника, спаянных у одного из концов. Если место спая нагреть, а

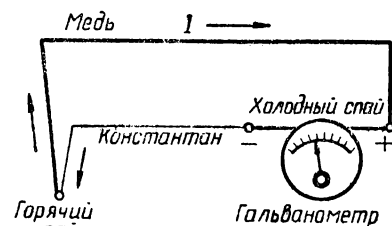


Рис. 135. Термогенераторный датчик — термопара.

свободные концы термопары присоединить к гальванометру, то под действием термо-э. д. с. в цепи возникнет электрический ток, вызывающий отклонение указателя гальванометра.

При любом изменении интенсивности неэлектрического воздействия, воспринимаемого датчиком, происходит соответствующее изменение электрического тока в цепи датчика. Например, с увеличением нагрева термопары величина тока в рамке гальванометра соответственно возрастает.

В этом и заключается основное свойство всякого электрического датчика: *величина электрического тока в цепи датчика является мерой физической величины, характеризующей неэлектрическое воздействие, которому подвергается датчик.* В частности, по отклонению рамки гальванометра можно судить о температуре среды, в которую помещена термопара.

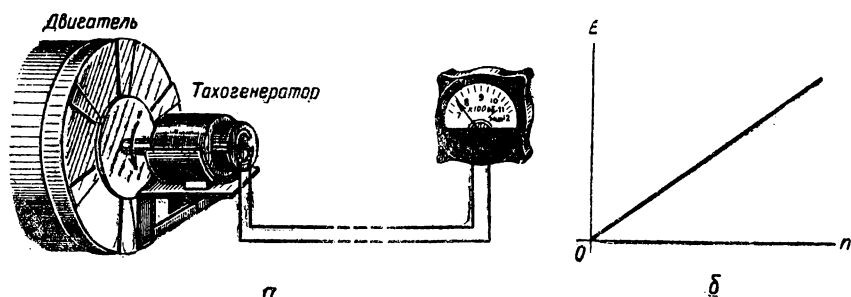


Рис. 136. Тахогенераторный датчик (а) и его характеристика (б).

Чиколев, Владимир Николаевич (1845—1898 гг.) — известный русский электротехник. Изобрел автоматические регуляторы, автоматические выключатели, сигнализаторы и другие аппараты электроавтоматики.



Условно говорят, что этот датчик преобразует неэлектрическую величину — температуру, в электрическую величину — э. д. с.

Назначение датчиков. Электрические датчики являются составными элементами почти всех устройств автоматического контроля и многих устройств автоматического управления и регулирования. В устройствах автоматического контроля датчики служат для измерения различных неэлектрических величин, характеризующих работу технологического оборудования или качество вырабатываемой продукции.

В устройствах автоматического управления и регулирования датчики служат для приведения в действие всей системы электрических приборов и аппаратов автоматики. Например, при помощи фотоэлектрического датчика осветительные приборы, установленные на бакенах или маяках, могут быть приведены в действие или выключены с наступлением темноты или рассвета.

Электрические датчики по принципу действия удобно разделить на две группы: группу генераторных и группу параметрических датчиков.

Генераторные датчики. К группе генераторных датчиков относят такие устройства, которые, как и термопара, создают электрический ток без вспомогательных источников питания. Одним из распространенных датчиков этой группы является миниатюрная машина постоянного тока (рис. 136, а). Она может служить в качестве электрического тахометра — прибора для измерения скорости вращения валов. Если ротор такой машины привести во вращение, то на ее щет-

ках возникает напряжение, величина которого будет прямо пропорциональна скорости вращения (рис. 136, б). Этот генераторный датчик преобразует неэлектрическую величину — скорость механического вращения, в электрическую величину — э. д. с. Его иначе называют тахогенераторным датчиком.

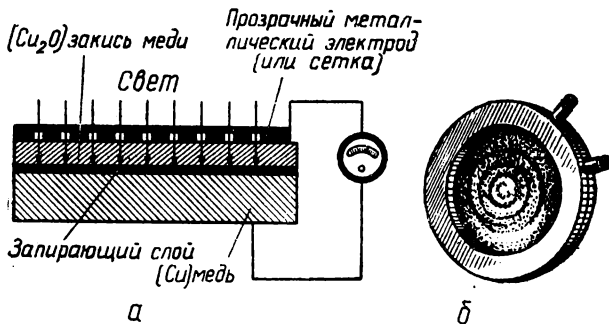


Рис. 137. Фотоэлектрический датчик:
а — схема; б — общий вид.

Другим примером генераторного датчика может служить вентильный фотоэлемент (фотоэлемент с запирающим слоем). Будучи освещенным, он создает электрический ток без каких-либо вспомогательных источников питания (рис. 137).

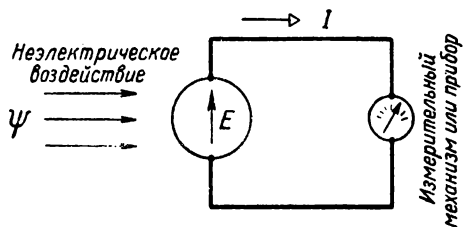


Рис. 138. Принципиальная схема действия генераторного датчика.

Сравнивая рассмотренные выше генераторные датчики, можно заключить, что, несмотря на существенное отличие в конструктивном исполнении, они имеют общую принципиальную схему (рис. 138). В каждом из них неэлектрическое воздействие (нагрев, механическое вращение, освещение) непосредственно воспринимается самим датчиком и без вспомогательного электрического источника питания вызывает в его цепи электрический ток.

Параметрические датчики. Вторую группу датчиков составляют устройства, включаемые в цепь вспомогательного источника питания. Они обладают свойством изменять свое электрическое сопротивление под влиянием того или иного неэлектрического воздействия. Их называют параметрическими датчиками.

Величина тока в цепи параметрического датчика зависит не только от э. д. с. вспомогательного источника питания, но и от

интенсивности тех неэлектрических воздействий, которым подвергается датчик.

В качестве примера устройств, обладающих такими свойствами, может быть назван столбик из угольных шайб, включенный в цепь внешнего источника питания (рис. 139, а). Если

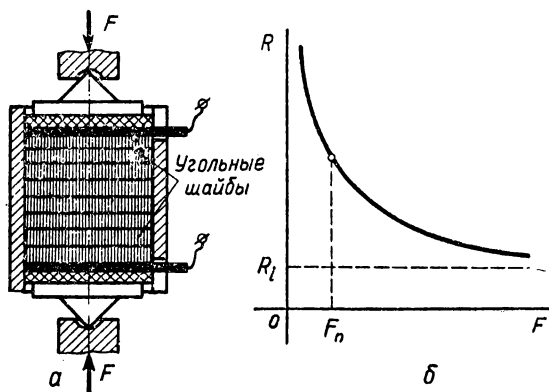


Рис. 139. Датчик типа электрического сопротивления — угольный столбик:

а — схема устройства; б — его характеристика.

угольный столбик подвергнуть сжатию, то ток в цепи возрастет. Это происходит потому, что с увеличением усилия, сжимающего столбик, возрастает общая площадь соприкосновения каждой пары угольных шайб. Электрическое сопротивление угольного столбика уменьшается (рис. 139, б).

В рассмотренном датчике неэлектрическое воздействие (механическое давление) вызывает изменение электрических свойств датчика, характеризуемых электрическим сопротивлением. Существуют и другие устройства, электрическое сопротивление которых изменяется под влиянием воздействия неэлектрического характера. К ним относятся, например, фотоэлементы с внешним фотоэффектом, термосопротивления, проволочные реостаты, потенциометры. Большинство их включается в цепь с источником постоянной э. д. с.

В цепях переменного тока часто применяют датчики, выполненные в виде катушек (из медной проволоки) с ферромагнитными сердечниками. Это индуктивные датчики. В каждом из них неэлектрическому воздействию подвергается сердечник. В некоторых индуктивных датчиках сердечники перемещаются (рис. 140, а), в других — сжимаются или растягиваются (рис. 140, б). Имеются и такие, сердечники которых нагреваются или охлаждаются (рис. 140, в).

При механическом перемещении сердечника индуктивного датчика изменяются воздушные промежутки его магнитной цепи. Как показывает опыт, с увеличением воздушных промежутков величина переменного тока также увеличивается. Возрастание тока в катушке связано с уменьшением ее индуктивного сопротивления.

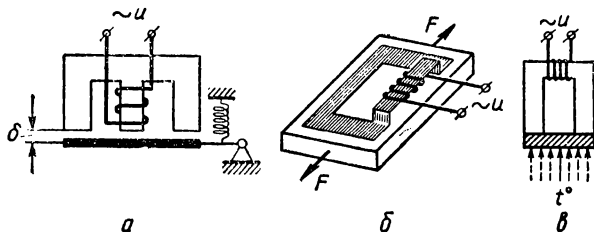


Рис. 140. Принципиальные схемы индуктивных датчиков:
а — микрометрического; б — тензометрического; в — термометрического.

Если растянуть сердечник, изготовленный из особых сплавов, то его магнитные свойства существенно изменятся. Внешне это также проявится в изменении амплитуды переменного тока в цепи датчика. Аналогичное явление будет и при тепловом воздействии на некоторые сердечники.

Кроме индуктивных датчиков, в цепях переменного тока применяют и емкостные датчики. Их обычно выполняют

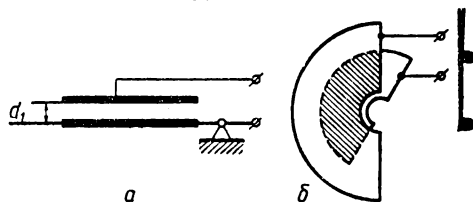


Рис. 141. Принципиальные схемы емкостных датчиков:
а — с поступательным перемещением пластин; б — поворотного типа.

в виде конденсаторов с перемещающимися обкладками (пластинами). Перемещая одну пластину относительно другой, изменяют расстояние между ними или площадь перекрытия пластин (рис. 141). Емкость конденсатора, а следовательно, и ток в цепи источника переменного напряжения соответственно изменяются. Такие емкостные датчики реагируют на механическое перемещение.

В заключение отметим, что э. д. с. генераторного датчика или ток в цепи параметрического датчика принято называть электрическими сигналами датчика.

§ 34. МЕХАНИЧЕСКИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ

**Основное
свойство
механических
чувствитель-
ных элементов.**

Механическим чувствительным элементом называют такое устройство, которое реагирует на изменение интенсивности внешнего физического воздействия плавным перемещением своей подвижной части. Это свойство присуще, например, всем механизмам показывающих измерительных приборов — центробежному механизму тахометра, пружине манометра, измерительным механизмам электрических приборов разных систем и т. д. Поэтому в качестве механических чувствительных элементов в большинстве случаев служат обычные измерительные приборы, но только без стрелок и шкал или иных отсчетных приспособлений.

Механические чувствительные элементы применяют для приведения в действие некоторых типов электрических датчиков.

**Воздействие
чувствитель-
ного элемента
на датчик
с подвижной
частью.**

В тех случаях, когда датчик имеет подвижную часть, он может быть конструктивно объединен с чувствительным элементом в одно механическое устройство. Такое устройство устанавливают на контролируемом объекте таким образом, чтобы прямому воздействию со стороны объекта подвергался не датчик, а чувствительный элемент. Тогда под влиянием воздействия, воспринимаемого чувствительным элементом, его подвижная часть придет в движение. В свою очередь датчик воспримет механическое воздействие чувствительного элемента и выработает электрический сигнал. Это даст возможность судить о физической величине, характеризующей интенсивность процессов, совершаемых в контролируемом объекте, не по механическому перемещению подвижной части измерительного прибора, а по величине электрического сигнала датчика.

Одним из примеров конструктивного объединения электрического датчика с механическим чувствительным элементом может служить устройство, изображенное на рисунке 142. На ось индукционного счетчика энергии насажен ротор миниатюрного генератора постоянного тока. Движущий механизм счетчика выполняет роль механического чувствительного элемента, а электрическая машина — роль генераторного датчика. При включении катушек счетчика в цепь переменного тока его диск приведет ротор генератора во вращение. Величина напряжения на щетках генератора будет являться мерой активной мощности, переданной по цепи переменного тока от источника питания к нагрузке. Действительно, скорость вращения диска счетчика, как известно, прямо пропорциональна активной электрической мощности переменного тока, а напряжение на щетках генератора — скорости вращения ротора. Таким образом,

тахогенераторным датчиком, соединенным с механизмом прибора индукционной системы, можно измерить активную мощность переменного тока.

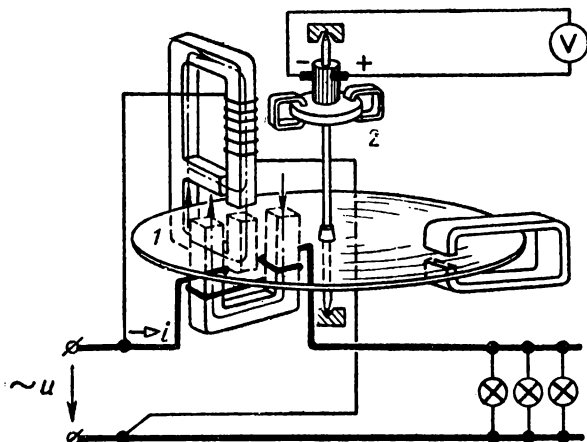


Рис. 142. Схема генераторного датчика с механическим чувствительным элементом:

1 — индукционный счетчик; 2 — генератор постоянного тока, возбуждаемый постоянными магнитами.

Другим примером совместной работы механического чувствительного элемента и электрического датчика является устройство, при помощи которого можно измерить уровень жидкости (рис. 143). В качестве электрического датчика здесь слу-

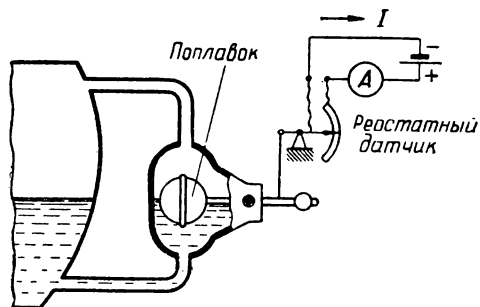


Рис. 143. Схема реостатного датчика с поплавковым чувствительным элементом.

жит небольшой проволочный реостат, включенный в цепь вспомогательного источника питания. Роль механического чувствительного элемента выполняет поплавок — полый шар, плавающий на поверхности жидкости, заполнившей сосуд. При повышении или понижении уровня жидкости поплавок посредством

рычага вызывает соответствующее перемещение ползунка реостата, а следовательно, и изменение тока в цепи источника питания. Тем самым об уровне жидкости в сосуде можно судить по величине тока в цепи реостатного датчика.

Воздействие чувствительного элемента на датчик без подвижной части.

В некоторых случаях перемещение подвижной части механического чувствительного элемента используют для приведения в действие электрического датчика, не имеющего подвижной части. К последним, в частности, относится фотоэлектронный датчик. В качестве примера устройств, где механический чувствительный элемент управляет электрическим датчиком, не имея с ним механической связи, может служить прибор, схема которого изображена на рисунке 144.

Основными элементами этого прибора являются измерительный механизм магнитоэлектрической системы и фотоэлементы, включенные последовательно с сопротивлениями R в цепь внешнего источника питания. Вспомогательными элементами прибора являются осветитель и система зеркал.

Прибор работает следующим образом. При включении измерительного механизма в контролируемую цепь постоянного тока

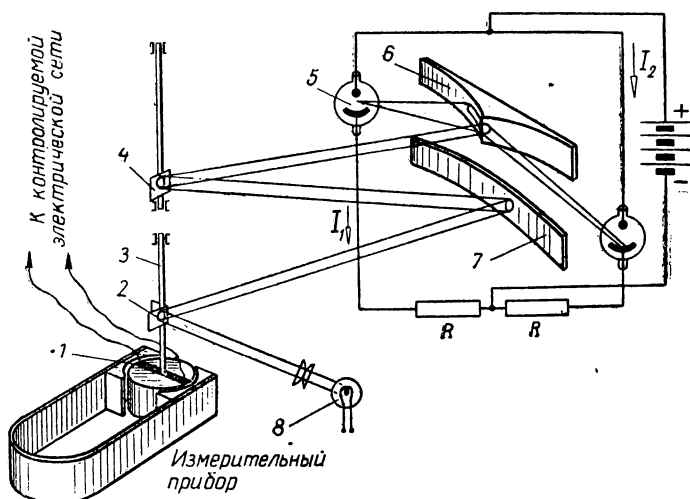


Рис. 144. Схема фотоэлектрического датчика с магнитоэлектрическим чувствительным элементом.

подвижная рамка 1 поворачивается вместе с укрепленным на оси 3 зеркалом 2. Луч света от осветителя 8, отразившись последовательно от подвижного зеркала 2, вогнутого цилиндрического зеркала 7, неподвижного зеркала 4 и разделителя 6, попадает на фотоэлемент 5.

Ток в цепи фотоэлемента, а следовательно, и падение напряжения на сопротивлении R , включенном в эту цепь, как известно, зависят от степени освещенности фотоэлемента. Так как при повороте рамки измерительного механизма освещенность фотоэлементов соответственно изменяется, то о величине тока в контролируемой цепи можно судить по величине электрического сигнала, создаваемого фотоэлектронным датчиком.

§ 35. УСИЛИТЕЛИ

Назначение усилителей.

В большинстве случаев датчики создают весьма слабые электрические сигналы. Так, например, электрический ток в цепи освещенного фотоэлемента составляет несколько микроампер, а э. д. с. термопары — несколько милливольт. Электрическая мощность сигналов датчиков также очень мала. Иногда она оказывается в сотни и тысячи раз меньше мощности тех устройств, работой которых должны управлять датчики.

Например, в автоматических станках мощность двигателя подачи составляет 300 вт, а мощность реостатного датчика, реагирующего на изменение подачи и управляющего работой этого двигателя — тысячные доли ватта. Для повышения мощности электрических сигналов датчиков применяют специальные устройства, называемые электрическими усилителями.

Составные части усилителя.

Каждый электрический усилитель снабжается вспомогательным источником питания (гальваническим элементом, аккумулятором, выпрямителем и т. д.) и имеет два входных и два выходных рабочих зажима (рис. 145). К входным зажимам (1—2) присоединяют датчик, к выходным (3—4) — нагрузку, то есть

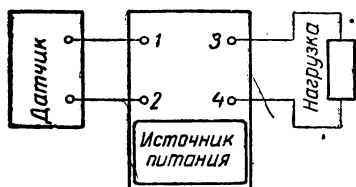


Рис. 145. Принципиальная схема электрического усилителя.

какое-либо электромеханическое устройство (например, обмотку реле или обмотку двигателя). Энергия в нагрузку поступает от источника питания усилителя. Поступление энергии регулируется посредством особых устройств, выполняющих роль электрического клапана, установленного в цепи источника питания и управляемого слабыми сигналами датчика. В качестве та-

ких устройств служат электронные лампы или полупроводниковые приборы. Подобные устройства непосредственно воспринимают электрические сигналы датчика и под их воздействием влияют на процесс передачи энергии от источника питания в нагрузку.

Основной признак электрического усилителя заключается в том, что *за счет энергии источника питания мощность выходного сигнала усилителя всегда превышает мощность входного сигнала датчика.*

Если мощность выходного сигнала какого-либо устройства не превышает мощности входного, то это устройство не может служить усилителем. Например, повышающий трансформатор не является усилителем, так как мощность вторичной цепи не только не превышает, но оказывается даже меньше мощности первичной цепи трансформатора (за счет электрических и магнитных потерь). Иначе говоря, устройство, не содержащее внутреннего источника питания, не может служить усилителем.

Триод. Широкое распространение среди электрических усилителей получили *ламповые усилители.*

Основным элементом таких усилителей является электронная лампа. В простейшем случае эта лампа представляет собой герметически закрытый баллон (стеклянный или металлический), в который введены три электрода: анод, катод и управляющая

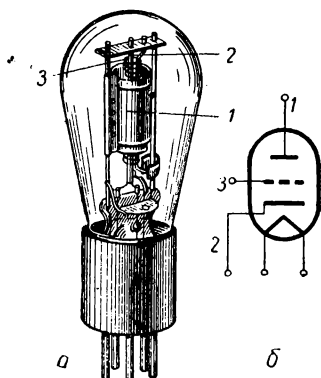


Рис. 146. Электронная лампа с тремя электродами (а) и ее условное изображение (б): 1 — анод; 2 — катод; 3 — управляющая сетка.

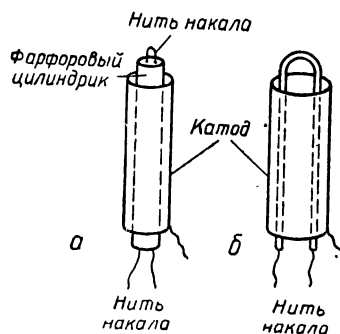


Рис. 147. Подогревный катод электронных ламп.

сетка (рис. 146). Лампу с тремя электродами называют триодом. Анод лампы обычно выполняют из молибденовой или никелевой пластинки, свернутой в цилиндр и укрепленной на проволоочном держателе. Катод электронной лампы располагают внутри цилиндрического анода. Большинство современных триодов имеет подогревный катод. Его изготовляют из никелевой трубки, на поверхность которой наносят слой оксида — оксиды кальция, стронция или бария. Никелевая трубка катода («чехол») одевается на электроподогреватель — фарфоровый стержень, внутри которого находится нить накала (рис. 147).

При работе лампы нить накала включается в цепь вспомогательного источника тока и сильно нагревается.

Третий электрод лампы — управляющая сетка — выполнен в виде разомкнутой проволочной спирали, охватывающей катод и укрепленной на сеткодержателе. Назначение этого электрода — управление током лампы. Поэтому сетка и называется управляющей сеткой. Катод лампы присоединяют к отрицательному полюсу источника питания, а анод — к положительному полюсу. Потенциал катода условно принимают равным нулю.

Триод является управляемым электрическим вентилем. Это означает, во-первых, что ток в нем может иметь только одно на-

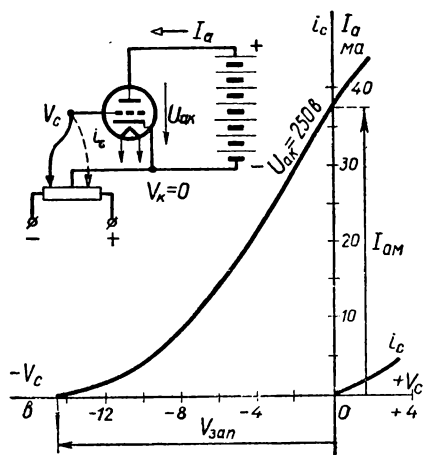


Рис. 148. График зависимости анодного тока триода 6C2C от потенциала управляющей сетки при $U_{ак} = 250$ в.

правление, а именно — от холодного анода к горячему катоду. Во-вторых, величина анодного тока при постоянном напряжении между анодом и катодом зависит от величины и знака потенциала сетки относительно катода. На рисунке 148 изображен график зависимости анодного тока триода от потенциала управляющей сетки относительно катода при постоянном напряжении, действующем между анодом и катодом. Если сетку накоротко соединить с катодом, то есть сообщить ей условный нулевой потенциал, то лампа будет работать как

обычный диод: под воздействием э. д. с. анодного источника питания в цепи анод — катод установится постоянный ток $I_{а0}$.

При подаче на сетку положительного потенциала анодный ток лампы будет больше тока $I_{а0}$. Однако при этом появится ток и в цепи сетка-катод.

Поскольку датчик при работе лампового усилителя подключается к управляющей сетке, то сеточный ток, замыкаясь через датчик, может вызвать нежелательное искажение слабого сигнала датчика. Во избежание этого стремятся к тому, чтобы при работе лампы ее сетка никогда не была заряжена положительно. Сетке обычно сообщают отрицательный потенциал, так как в этом случае сеточный ток будет отсутствовать. При подаче на сетку отрицательного потенциала анодный ток лампы станет меньше тока $I_{а0}$. При некотором отрицательном потенциале сетки ($-V_{зап}$), называемом запирающим потенциалом, анодный ток лампы полностью прекращается.

Таким образом, изменением отрицательного потенциала управляющей сетки относительно катода можно влиять на величину анодного тока лампы.

Ламповый усилитель.

Рассмотрим принцип действия лампового усилителя на примере простейшего устройства, собранного по схеме, изображенной на рисунке 149. Такое устройство называют ламповым усилительным каскадом. В усилительный каскад входят: электронная лампа, источники питания, сопротивления и конденсаторы. Этот усилитель рассчитан на работу от датчика переменного напряжения.

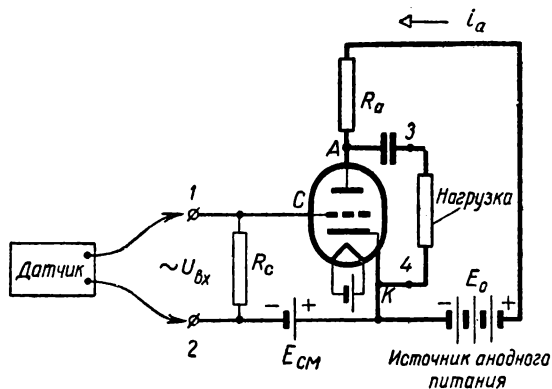


Рис. 149. Схема лампового усилителя напряжения.

Ламповый усилитель имеет три электрические цепи:

1) анодную цепь, образованную подключением к аноду и катоду лампы, последовательно соединенных между собой основного источника питания усилителя (источник анодного питания) и сопротивления R_a (анодное сопротивление);

2) сеточную цепь, образованную подключением к управляющей сетке и катоду лампы, последовательно соединенных батареи $E_{см}$ (источник сеточного смещения) и сопротивления R_c ;

3) цепь накала, состоящую из нити накала, присоединенной к вспомогательному источнику питания.

В рассматриваемом усилителе датчик подключается к сопротивлению в цепи сетки R_c (входные зажимы 1 и 2), а нагрузка усилителя — параллельно к лампе (выходные зажимы 3 и 4). Между выходным зажимом 3 и анодом лампы включают разделительный конденсатор.

Потенциал сетки относительно катода в любой момент времени определяется алгебраической суммой двух напряжений: переменного напряжения входного сигнала датчика и постоянного напряжения, создаваемого источником сеточного смещения (напряжение смещения). Для того чтобы избежать появления

на сетке положительных потенциалов относительно катода, источник сеточного смещения задает сетке постоянный отрицательный потенциал. С этой целью положительный зажим источника сеточного смещения соединяют с катодом, а отрицательный через сеточное сопротивление R_c — с сеткой. Величину напряжения смещения выбирают равной примерно половине величины запирающего потенциала триода.

При отсутствии сигнала датчика в анодной цепи усилителя установится постоянный ток (ток покоя). Величина тока покоя I_{a0} зависит от величины напряжения источника анодного питания U_0 , напряжения смещения U_{cm} и анодного сопротивления R_a . Напряжение между анодом и катодом лампы $U_{ак}$ в этом случае будет меньше напряжения источника анодного питания, так как ток покоя создаст на анодном сопротивлении падение напряжения $I_{a0}R_a$. Величина постоянного напряжения между анодом и катодом лампы при отсутствии сигнала определяется формулой

$$U_{ак} = U_0 - I_{a0}R_a.$$

Благодаря разделительному конденсатору постоянное напряжение между анодом и катодом не может создать ток в нагрузке. Поэтому напряжение на выходных зажимах усилителя при отсутствии сигналов датчика будет отсутствовать.

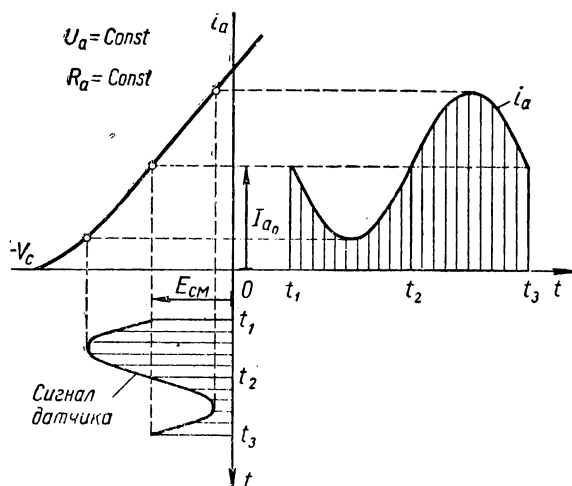


Рис. 150. График изменения анодного тока триода при работе однокаскадного усилителя напряжения.

При подаче переменного сигнала датчика потенциал сетки относительно катода непрерывно изменяется (рис. 150). В течение одного полупериода изменения сигнала датчика (от t_1 до

t_2) отрицательный потенциал сетки возрастает по абсолютной величине потому, что направление его действия совпадает с направлением действия э. д. с. источника сеточного смещения. В течение второго полупериода (от t_2 до t_3) отрицательный потенциал сетки уменьшается по абсолютной величине. Колебания отрицательного потенциала сетки, вызванные сигналами датчика, приводят либо к уменьшению анодного тока лампы по сравнению с током покоя, либо к его увеличению. Поэтому ток в лампе при подаче переменного сигнала датчика станет пульсирующим. График его изменения во времени показан на рисунке 150. При увеличении анодного тока i_a напряжение между анодом и катодом лампы $U_{ак}$ будет уменьшаться на величину падения напряжения $i_a R_a$. Уменьшение анодного тока в свою очередь сопровождается соответствующим возрастанием напряжения на лампе. Таким образом, пульсирующий ток лампы благодаря анодному сопротивлению R_a вызывает колебания напряжения между анодом и катодом. Такое же колебание напряжения будет и на нагрузке усилителя. С увеличением амплитуды переменного сигнала датчика амплитуда колебаний напряжения на выходных зажимах усилителя соответственно возрастает, то есть увеличивается мощность выходного сигнала.

На выходных зажимах усилительного каскада создается переменное напряжение, амплитуда колебаний которого значительно больше (в десятки и сотни раз) амплитуды входного сигнала.

Транзистор. В последнее время в устройствах автоматики наряду с ламповыми усилителями применяют и полупроводниковые усилители. В полупроводниковом усилителе управляющими элементами служат кристаллические

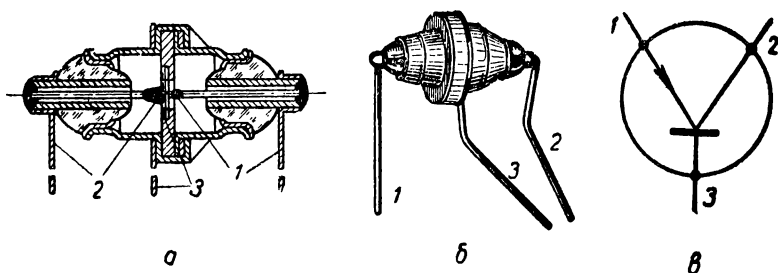


Рис. 151. Схема устройства (а), внешний вид (б) и условное обозначение (в) плоскостного транзистора:

1 — эмиттер; 2 — коллектор; 3 — база.

триоды, называемые транзисторами. Одним из наиболее распространенных типов транзисторов является плоскостной. Его конструкция схематично показана на рисунке 151. Транзистор плоскостного типа представляет собой небольшой кристалл

германия, имеющий форму тонкой прямоугольной пластинки (призмы), на противоположных гранях которой наплавлены две капли индия обычно разных размеров. В каждую каплю индия вплавляют электроды; электрод, введенный в большую каплю, называют коллектором, в малую — эмиттером. Германиевую пластинку укрепляют в кристаллодержателе, снабженном третьим электродом, называемым базой.

Часть кристалла германия, заключенная между базой и любой из наплавленных капель индия, представляет собой полупроводниковый вентиль (диод).

Если электрод, введенный в каплю индия, соединить, например, с положительным полюсом гальванического элемента,

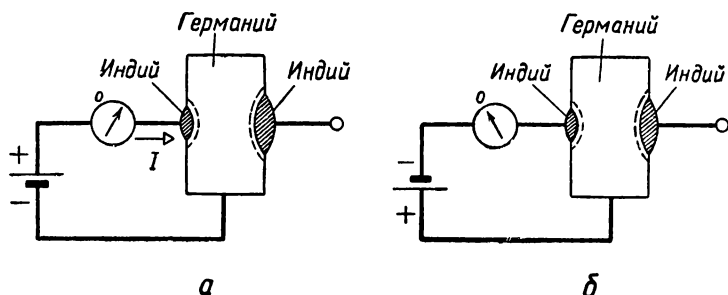


Рис. 152. Схемы прямого (а) и обратного (б) включения германиевого диода.

а базу — с отрицательным (рис. 152, а), то в цепи гальванического элемента появится заметный ток (режим прямого тока). Электрическое сопротивление между электродами в этом случае будет малым. При изменении полярности приложенного напряжения (рис. 152, б) ток во внешней цепи будет весьма слабым (режим обратного тока). Это означает, что электрическое сопротивление объема кристалла германия будет большим.

Следовательно, транзистор в целом можно рассматривать состоящим из двух соприкасающихся полупроводниковых диодов: один из них заключен между эмиттером и базой, другой — между коллектором и базой.

Полупроводниковый усилитель.

Диод «эмиттер-база» нормально работает в режиме прямого тока. Его включают в цепь датчика (рис. 153), развивающего небольшую э. д. с. (порядка долей вольта). Диод «коллектор-база» работает в режиме обратного тока. К его электродам присоединяют нагрузку усилителя $R_{\text{вых}}$ и основной источник питания, развивающий относительно большую э. д. с. (порядка десятков вольт). Отрицательный зажим источника питания усилителя соединяют с коллектором. Образовавшуюся цепь называют

цепью коллектора. Электрическое сопротивление диода «коллектор-база» зависит не только от полярности и величины приложенного к нему напряжения, но и от электрического режима работы соседнего с ним диода «эмиттер-база». Это происходит потому, что оба диода имеют общий электрод и отделены друг от друга очень тонким слоем германия.

При отсутствии тока эмиттера сопротивление диода «коллектор-база», работающего в режиме обратного тока, определяется только величиной напряжения, действующего между его электродами. Как уже отмечалось, оно очень велико. Поэтому при

отключенном эмиттере ток в цепи коллектора практически будет отсутствовать. При наличии тока эмиттера сопротивление диода «коллектор-база» резко уменьшается. Это объясняется тем, что в запирающий слой диода «коллектор-база» через тонкий граничный слой вводятся электрические заряды, источником которых является эмиттер. Поэтому, если на эмиттер подать небольшой положительный потенциал (относительно базы), то одновременно с током в цепи эмиттера появится ток и в цепи коллектора. ♦

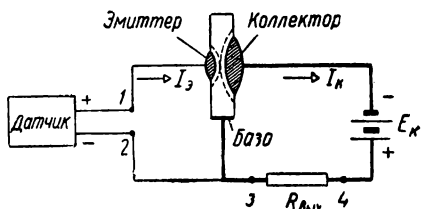


Рис. 153. Схема простейшего транзисторного усилителя.

Путем измерения величин этих токов можно установить, что ток коллектора будет лишь немного меньше тока эмиттера. Импульс тока в цепи коллектора создает на зажимах нагрузки, обладающей большим сопротивлением, значительный импульс напряжения. Напряжение на зажимах нагрузки и мощность выходного сигнала будут во много раз больше напряжения и мощности сигналов датчика.

§ 36. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ РЕЛЕ

Назначение реле.

Реле — это приборы, снабженные контактами. Контакты реле замыкаются и размыкаются под влиянием механического, теплового, электрического или другого внешнего физического воздействия.

При помощи контактов реле включают и отключают электрические цепи. В устройствах автоматики такие цепи обычно состоят из вспомогательного источника питания и исполнительного механизма малой мощности. Ими могут быть, например, миниатюрные электродвигатели, сирены или звонки, счетчики электрических импульсов, телефонные аппараты и т. п. При замыкании контактов реле эти устройства приходят в действие, а при размыкании их действие прекращается. Следовательно, реле

служат для управления исполнительными механизмами по принципу: «включить — выключить».

Электромагнитное реле с поворотным якорем.

К числу наиболее широко применяемых реле относятся электромагнитные реле. Контакты реле этого типа замыкаются или размыкаются подвижным якорем электромагнита.

Простейшее электромагнитное реле (рис. 154) состоит из следующих элементов: намагничивающей катушки 1, включаемой в цепь источника тока; неподвижного стального сердечника 4; поворотного стального якоря 5, укрепленного на

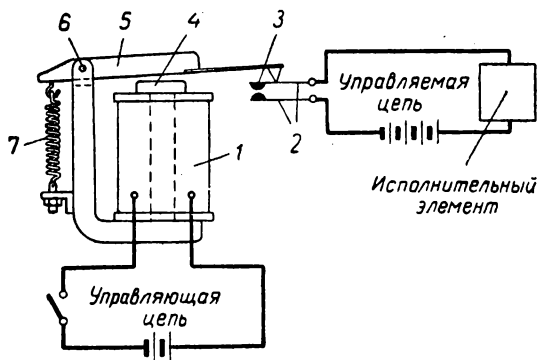


Рис. 154. Схематическое устройство электромагнитного реле.

шарнире 6 и оттянутого пружиной 7; подвижного и неподвижного контактов 3, расположенных на упругих металлических пластинах 2.

Контакты реле изготовляют из металлов, обладающих хорошей электропроводностью и теплопроводностью (вольфрам, серебро, платина и т. д.).

Электромагнитное реле является прибором, связывающим две электрические цепи: 1) управляющую, которая содержит намагничивающую катушку электромагнита и источник тока, и 2) управляемую, содержащую вспомогательный источник питания и исполнительный механизм.

Когда в катушке реле тока нет (исходное положение реле), его якорь располагается на некотором расстоянии от сердечника. При замыкании управляющей цепи реле срабатывает: сердечник намагничивается и притягивает к себе якорь, который в свою очередь перемещает подвижный контакт реле, замыкая управляемую цепь (см. рис. 154).

Следует иметь в виду, что в исходном положении реле его контакты могут быть не только разомкнутыми, но и замкнутыми.

Если при отсутствии тока в катушке реле его подвижный контакт находится на некотором расстоянии от неподвижного, то

такую контактную пару называют нормально открытой (как в рассмотренном примере). В рабочем состоянии реле эти контакты плотно прижимаются один к другому и замыкают управляемую цепь. Другими словами *нормально открытые контакты реле работают на замыкание*.

Если в исходном положении реле его контакты замкнуты, то их называют нормально закрытыми. При срабатывании реле они расходятся, вызывая механический разрыв управляемой цепи. Следовательно, *нормально закрытые контакты реле работают на размыкание*. Условное изображение контактных пар реле показано на рисунке 155.

Многие электромагнитные реле снабжаются несколькими контактными парами. Такие реле используются для управления несколькими электрическими цепями.

Время срабатывания электромагнитных реле колеблется от 15 до 50 миллисекунд.

В устройствах автоматики электромагнитные реле приводят в действие или другим реле (промежуточным), или электрическим датчиком.

Электронное реле.

В тех случаях, когда электромагнитное реле управляется маломощным датчиком, между ними устанавливают усилитель, обычно ламповый. Катушку электромагнитного реле при этом включают в анодную цепь лампового усилителя (рис. 156), а датчик — в сеточную. Устройство, состоящее из лампового усилителя, электромагнитного реле и вспомогательных источников питания, называют *электронным реле*. Рассмотрим принцип действия электронного реле на примере устройства, собранного по схеме, изображенной на рисунке 156. Ток в цепи усилительной лампы, а следовательно, и в катушке электромагнитного реле при постоянном значении э. д. с. E анодной батареи, как мы знаем, зависит от потенциала сетки относительно катода.

При отключенном датчике ползунок потенциометра $R_{см}$ устанавливают в такое положение, чтобы анодный ток лампы был немного меньше тока срабатывания электромагнитного реле. Тогда контакты реле будут разомкнуты. Если теперь на сопротивление R_c включить маломощный датчик, то результирующий отрицательный потенциал сетки станет меньше по абсолютной величине. Вслед за этим последует увеличение анодного тока. Когда он достигает величины тока срабатывания, контакты реле

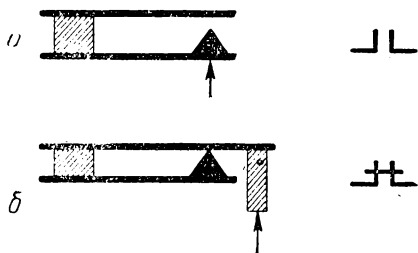


Рис. 155. Контактные пары реле и их условные изображения на схемах: а — нормально открытая; б — нормально закрытая.

замкнутся. При снятии сигнала датчика анодный ток вновь уменьшится и реле разомкнет контакты.

Важным достоинством электронного реле является отсутствие контактов в его управляющей цепи. Известно, что выключение катушек путем механического разрыва цепи с током всегда сопровождается искрообразованием на контактах, вызывающим

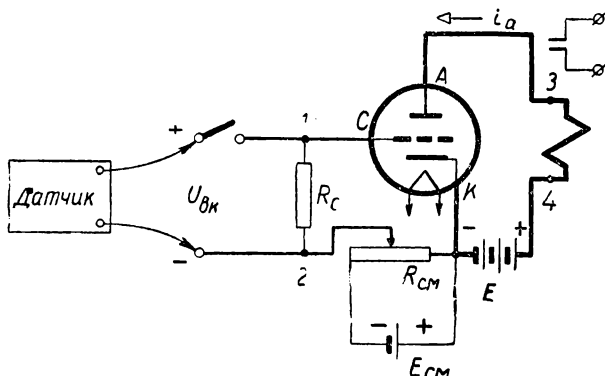


Рис. 156. Схема электронного реле.

их обгорание и нарушение работы всего устройства; в электронном реле такого явления нет.

Поляризованное реле.

Обычные электромагнитные реле не реагируют на полярность электрического сигнала управления: они срабатывают при любом направлении тока в намагничивающей катушке. В тех случаях, когда требуется, чтобы замыкание или размыкание контактов реле зависело от направления тока в его намагничивающей катушке, применяют поляризованные реле (рис. 157, а).

Идея устройства поляризованного реле (рис. 157, б) заключается в том, что наряду с электромагнитом 1 в его магнитную цепь вводят постоянный магнит 2. На рисунке магнитный поток постоянного магнита Φ_0 условно показан сплошной линией. При отсутствии тока в катушке электромагнита якорь 3 занимает среднее, нейтральное, положение. Его с одинаковой силой притягивают оба полюса магнита. Однако это положение якоря неустойчиво: достаточно хотя бы очень небольшого смещения от нейтрального положения, чтобы якорь оказался притянутым к какому-нибудь полюсу. Поэтому якорь с подвижным контактом 4 либо закрепляется на плоской пружине, упругость которой создает устойчивость равновесия в среднем положении, либо он удерживается в этом положении двумя специальными пружинами.

Включением катушки электромагнита в цепь источника постоянного напряжения в магнитоприводе реле возбуждают рабо-

чий магнитный поток Φ_k . На схеме этот поток показан пунктирной линией. Замыкаясь по магнитной цепи реле, он разветвляется на две части. Условно положительное направление магнитного потока катушки показано стрелкой на пунктирной линии. Оно зависит от направления тока в катушке и определяется известным правилом Максвелла («правило буравчика»). При том на-

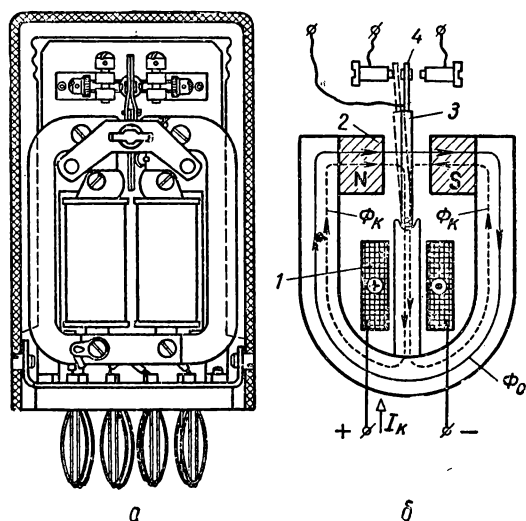


Рис. 157. Внешний вид (а) и схематическое устройство (б) поляризованного реле.

правлении тока в катушке, которое показано на рисунке знаками креста и точки, магнитный поток Φ_k в левом полюсе усиливает магнитный поток постоянного магнита Φ_0 , так как их направления совпадают, а в правом полюсе ослабляет. Поэтому легкий якорь притягивается к левому полюсу и замыкает цепь левого контакта. Если направление тока в катушке изменить, то якорь реле притянется вправо и замкнет правый контакт. Следовательно, направление срабатывания поляризованного реле, якорь которого может находиться в трех положениях (позициях), зависит от направления тока в его катушке. Контакты такого трехпозиционного реле работают только на замыкание. Время срабатывания поляризованных реле исчисляется тысячными долями секунды.

Отметим, что реле с поляризованными электромагнитами обладает очень высокой чувствительностью к току. Это объясняется тем, что рабочий магнитный поток катушки может быть очень слабым, ибо сердечник реле уже намагничен постоянным магнитом. Ток срабатывания таких реле может иметь величину порядка микроампер.

Упражнения и задачи

1. К какой группе электрических датчиков следует отнести потенциометр, угольный микрофон и фотозлемент с внешним фотоэффектом? На какие неэлектрические воздействия они реагируют?

2. Руководствуясь системой условных обозначений по ГОСТу 5461-50 (см. приложение V), расшифруйте названия следующих электровакуумных ламп: 5Ц4С; 6Д6А, 6Н2П, 6С1Ж, 12С3С.

3. В ламповом усилителе, собранном по схеме рисунка 149, напряжение источника анодного питания $U_0 = 250$ в, анодное сопротивление $R_a = 33$ ком, ток покоя $I_{a0} = 3,3$ ма. Определите напряжение $U_{ак}$ между анодом и катодом лампы при отсутствии входного сигнала. На сколько изменится напряжение на лампе, если при подаче входного сигнала ток в анодной цепи увеличится до 5 ма?

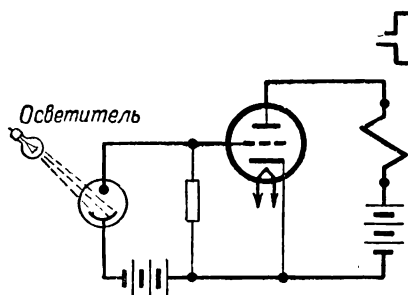


Рис. 158. К задаче № 4.

Ответ: $U_{ак} = 150$ в,
 $\Delta U_{ак} = 65$ в.

4. На рисунке 158 изображена схема фотозлектронного реле постоянного тока. В каком состоянии находятся контакты этого реле при выключенном и включенном осветителе?

ГЛАВА XI

АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

§ 37. СИСТЕМЫ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Назначение и классификация автоматов контроля.

Автоматический контроль — понятие очень широкое. Это область техники, охватывающая всю совокупность автоматических устройств, при помощи которых ведется либо наблюдение за работой машин и установок, либо контроль качества продукции и ее количественный учет. К ним относятся, например, измерительные, счетные и контрольно-сортировочные автоматы, автоматические сигнализаторы, дефектоскопы, дозаторы, анализаторы и др. устройства. Каждый из них выполняет определенный комплекс контрольных операций без прямого содействия обслуживающего персонала и нуждается лишь в предварительной наладке и общем надзоре за его работой.

Общая классификация контрольных автоматов представлена на рисунке 159.

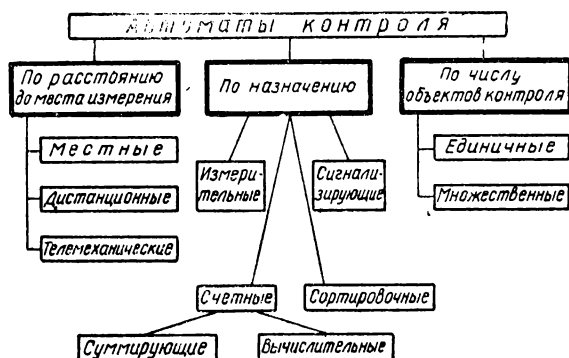


Рис. 159. Общая классификация контрольных автоматов.

Три вида контроля.

Большинство автоматов контроля строят так, чтобы заключительные операции, связанные с учетом, измерением, регистрацией, сигнализацией и другими действиями, выполнялись электрическими приборами. Тем самым достигается возможность быстрого осуществления контрольных операций с высокой точностью и на любом расстоянии. Необходимость осуществления контрольных операций на расстоянии вызывается тем обстоятельством, что отдельные технические объекты современных промышленных предприятий управляются из одного центра — диспетчерского

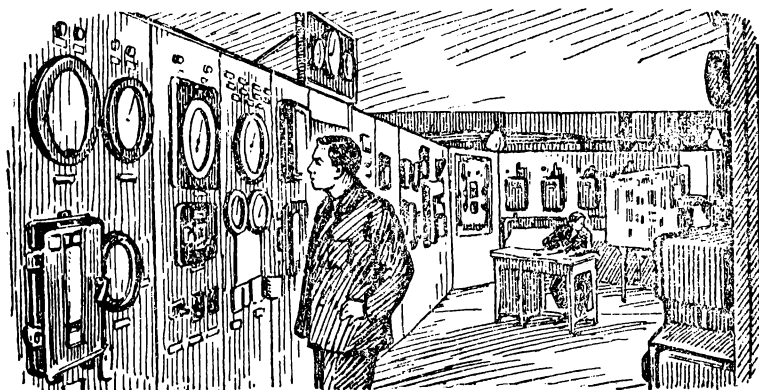


Рис. 160. Пульт управления доменной печью.

пункта, где сосредоточена вся контрольная и управляющая аппаратура (см. рис. 160). Таким образом, объект контроля (машина, процесс, продукт) и место установки прибора могут быть удалены друг от друга. В зависимости от расстояния между ними различают три вида контроля. Вблизи рабочих машин и агрегатов осуществляется местный (локальный) контроль; при наличии диспетчерского пункта — дистанционный контроль; при весьма значительных расстояниях (десятки и сотни километров) — ближний или дальний телемеханический контроль. Телемеханический контроль широко применяется, например, на воздушном, водном и наземном транспорте, а также в энергетических системах.

§ 38. ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

Электрические измерения неэлектрических величин.

Автоматический контроль ведется путем измерения одной или нескольких величин, характеризующих фактическое состояние объектов контроля. Эти величины могут быть либо электрическими (ток, напряжение, частота и т. д.), либо неэлектрическими (температура, давление, механическое перемещение и т. д.). В большинстве устройств автоматического контроля измерение неэлектрических величин осуществляется так же, как и электрических величин, то есть при помощи соответствующих электроизмерительных приборов. Однако для электрического измерения неэлектрических величин необходимо, как указывалось выше, на объекте контроля установить еще и электрический датчик (§ 33). Тогда под влиянием определенного неэлектрического воздействия, источником которого является контролируемый объект, на выходных зажимах датчика возникает электрический сигнал. Интенсивность сигнала датчика может быть измерена электрическим прибором. Тем самым по отклонению указателя электроизмерительного прибора судят о численном значении неэлектрической величины. Например, скорость вращения вала машины может быть измерена вольтметром, подключенным к щеткам магнитоэлектрического генератора постоянного тока, ротор которого насажен на вал контролируемой машины (см. рис. 136, а). Так поступают в тех случаях, когда мощность электрического сигнала датчика достаточна для приведения в действие измерительного прибора.

Для электрического измерения некоторых неэлектрических величин, иногда требуется применение не только электрических датчиков, но и механических чувствительных элементов. Одним из примеров такой более сложной электроизмерительной системы устройств может служить система для измерения объема

жидкости в резервуаре (рис. 161). Составными элементами этой системы являются: поплавков, плавающий на поверхности жидкости, реостатный датчик, включенный в цепь источника питания — аккумулятора и прибор магнитоэлектрической системы. Ползунок реостатного датчика связан с поплавком, который выполняет роль механического чувствительного элемента. Когда бак полностью заполнен жидкостью, ползунок реостата занимает такое положение, при котором ток в цепи измерительного прибора имеет наибольшую величину, и стрелка отклонена вправо до предела. По мере расхода жидкости поплавков плавно опускается. Вместе с ним передвигается движок реостата. Ток в цепи измерительного прибора становится меньше, и стрелка прибора отклоняется влево, указывая по шкале объем жидкости в баке.

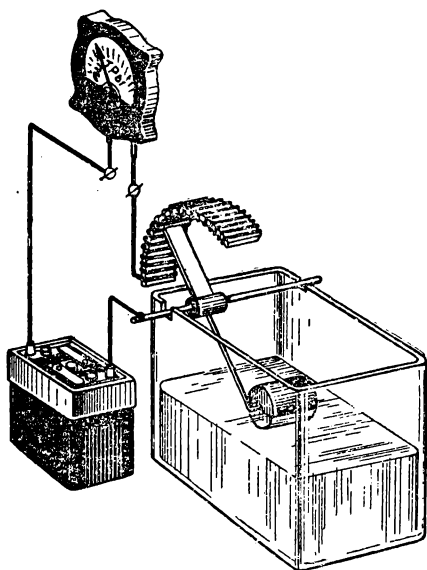


Рис. 161. Схема устройства для измерения объема жидкости.

Шкалы электроизмерительных приборов, включенных в цепь электрических датчиков, для удобства отсчета предварительно градуируют в единицах измеряемой неэлектрической величины (см. рис. 136, а и 161).

Дистанционная передача показаний приборов.

Обычные электроизмерительные приборы без специальных вспомогательных устройств и приспособлений не могут обеспечить не только телемеханический, но и дистанционный контроль. В этих случаях используют специальные телеизмерительные системы устройств автоматики. Основными элементами таких систем являются датчик, линия связи и измерительный прибор (приемник).

Линия связи представляет собой несколько проводов (обычно два провода), с помощью которых соединяют электрический датчик и измерительный прибор. Она служит для передачи электрических сигналов датчика на расстояние. В общем случае линия связи может содержать различные, необходимые для ее действия, приборы и аппараты — реле, усилители, трансформаторы и т. п.

Различают системы телеизмерения ближнего (до 20 км) и дальнего (до сотен километров) действия.

В системах ближнего действия прибор на приемном пункте линии связи измеряет интенсивность сигнала датчика. В этих системах используются электрические датчики постоянного тока, так как на электрический сигнал датчиков переменного тока

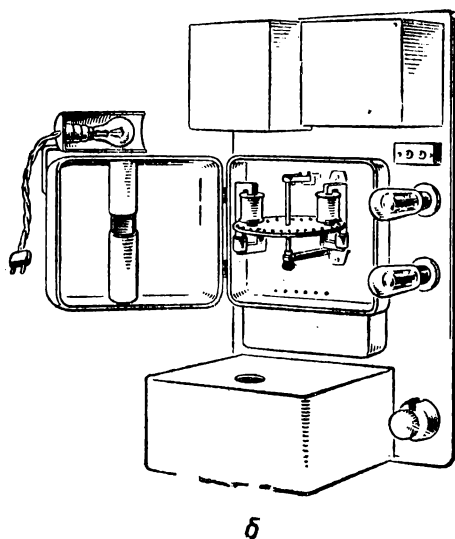
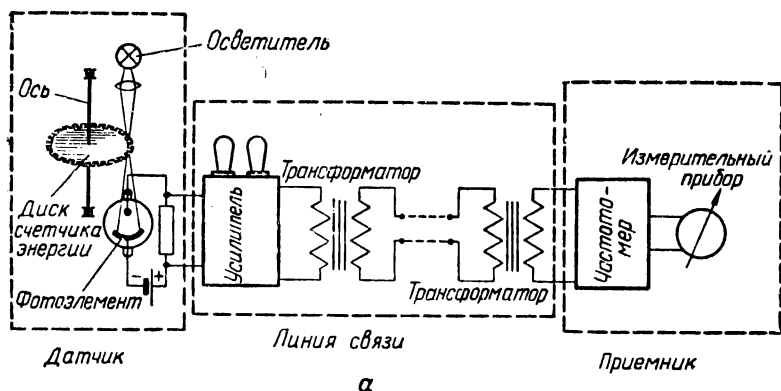


Рис. 162. Частотно-импульсная система дистанционного измерения электрической мощности:

а — принципиальная схема; б — внешний вид фотоэлектрического датчика-прерывателя.

сильное влияние оказывают индуктивность и емкость линии связи.

В системах дальнего действия слабый электрический сигнал датчика не может быть передан по весьма протяженной линии

связи. Поэтому здесь применяют либо датчики переменного тока изменяющейся частоты, либо датчики электрических импульсов (прерывистых сигналов). В этих системах измерительный прибор реагирует на изменение или частоты, или числа импульсов. Интенсивность сигнала датчика здесь не влияет на показания измерительного прибора.

В качестве примера измерительной системы устройств дальнего действия может быть назван фотоимпульсный телеваттметр. Он служит для измерения электрической мощности в каком-либо пункте энергосистемы, расположенном от места установки регистрирующего прибора на значительном расстоянии. Рассмотрим действие телеваттметра, схематически изображенного на рисунке 162, а.

Первичным преобразователем этого устройства служит индукционный счетчик энергии, скорость вращения диска которого пропорциональна мощности передачи энергии.

В данном случае счетчик является чувствительным элементом механического типа. В отличие от обычных счетчиков он лишен счетного механизма, а на периферии его диска равномерно нарезаны зубцы. Над диском помещена небольшая лампа накаливания, свет которой при помощи простого оптического устройства фокусируется в плоскости диска счетчика. Под диском установлен фотоэлемент, являющийся вторичным преобразователем системы — датчиком параметрического типа. При вращении диска свет прерывается зубцами диска. Под воздействием пульсирующего света в цепи фотоэлемента возникает прерывистый фототок, частота пульсаций которого зависит от скорости вращения диска, то есть она пропорциональна мощности. Пульсирующий фототок управляет работой электронного усилителя, включенного в линию связи. Нагрузкой усилителя служит трансформатор, также являющийся элементом линии связи. Принимающим прибором служит частотомер, показания которого пропорциональны частоте импульсов, а следовательно, и величине мощности, измеряемой чувствительным элементом.

Благодаря отсутствию механических контактов эта система достаточно надежна.

§ 39. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ РАЗМЕРОВ ИЗДЕЛИЙ

Контрольно-сортировочные автоматы. На современных предприятиях качество изделий, выпускаемых в больших количествах, проверяют контрольно-сортировочными автоматами. Автомат быстро и безошибочно без непосредственного участия человека измеряет параметр, характеризующий качество изделия (размер, твердость, прозрачность и т. п.), и при всяком отклонении от нормы производит соответствующую отбраковку.

Ограничимся рассмотрением контрольно-сортировочных автоматов, применяемых на машиностроительных и металлообрабатывающих заводах для контроля размеров изделий.

Электроконтактный сортировщик. На рисунке 163, а в качестве примера приведена принципиальная схема электроконтактного автомата.

Основными узлами автомата являются: 1) транспортирующий механизм (питатель), подающий и устанавливаю-

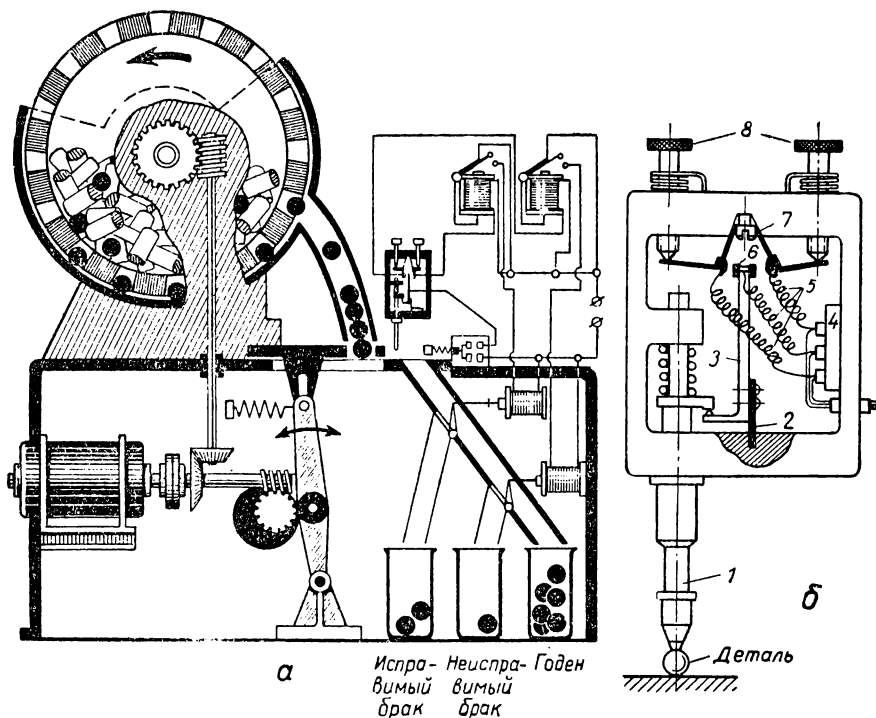


Рис. 163. Схема электроконтактного автомата для контроля размеров изделий:
а — общий вид; б — электроконтактная головка.

щий изделие для измерения; 2) электроконтактный измеритель и 3) сортировочный механизм, который в соответствии с результатом измерения отбраковывает и рассортировывает изделия на группы. Датчиком сигналов измерения здесь служит электроконтактная головка (рис. 163, б), снабженная измерительным стержнем 1 и двумя парами контактов. Подвижные контакты 6 расположены на рычаге 3, удерживаемом в среднем положении плоской пружиной 2. Неподвижные контакты установлены на пружине 7 и изолированы от нее. Посредством трех спиральных проводников 5 эти контакты присоединены к за-

жимам распределительной колодки 4. Зазор между контактами регулируется винтами 8.

Электроконтактный измеритель проверяет качество изделия без указания численных значений размеров деталей. Он только управляет режимом работы двух промежуточных электромагнитных реле, каждое из которых в свою очередь может замыкать своими контактами цепь питания соответствующего отбраковывающего электромагнита.

Проследим, как работает автомат. При соприкосновении изделия нормального размера с наконечником измерительного стержня подвижный контакт датчика удерживается в нейтральном положении. В этом случае отбраковывающие электромагниты не препятствуют движению детали по транспортирующей ленте и изделие попадает в тару годной продукции. Если же изделие имеет размер больше нормального, то измерительный стержень начнет перемещаться вверх, замыкая подвижный контакт датчика с неподвижным. При этом включается цепь питания промежуточного реле, контакты которого в свою очередь замыкают цепь питания электромагнита, отбраковывающего изделие по «плюсовому допуску». Перемещение сердечника электромагнита приводит в действие сортировочный механизм, и бракованное изделие попадает в тару для исправимого брака.

Изделия, размеры которых меньше нормальных, вызывают срабатывание другой пары контактов измерительной головки и другого отбраковывающего электромагнита. В этом случае сортировочный механизм направляет бракованное изделие в тару для неисправимого брака.

Кроме этих весьма простых контрольных автоматов, существуют и сложные, которые сортируют изделия на большое число групп.

§ 40. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ КОЛИЧЕСТВА ИЗДЕЛИЙ

Счетные автоматы.

По условиям работы ряда производств часто бывает необходимо иметь сведения о количестве готовых изделий, проценте брака, суммарной величине потребляемой или вырабатываемой энергии и т. д. Различные учетно-вычислительные операции выполняют счетные автоматы, которые в свою очередь подразделяются на суммирующие и вычислительные.

Суммирующие автоматы выполняют операции сложения или вычитания исходных чисел, задаваемых в форме электрического импульса. Простейшим исполнительным элементом таких автоматов является обычный счетчик числа оборотов, устройство которого рассмотрено в § 34. Он приводится в действие электромагнитным реле, снабженным храповым механизмом.

Вычислительные автоматы выполняют сложные математические действия над результатами измерения нескольких величин. Результаты математической обработки заданных чисел передаются в накапливающие счетчики. Накопленные на счетчиках итоги автоматически печатаются на бумажной ленте.

На рисунке 164 показано устройство одного из автоматов, предназначенных для подсчета количества изделий, перемещаемых конвейером. Первичным элементом автомата является фотоэлектронный датчик, подключенный к входным зажимам лампового усилителя 7. К выходным зажимам лампового усилителя подключена на-

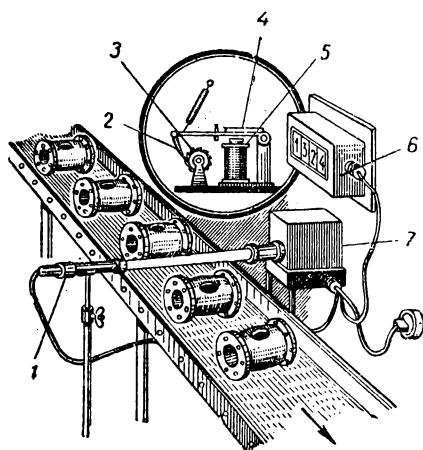


Рис. 164. Схема фотоэлектронного счетчика количества изделий.

магнивающая катушка 5 электромагнитного поворотного реле, встроенного в счетчик 6. Каждое изделие при своем движении на конвейерной ленте заслоняет луч света, направленный от осветителя 1 к фотоэлементу, и в катушке реле возникает импульс тока. Сердечник 4 намагничивается и притягивает якорь электромагнитного реле с шарнирно укрепленной на нем собачкой 2, которая упирается в зубцы храпового колеса 3 и поворачивает его. В каждом случае срабатывания электромагнитного реле храповый механизм передвигает барабан счетчика на одно деление.

При исчезновении тока в обмотке реле его якорь оттягивается возвратной пружиной в исходное положение, собачка скользит по зубцу и храповое колесо остается неподвижным.

ГЛАВА XII

АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ

§ 41. СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ МАШИНАМИ

Назначение устройств управления. Устройства управления осуществляют комплекс операций, связанных с пуском, остановкой и принудительным изменением режима работы машин, установок и механизмов.

В зависимости от степени участия человека в процессе управления работой технических объектов, различают несколько спо-

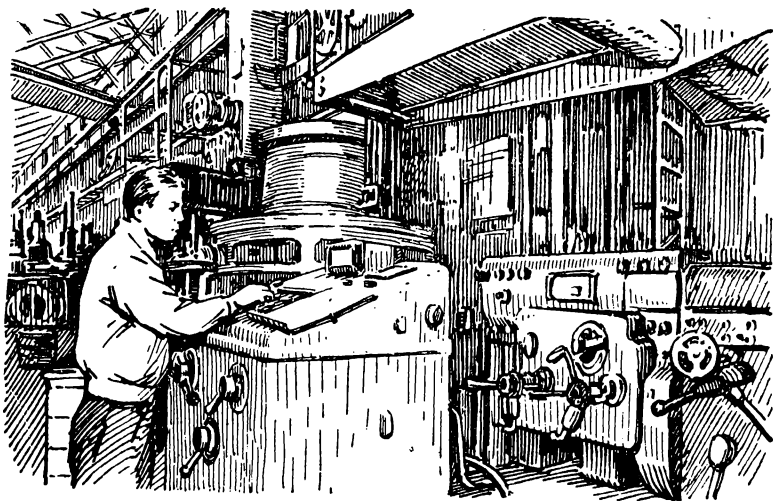


Рис. 165. Автоматизированное управление станком для обточки втулок роторов гидротурбин.

совов управления: неавтоматическое, полуавтоматическое и автоматическое.

Неавтоматическое управление.

При неавтоматическом управлении основная роль в операциях управления принадлежит человеку (оператору). Он наблюдает за фактическим состоянием управляемого объекта; принимает решение об осуществлении определенных операций и выбирает способ реализации принятого решения. Наконец, выполняя свое решение, он непрерывно или периодически воздействует на устройства управления. Именно так, по сути дела, токарь управляет процессом обработки изделия, вагоновожатый — движением трамвая, машинист мостового крана — движением тележек, моста и подъемных механизмов.

Полуавтоматическое управление.

При полуавтоматическом или, как его еще иначе называют, автоматизированном управлении и роль человека сводится только к пуску системы управления, то есть к подаче начальной команды (рис. 165). Все остальные функции оператора — приведение в действие технических средств управления по заранее установленной программе — целиком возлагаются на устройства автоматического управления. Эти устройства быстро и точно выполняют функции оператора.

По такой системе управляются металлообрабатывающие станки — полуавтоматы, пассажирские и грузовые лифты, прокатные станы и т. п.

Автоматическое управление. Автоматическим управлением называется такое управление, при котором пуск, остановку или изменение режима работы технического объекта полностью обеспечивают устройства автоматики, то есть весь процесс управления, в том числе и пуск объекта, осуществляется без непосредственного участия человека. Роль оператора сводится к монтажу и первоначальной настройке, а также к общему наблюдению за состоянием системы автоматически действующих устройств.

Примерами объектов с автоматическим управлением могут служить металлообрабатывающие станки-автоматы, работающие с непрерывно повторяющимся циклом операций, приборы для автоматической остановки поездов: автостопы и др.

В системах автоматического управления роль командного органа выполняет специальное устройство — **задатчик**. Он служит для автоматического образования первичного сигнала управления. В качестве задатчиков применяют: часовые механизмы, фотоэлементы, концевые выключатели, различные реле и т. д.

§ 42. АППАРАТУРА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ

Определение понятия „электропривод“. Самыми распространенными техническими объектами современных промышленных предприятий являются различные механизмы, оборудованные электрическими двигателями.

Рассмотрим более подробно вопросы управления работой таких механизмов. Их характерная особенность заключается в том, что электрический двигатель, будучи сам энергетической машиной, не участвует непосредственно в технологическом процессе, осуществляемом рабочей машиной; он служит лишь для приведения в движение отдельного механизма или комплекса механизмов. С другой стороны, электродвигатель и производственный механизм всегда конструктивно связаны между собой механической передачей и образуют единое машинное устройство. Управляют подобным машинным устройством в подавляющем большинстве случаев при помощи аппаратуры, включенной в цепь электродвигателя.

Часть машинного устройства, состоящая из электродвигателя с его аппаратурой управления и механической передачи от электродвигателя к рабочему механизму, называется электроприводом.

Для приведения в движение технологических машин применяют однодвигательный и многодвигательный электропривод.

Электропривод называют **однодвигательным**, если для приведения в действие рабочей машины служит обособленный электродвигатель (рис. 166). Такой электропривод называют также **одиночным**. Одиночный электропривод широко применяет-

ся в простых станках (одношпиндельном сверлильном или токарном), в транспортерах, на простых грузоподъемных машинах и во многих других несложных механизмах.

В тех случаях, когда отдельные механизмы одной машины снабжены для приведения их в действие самостоятельными электродвигателями (рис. 167), электропривод называют **многодвигательным**. Многодвигательный электропривод можно встретить на сложных металлообрабатывающих станках, бумагоделательных машинах, прокатных станах, шагающих экскаваторах и т. д.

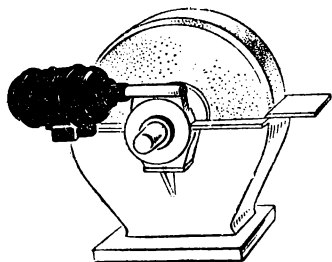


Рис. 166. Одиночный электропривод точильного камня.

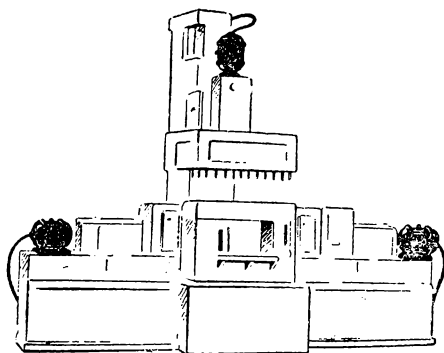


Рис. 167. Многодвигательный привод агрегатного станка.

Для управления электродвигателями создано много видов полуавтоматической и автоматической аппаратуры, среди которой весьма широкое распространение получили реле и контакторы.

Электро-механическое реле времени.

В некоторых системах автоматического управления иногда требуется обеспечить включение или отключение отдельных элементов электрических цепей двигателей с заданной выдержкой времени. В этих случаях используют электро-механическое реле времени, устройство одного из типов которых схематически показано на рисунке 168. Такое реле снабжают электромагнитом с втяжным якорем, который управляет часовым механизмом. При включении намагничивающей катушки 3 в цепь источника питания якорь 1 начнет втягиваться внутрь катушки вдоль ее оси, преодолевая упругое противодействие пружины 2. Поступательное движение якоря посредством зубчатой передачи 4 и 5 преобразуется во вращательное движение поводка 6. Поводок заводит пружину 7 часового механизма. На оси часового механизма, состоящего из колесной системы, маятника 8 и храповика 9, укреплена токоподводящая пружина 10 подвижного контакта 11. При работе реле она поворачивается против движения стрелки часов до тех пор, пока своим подвижным контактом не

придет в соприкосновение с токоподводящей пружиной неподвижного контакта 12. Неподвижный контакт укреплен на пере-
становочной колодке 13, которую можно закрепить на любом
месте шкалы времени 14. Дуга между контактами 11 и 12 опре-
деляет выдержку времени.

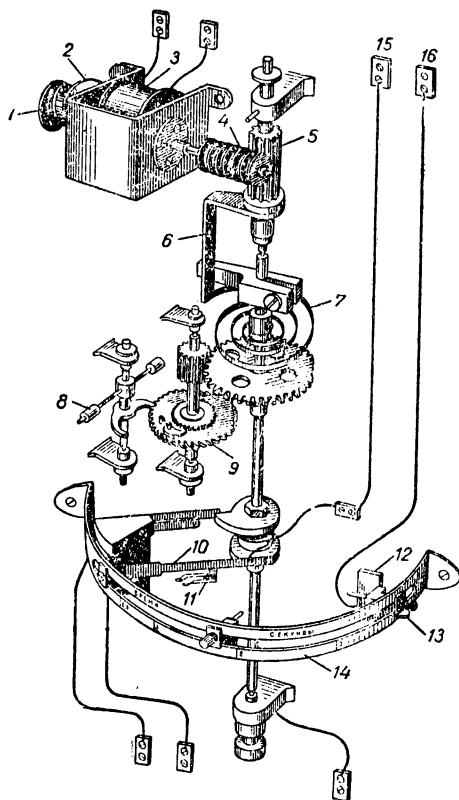


Рис. 168. Реле времени.

Цепь, управляемая реле, присоединяется к зажимам 15 и 16.

При отключении намагничивающей катушки якорь реле 1 под действием заведенной пружины 2 возвращается в исходное положение.

Тепловое. Одним из наиболее распространенных реле, используемых для защиты электродвигателей, является тепловое реле.

Тепловое реле (рис. 169) состоит из трех основных элементов: проволочного электрического нагревателя 3, биметаллической пластинки 2 и нормально закрытых контактов 1.

Биметаллическая пластинка представляет собой двухслойную пластинку, сваренную из двух металлов, имеющих различные температурные коэффициенты линейного расширения.

Верхний слой состоит из

сплава никеля и железа (сплав инвар), у которого малый коэффициент линейного расширения. Для нижнего слоя применяется немагнитную сталь, обладающую значительным коэффициентом расширения.

Проволочная спираль электронагревателя включается последовательно в электрическую цепь объекта защиты, например в цепь питания электродвигателя. Замыкание или размыкание этой цепи осуществляют контакты специального электромагнитного выключателя (на рисунке не показан). Цепь питания намагничивающей катушки этого выключателя замкнута нормально закрытой контактной парой теплового реле. Тем самым цепь питания электродвигателя выполняет роль управляющей цепи тепло-

вого реле, а цепь катушки электромагнитного выключателя — управляемой цепи.

При длительной перегрузке двигателя, когда ток в нагревателе заметно возрастает, биметаллическая пластинка изгибается, так как ее нижний слой удлиняется значительно больше, чем верхний. Это и используется для приведения в действие реле: изгибающаяся кверху пластинка освобождает защелку 5, которая под действием пружины поворачивается и размыкает контакты 1 реле. Цепь намагничивающей катушки электромагнитного выключателя разрывается, его контакты размыкаются и двигатель автоматически отключается от питающей сети.

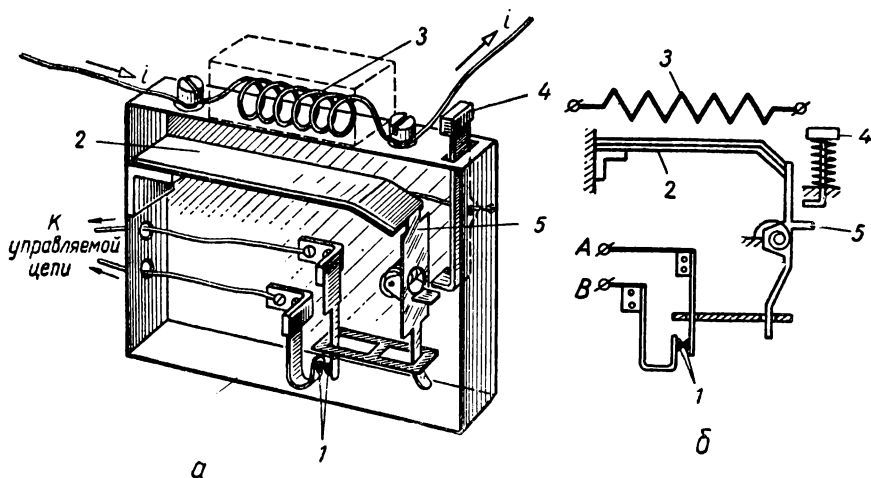


Рис. 169. Тепловое реле (а) и его схема (б).

После охлаждения пластинки нажатием кнопки 4 возвращают реле в исходное положение.

Реле максимального тока.

Для защиты электрических установок от токов короткого замыкания и кратковременных внезапных перегрузок (токовая защита) служит реле максимального тока мгновенного действия. С устройством реле можно ознакомиться по рисунку 170. Намагничивающая катушка 1 включается в контролируемую цепь переменного тока. Возбуждаемый в реле переменный магнитный поток пронизывает стальной Z-образный якорь 7. Якорь с подвижным контактом притягивается к полюсам электромагнита и, преодолевая противодействующий момент пружины 4, поворачивается вокруг оси. Если ток в контролируемой цепи не превышает заданного значения, то подвижный контакт 6 реле не соприкасается с неподвижным 5. При коротком замыкании ток увеличится и подвижный контакт реле коснется неподвижного.

Если ток в цепи снова уменьшится, то пружина возвратит якорь в прежнее положение и контакты разомкнутся.

Ток срабатывания реле можно плавно регулировать при помощи стрелки 3, уменьшая или увеличивая натяжение спиральной пружины.

Значения тока срабатывания реле нанесены на шкале 2 прибора.

Контактор. Основным элементом большинства устройств автоматического управления электродвигателями является контактор. Контактором называют аппарат, осуществляющий дистанционное включение и отключение силовых цепей электрических установок при помощи электромагнита.

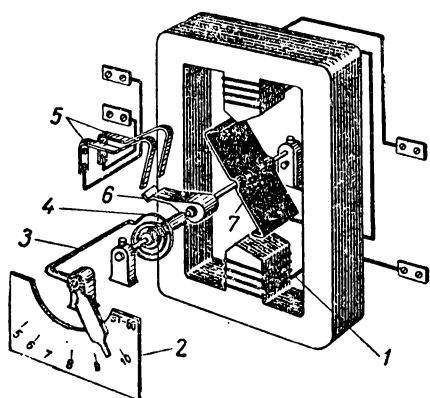


Рис. 170. Реле максимального тока серии ЭТ.

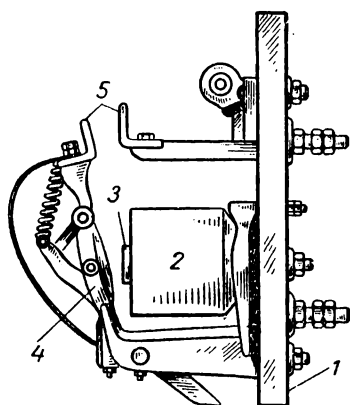


Рис. 171. Однополюсный контактор постоянного тока.

Контактор (рис. 171) устанавливают на изоляционной панели 1. Он состоит из катушки 2 со стальным сердечником 3, подвижного якоря 4, силовых контактов 5, а также дугогасительной камеры и системы блокировочных контактов (нормально открытых и нормально закрытых), не показанных на рисунке.

Силовые контакты рассчитаны на включение и выключение значительных токов (десятки и сотни ампер). Блокировочные контакты используются для различного рода переключений в цепях управления и рассчитаны на относительно небольшую величину тока (доли и единицы ампера).

Когда катушку электромагнита включают в цепь источника питания, якорь контактора притягивается к сердечнику и замыкает силовые контакты. Одновременно с этим замыкаются нормально открытые и размыкаются нормально закрытые блокировочные контакты.

При отключении катушки электромагнита главные и блокировочные контакты возвращаются в исходное положение. В зависимости от числа силовых контактных пар различают одно-, двух- и трехполюсные контакторы.

§ 43. РЕЛЕЙНО-КОНТАКТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯМИ

Управление пуском двигателя постоянного тока.

Во многих случаях управление пуском в ход двигателей постоянного тока сводится к выведению пусковых реостатов в цепи якоря. При ручном управлении обслуживающий персонал затрачивает много времени для включения рубильников, поворота ручек реостатов и т. д., что снижает производительность механизма. Иначе дело обстоит при автоматизированном (полуавтоматическом) управлении двигателями.

В качестве примера рассмотрим упрощенную автоматизированную систему управления пуском в ход электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения. Такие двигатели устанавливают, например, на подъемных кранах.

Первичным элементом системы управления в данном случае является кнопочная станция (рис. 172), состоящая из двух кнопок «Пуск» и «Стоп». Роль регулирующего органа выполняет

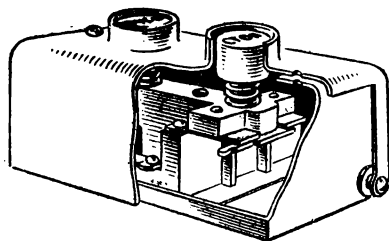


Рис. 172. Кнопочная станция.

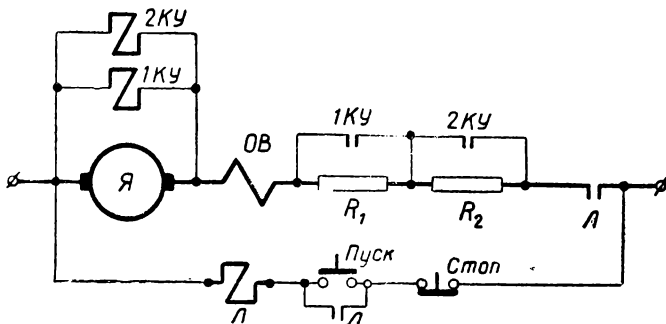


Рис. 173. Схема управления пуском двигателя последовательного возбуждения.

пусковой реостат, включенный в цепь якоря двигателя и состоящий из двух секций R_1 и R_2 (рис. 173). В питающую сеть эту цепь включает линейный контактор Л.

Отдельные секции пускового реостата закорачиваются и тем самым выводятся силовыми контактами однополюсных контакторов 1КУ и 2КУ, являющихся основными управляющими аппаратами. Катушки контакторов управления 1КУ и 2КУ выбирают с различным числом витков с таким расчетом, чтобы первый контактор срабатывал при меньшем, а второй — при большем напряжении. Обе катушки контакторов управления включаются параллельно якору двигателя.

При нажатии кнопки «Пуск» катушка линейного контактора Л включается в сеть. Под влиянием магнитного поля тока катушки его сердечник быстро притягивается к якору. При этом силовой и блокировочный контакты линейного контактора замыкаются. Блок-контакт шунтирует кнопку «Пуск» и ее отпускают. Когда силовой контакт Л замкнется, в цепи неподвижного якоря двигателя возникнет постоянный ток, величина которого будет ограничена пусковым реостатом. В первый момент пуска напряжение на катушках контакторов управления 1КУ и 2КУ мало, так как оно определяется только падением напряжения в неподвижном якоре. По мере увеличения скорости вращения двигателя соответственно увеличивается противоэлектродвижущая сила обмотки якоря. Вместе с ней увеличивается и напряжение на катушках контакторов управления. Когда напряжение на щетках двигателя достигнет величины, достаточной для срабатывания первого контактора управления 1КУ, он своими силовыми контактами закоротит первую секцию пускового реостата. Это вызовет резкое увеличение тока в цепи вращающегося якоря двигателя, так как сопротивление пускового реостата уменьшится.

Под влиянием возросшего тока якоря последний получит новое ускорение. Когда скорость якоря достигает значения, при котором напряжение на щетках машины (определяемое величиной противо-э. д. с.) — станет равным напряжению срабатывания второго контактора управления 2КУ, он также замкнет свои силовые контакты. Тем самым будет зашунтирована вторая секция пускового реостата. Последует дальнейшее возрастание скорости вращения якоря вплоть до нормальной. Процесс пуска на этом закончится и якорь двигателя будет вращаться с постоянной скоростью, определяемой механической нагрузкой на его валу. Останавливают двигатель нажатием кнопки «Стоп»; при этом разрывается цепь катушки линейного контактора, его главный и блокировочный контакты размыкаются, якорь двигателя отключается от питающей сети.

Магнитный пускатель. Магнитным пускателем называют устройство, применяемое для дистанционного управления (по принципу «включить — выключить») и автоматической защиты асинхронных электродвигателей.

Магнитный пускатель представляет собой трехполюсный контактор переменного тока, имеющий тепловое реле.

С устройством магнитного пускателя можно ознакомиться по рисунку 174. Контактор магнитного пускателя имеет три подвижных силовых контакта, укрепленных на валике 5, поворот которого осуществляет якорь 3 контактора. При повороте валика подвижные силовые контакты перемещаются до соприкосновения с тремя неподвижными контактами 2. Одновременно с главными контактами, вследствие поворота блокировочных контактов, также укрепленных на якоре контактора, замыкаются нормально открытые 8 и размыкаются нормально закрытые 7 блок-контакты. Главные подвижные контакты соединяются с зажимами контактора при помощи гибких проводников 6.

Силовые контакты контактора находятся в главной трехфазной цепи двигателя, то есть в цепи обмотки статора.

В два линейных провода главной цепи включены нагревательные элементы двух биметаллических тепловых реле 9. Они служат для защиты двигателя от длительных перегрузок, превышающих номинальную нагрузку на 10—20%. Нормально закрытые контакты этих реле находятся в цепи намагничивающей катушки 4 контактора. Все элементы магнитного пускателя заключены в металлический кожух, предотвращающий возможность прикосновения к токоведущим частям.

Дистанционное управление асинхронным двигателем. Дистанционное управление трехфазным асинхронным двигателем производится от кнопочной станции.

Действие системы управления можно проследить по рисунку 175. Перед началом работы включают трехполюсный рубильник. Ротор электродвигателя при этом остается неподвижным, потому что силовые контакты магнитного пускателя в цепи линейных проводов разомкнуты.

При нажатии кнопки «Пуск» электрическая цепь, содержащая катушку контактора *Л*, нормально-замкнутые контакты тепловых реле 1*РТ* и 2*РТ* и замкнутый контакт кнопки «Стоп», окажется под действием линейного напряжения питающей сети и

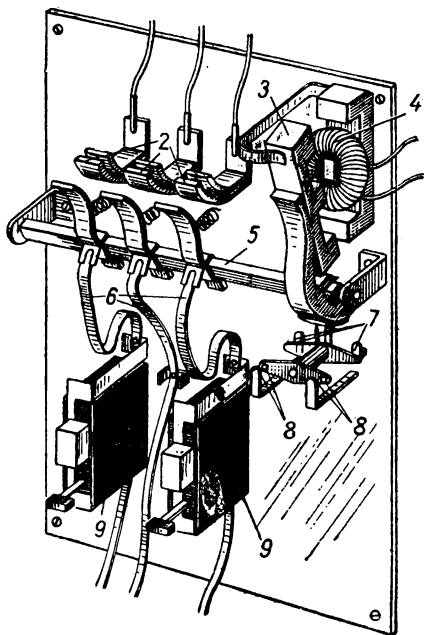


Рис. 174. Магнитный пускатель.

в этой цепи возникнет переменный ток. Под действием магнитного поля, созданного током катушки, якорь контактора притянется к сердечнику и провернет валик с укрепленными на нем главными и блокировочными контактами. Силовые контакты замкнутся, и обмотка статора двигателя включится в трехфазную питающую сеть.

В магнитной цепи двигателя возбудится вращающееся магнитное поле и ротор из состояния покоя перейдет в состояние равномерного вращения с постоянной скоростью.

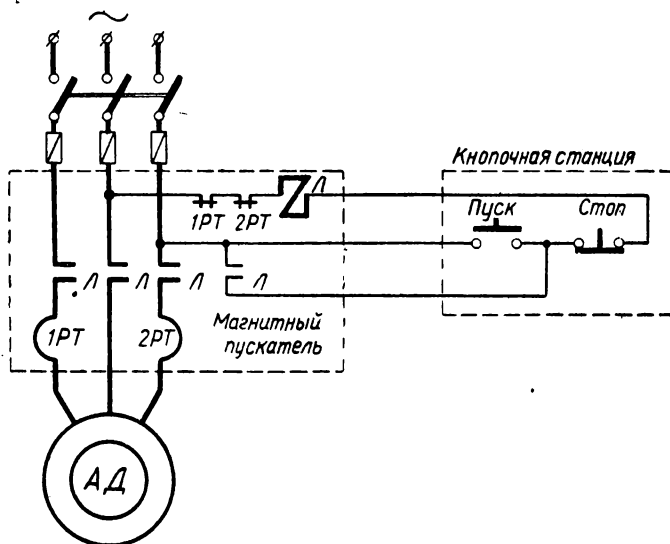


Рис. 175. Схема магнитного пускателя с кнопочной станцией.

Одновременно с главными контактами замкнется и блок-контакт, который шунтирует кнопку «Пуск», после чего она может быть отпущена. Катушка контактора остается при этом включенной в сеть.

Для отключения двигателя необходимо нажать кнопку «Стоп». Цепь катушки разорвется и под влиянием собственного веса подвижной части и пружины контактора его якорь вернется в исходное положение. Обмотка статора отключится от питающей сети, и ротор двигателя остановится.

В случае значительного снижения напряжения питающей сети ротор двигателя также останавливается, так как магнитный поток электромагнита будет недостаточен для удержания якоря контактора, а следовательно, и его контактов во включенном положении. Само собой разумеется, что двигатель отключится и при полном внезапном исчезновении напряжения. Повторный пуск двигателя происходит только путем воздействия на кнопку

«Стоп». Это исключает возможность аварий, связанных с самопроизвольным пуском двигателя (при восстановлении напряжения).

Таким образом, катушка контактора выполняет также роль электромагнитного реле защиты. Защиту двигателя от длительных умеренных перегрузок осуществляют тепловые реле, устройство и принцип действия которых рассмотрен выше. Защита силовой цепи от коротких замыканий или кратковременных, но значительных перегрузок осуществляют плавкие предохранители.

Следует отметить, что трехполюсный рубильник в рассмотренной системе используется только для отсоединения магнитного пускателя от трехфазной питающей сети при неработающем двигателе.

Упражнения

1. На рисунке 176 изображена принципиальная схема для автоматического реверсирования короткозамкнутого асинхронного двигателя с магнитным пускателем. На схеме обозначены:

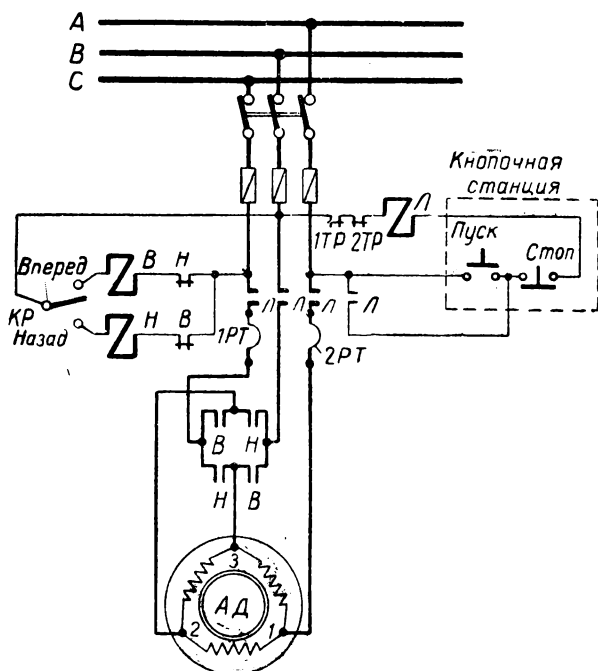


Рис. 176. К задаче № 1.

Л — намагничивающая катушка, главные и блокировочный контакты трехполюсного линейного контактора;

B — намагничивающая катушка, главные и блокировочный контакты двухполюсного контактора, обеспечивающего вращение ротора в условном направлении «вперед»;

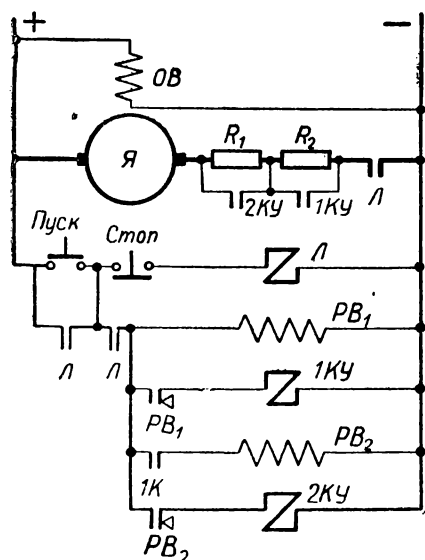
H — намагничивающая катушка, главные и блокировочный контакты двухполюсного контактора, обеспечивающего вращение ротора в условном направлении «назад»;

1PT и *2PT* — нагревательный элемент и контакты тепловых реле;

Пуск и *Стоп* — кнопки управления;

KP — ключ реверса.

Укажите стрелками на схеме направление тока в цепи в момент нажатия кнопки «Пуск» и после ее размыкания. К каким



линейным проводам будут присоединены клеммы 1, 2 и 3 обмотки статора, если ключ реверса *KP* поставлен в положение «Вперед»? Почему при переключении ключа реверса *KP* в положение «Назад» направление вращения ротора изменится на противоположное?

2. На рисунке 177 изображена упрощенная схема релейно-контакторного управления пуском двигателя параллельного возбуждения. На схеме обозначены:

Я и *OB* — якорь и параллельная обмотка возбуждения двигателя;

*R*₁ и *R*₂ — секции пускового реостата;

Л — намагничивающая катушка, главный и блокировочные контакты линейного контактора;

1KY и *2KY* — намагничивающие катушки и контакты однополюсных контакторов, обеспечивающих ускорение ротора путем короткого замыкания секций пускового реостата;

*PB*₁ и *PB*₂ — обмотки и контакты реле времени;

Пуск и *Стоп* — кнопки управления.

Проследите по схеме действие аппаратуры после нажатия кнопки «Пуск».

ГЛАВА XIII

АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

§ 44. ОБЪЕКТЫ И ПАРАМЕТРЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Режим работы различных машин, агрегатов и технических установок характеризуют несколькими физическими величинами. Например, работу электрического двигателя характеризуют величиной тока якоря, механической мощностью, скоростью вращения вала и т. п.; работу котельного агрегата — температурой и давлением пара, уровнем воды, расходом топлива и т. п.

В соответствии с условиями технологии производства весьма часто требуется, чтобы технический объект работал в таком режиме, при котором одна или несколько физических величин, его характеризующих, сохраняли бы свои значения постоянными. В других случаях, наоборот, возникает необходимость изменения этих величин по какому-либо закону. Такие физические величины принято называть регулируемыми параметрами, а технические объекты, характеризуемые ими, — объектами регулирования.

К числу объектов регулирования относятся различные двигатели, в которых требуется регулировать скорость вращения или развиваемый ими момент на валу; всевозможные тепловые установки и агрегаты (печи, котлы и т. п.), где приходится регулировать температуру, подачу топлива и т. д.; разнообразные электротехнические устройства, нуждающиеся в регулировании напряжения, частоты, электрической мощности и других параметров. Очень важную группу объектов регулирования представляют суда, самолеты, ракеты, у которых регулируемым параметром является траектория их движения.

§ 45. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ РЕГУЛИРОВАНИЯ

Неавтоматическое регулирование.

Для получения представления об общих принципах регулирования рассмотрим вначале пример неавтоматического регулирования режима работы технического объекта.

Пусть по условиям технологии производства требуется, чтобы скорость вращения вала механизма была постоянной и равной 1200 об/мин. Вал этого механизма вращает двигатель постоянного тока независимого возбуждения. Будем считать, что требуемая скорость была достигнута при номинальном значении напряжения питающей сети и некотором значении тока в цепи обмотки возбуждения двигателя. Ток обмотки возбуждения может быть изменен при помощи регулировочного реостата, введенного в эту цепь. Для измерения скорости вращения якоря двигателя в распоряжении оператора имеется тахометр.

Под влиянием различных воздействий, которым подвергается двигатель, скорость вращения вала механизма может измениться. Такими воздействиями могут быть: непредвиденное снижение напряжения питающей сети, изменение механической нагрузки на валу двигателя, повышение температуры обмоток и т. п. Допустим, что скорость вращения снизилась и по показанию тахометра она оказалась равной 1150 об/мин. Оператор, получив информацию об отклонении скорости вращения вала от требуемой (1200 об/мин), принимает решение изменить режим работы двигателя. Руководствуясь инструкцией («Если скорость вращения ротора велика, нужно увеличить ток возбуждения, если скорость мала — уменьшить ток возбуждения»), он перемещает ползунок реостата таким образом, чтобы сопротивление в цепи обмотки



Рис. 178. Схема неавтоматического регулирования.

возбуждения возросло, а ток в ней уменьшился. Если в результате этого скорость превысит заданную, то путем перемещения ползунка реостата в другую сторону оператор добивается ее снижения.

Обобщенная схема неавтоматического регулирования одного параметра изображена на рисунке 178.

Объект регулирования *О* (в рассмотренном примере — двигатель) снабжен одним измерительным органом *И* (тахометр) и одним управляющим органом *У* (реостат в цепи возбуждения). Основную роль в обеспечении требуемого режима работы объекта регулирования выполняет оператор. С одной стороны, от него исходят команды управления, направленные по цепи воздействия к объекту регулирования; с другой стороны, к нему от объекта регулирования поступает информация о фактическом значении регулируемого параметра. Образуется замкнутая кольцевая цепь передачи сигналов управления и измерения, характерная для всякого процесса регулирования. Регулирование в широком смысле слова и есть управление под контролем.

Системы автоматического регулирования. Технические средства современной автоматики дают возможность полностью исключить участие человека в процессе регулирования, то есть освободить его от необходимости непрерывно следить за ходом работы машин и управлять ими. Эти функции оператора успешно выполняют специальные системы автоматического регулирования, состоящие из трех групп устройств.

Первая группа устройств служит для измерения действительного значения регулируемого параметра; вторая — задает требуемые значения регулируемого параметра и сравнивает их с действительными значениями, а третья — воздействует на объект регулирования при всяком отклонении регулируемого параметра от требуемого.

Общее представление о структуре и взаимодействии этих групп устройств может быть дано при помощи схемы, данной на рисунке 179. Устройства первой группы образуют цепь измерения регулируемого параметра, в состав которой в общем случае входят: чувствительный элемент, установленный на объекте регулирования, датчик, усилитель и измерительный прибор.

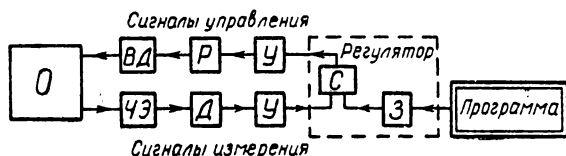


Рис. 179. Схема системы автоматического регулирования.

Устройства второй группы называют автоматическим регулятором. Он состоит из двух частей: задатчика и элемента сравнения.

Третья группа устройств образует цепь управления объектом регулирования. В состав этой цепи обычно входят: усилитель, реле, вспомогательный двигатель и т. д.

Автоматический регулятор связывает цепь измерения с цепью управления. Его элемент сравнения, с одной стороны, воспринимает сигналы измерения действительного значения регулируемого параметра, передаваемые по цепи измерения от объекта регулирования. С другой стороны, к элементу сравнения автоматического регулятора поступают сигналы, создаваемые задатчиком в соответствии с требуемыми значениями регулируемого параметра. Интенсивность сигналов задатчика и их последовательность определяются заранее установленной программой.

Если интенсивность сигналов задатчика отличается от интенсивности сигналов измерения, то в элементе сравнения возникает сигнал, передаваемый от автоматического регулятора к объекту регулирования по цепи управления. Под воздействием сигнала управления течение процесса в объекте регулирования изменяется, причем так, что разность между действительным и требуемым значениями регулируемого параметра уменьшается. Когда она достигнет допустимо малой величины, действие сигнала управления прекращается.

Таким образом, на всякое отклонение течения процесса в объекте регулирования от заданного автоматический регуля-

тор отвечает образованием управляющего сигнала, направленного на восстановление требуемого режима работы; если объект работает в заданном режиме — сигнал в цепи управления отсутствует.

§ 46. АВТОМАТИЧЕСКИЕ РЕГУЛЯТОРЫ

Стабилизирующий регулятор. В зависимости от того, по какому закону должно изменяться значение регулируемого параметра, различают три вида автоматических регуляторов: стабилизирующие, программные и следящие.

Стабилизирующий регулятор выполняет задачу поддержания какого-либо параметра процесса постоянным. Требуемое значение этого параметра вводится в регулятор путем соответствующей настройки задатчика.

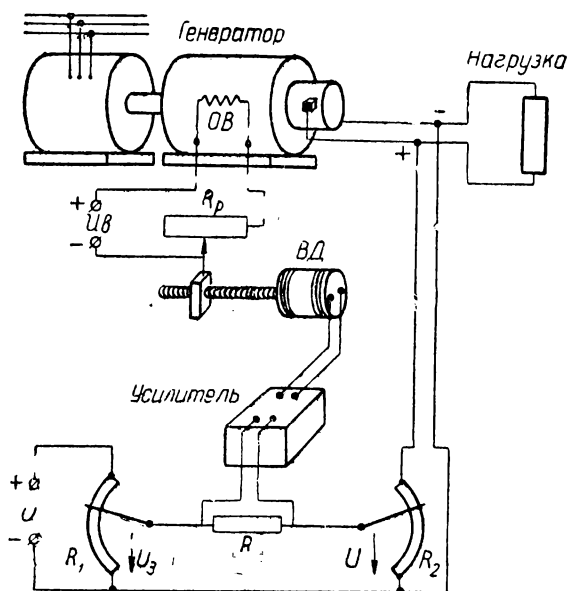


Рис. 180. Схема автоматического стабилизатора напряжения генератора.

Примером такого регулятора может служить автоматическое устройство, предназначенное для поддержания напряжения генератора постоянного тока неизменным (рис. 180).

Цель обмотки возбуждения *ОВ* генератора получает питание от постороннего источника постоянного напряжения. Ток в ней, а следовательно, и напряжение на щетках генератора, вращаемого с постоянной скоростью двигателем, зависит от величины сопротивления регулировочного реостата R_p . Ползунок регулировочного реостата перемещается небольшим вспомогательным

двигателем *ВД*, возбуждаемым постоянными магнитами. Якорь этого двигателя подключен к выходным зажимам электрического усилителя. В качестве датчика использован потенциометр R_1 , включенный на зажимы источника питания с неизменным напряжением.

В качестве измерителя регулируемого параметра служит потенциометр R_2 , включенный на щетки регулируемого генератора.

Элементом сравнения и датчиком управляющих сигналов служит сопротивление R , включенное между ползунками задающего и измерительного потенциометров. Падение напряжения на этом сопротивлении используется для управления работой вспомогательного двигателя.

Настроив регулятор на требуемый режим соответствующей установкой регулировочного реостата в цепи возбуждения генератора, систему включают в работу. При уменьшении напряжения генератора, допустим вследствие увеличения его нагрузки, в цепи элемента сравнения возникает напряжение ΔU , равное разности между напряжениями задающего и измерительного потенциометров. Одновременно с этим на щетках вспомогательного двигателя также возникает напряжение. Ротор придет во вращение и вызовет перемещение ползунка регулировочного реостата. Ток в цепи возбуждения генератора возрастет, а с ним возрастет и напряжение на зажимах генератора. Когда напряжение генератора достигнет заданной величины, сигнал, поступающий на электронный усилитель с элемента сравнения, исчезнет и двигатель остановится. При увеличении напряжения полярность сигнала изменится на обратную, вспомогательный двигатель начнет вращаться в другую сторону и переместит ползунок реостата таким образом, что напряжение генератора снизится.

Таким образом, величина регулируемого параметра — напряжение генератора — будет неизменной.

Программный регулятор. Программный регулятор выполняет задачу изменения величины параметра регулирования по определенной, заранее установленной программе.

Пример действия системы программного регулирования иллюстрирует рисунок 181.

В рассматриваемом случае необходимо изменять температуру печи по определенному графику. Требуемое технологией термической обработки материала изменение температуры во времени наносится на график, в котором по горизонтальной оси откладывается время термообработки, а по вертикальной оси — требуемая температура. Далее, лента из плотного материала, вырезанная так, что она повторяет график температуры, наматывается на ведомый барабан и закладывается между двумя направляющими пластинками. Эта профильная диаграмма непрерывно перемещается при помощи часового механизма, вращающего ведущий барабан. Элементом сравнения здесь слу-

жит рычаг Г-образной формы, который может поворачиваться вокруг оси. Поворот этого рычага вызывает штанга, снабженная роликом, который катится по краю перемещающейся ленты. Каждому положению ролика со штангой соответствует некоторая заданная температура печи.

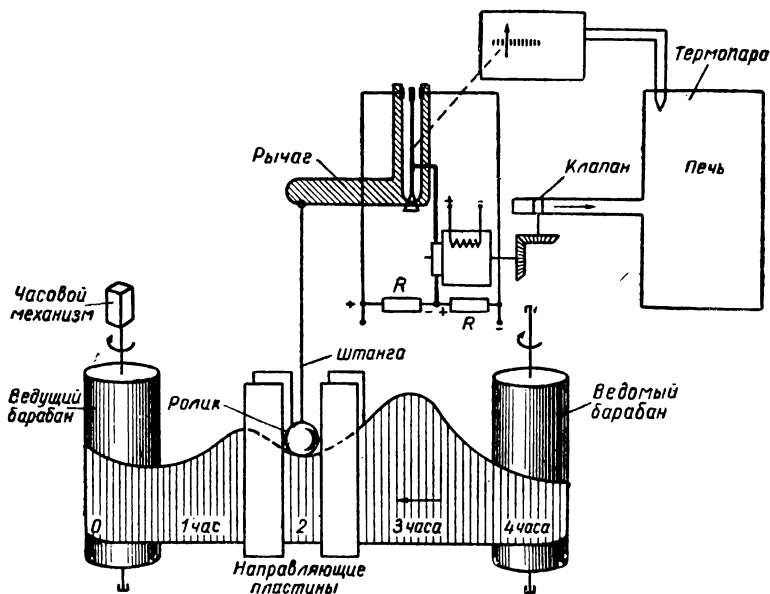


Рис. 181. Схема программного терморегулятора.

В вертикальной прорези рычага помещается стрелка прибора, измеряющего при помощи термопары температуру печи.

В случае несоответствия между требуемой и фактической температурой эта стрелка приходит в соприкосновение с одним из контактов рычага и тем самым подает напряжение на якорь вспомогательного двигателя. Вращение двигателя в соответствующем направлении вызывает перемещение клапана, что обеспечивает требуемое изменение подачи топлива в печь, вследствие чего температура в ней изменяется в нужном направлении. Когда температура печи соответствует заданной, стрелка не будет касаться контактов рычага и двигатель клапана трубопровода остается неподвижным.

Аналогично действуют программные регуляторы, ведущие другие технологические процессы.

Следящий регулятор.

Следящий регулятор выполняет задачу изменения величины параметра регулирования в зависимости от изменения какого-либо другого (зادающего) параметра, вводимого извне. В следящих системах

значения задающего параметра, а следовательно, и значения регулируемого параметра могут изменяться в широких пределах по произвольной, заранее не известной программе.

На рисунке 182 показана принципиальная схема следящего регулятора, осуществляющего одновременный поворот на один и тот же угол двух, механически не связанных между собой, валов управляющего и управляемого механизмов.

В этом устройстве вал управляющего механизма может поворачиваться штурвалом. Вал управляемого механизма приводится в движение вспомогательным двигателем.

В качестве задатчика угловых перемещений служит потенциометр R_1 , ползунок которого перемещается оператором при помощи штурвала.

Роль измерительного элемента в данном регуляторе выполняет потенциометр R_2 , ползунок которого перемещается одновременно с ротором двигателя.

В качестве устройства сравнения служит трехпозиционное поляризованное реле P , обмотка возбуждения которого включена в электрическую цепь между ползунками задающего и измерительного потенциометров. Оба потенциометра находятся под одним постоянным напряжением.

Если валы управляемого объекта и задающего штурвала повернуты на один и тот же угол (и ползунки потенциометров смещены на такой же угол), то разность потенциалов между ползунками будет равна нулю и тока в цепи обмотки реле не будет; двигатель останется в покое.

При изменении положения задающего штурвала в цепи обмотки реле возникнет ток. Реле сработает и включит двигатель D , который переместит ползунок потенциометра R_2 , вслед за ползунком потенциометра R_1 . Движение будет происходить до тех пор, пока оба ползунка не займут одинаковое положение; ток в обмотке реле прекратится и реле отключит двигатель.

Таким образом, на каждое перемещение задающего штурвала система реагирует как на новое задание: вал управляемого объекта следует за поворотом вала управляющего механизма с заданной точностью.

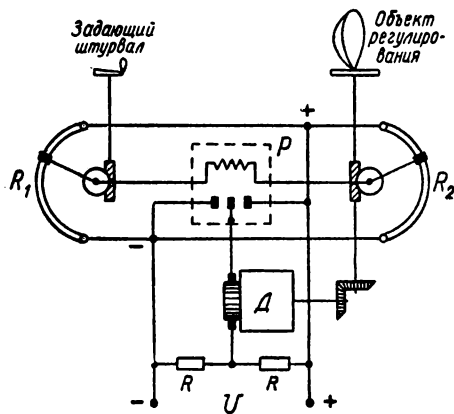


Рис. 182. Схема следящего регулятора угловых перемещений.

Раздел четвертый

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

ГЛАВА XIV

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ УСТАНОВКАМИ

§ 47. ОПАСНОСТЬ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Действие электрического тока на человека. Электрический ток, питающий разнообразные установки, используемые для блага людей, может нанести серьезный ущерб здоровью человека, а в некоторых случаях даже вызвать смерть, если не соблюдать необходимые меры предосторожности.

Тело человека представляет собой проводник электрического тока. Поэтому в случае прикосновения к токоведущим частям установок человек становится звеном электрической цепи. Электрический ток, замыкаясь через тело человека, может поразить как наружный покров, так и внутренние органы человека. Поражения наружного покрова (ожог кожи, разрыв тканей) называют электрическими травмами. Особую опасность представляют электрические удары — поражения внутренних органов человека. При электрических ударах наносятся тяжелые поражения нервной, сердечной и дыхательной системам организма.

Величина поражающего тока. Какой ток более опасен — переменный или постоянный? Установлено, что и тот и другой при величине в 0,05 а является опасным, а при величине 0,1 а — смертельным.

Величина электрического тока, замыкающегося через тело человека, зависит от величины напряжения, под действием которого оказался человек, и от электрического сопротивления его тела. Понятно, что опасность возрастает с увеличением напряжения. Какое напряжение следует считать опасным для жизни человека? Ведь бывают случаи, когда прикосновение к токоведущим частям установок заканчивается только неприятным ощущением. Благополучно окончившееся прикосновение вселяет уверенность, что опасность преувеличивается. Разберемся в этом подробнее.

Чтобы оценить величину поражающего напряжения, надо знать, чему равно электрическое сопротивление тела человека. Но сопротивление организма — это чрезвычайно изменчивая величина. Оно зависит и от свойств кожи человека, и от его душевного состояния — взволнован ли он или спокоен — и от ряда других причин. Сопротивление тела человека, как показывают измерения, может изменяться в широких пределах от 700 *ом* до нескольких десятков тысяч *ом*.

Если принять, что ток в 0,05 *а* представляет опасность для жизни человека, то нетрудно подсчитать, что напряжение даже в несколько десятков вольт (40—60 *в*) может при неблагоприятном стечении обстоятельств создать условия, когда возможен электрический удар. Поэтому необходимо всегда помнить о возможности поражения электрическим током и знать, как убежать от этой опасности.

§ 48. ИСТОЧНИКИ ОПАСНОСТИ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Особенности эксплуатации электрических установок.

Возникновение опасности при некоторых работах можно своевременно обнаружить. Например, человек слышит ненормальный стук машины или свист вырывающегося пара, видит движение раскаленной полосы металла на прокатном стане, ощущает запах газа и т. д. Чувство самосохранения подсказывает ему в этих случаях, как избежать опасность.

Иначе обстоит дело при обслуживании электротехнических установок. Органов чувств, которые позволили бы человеку видеть, слышать или осязать электрический ток (или напряжение), нет. В этом — общеизвестная трудность предотвращения опасности поражения электрическим током. Кроме того, нельзя исключить возможности случайного прикосновения человека к токоведущим частям электрических устройств или к металлическим корпусам электрических машин и аппаратов.

При определенных условиях не только прикосновение, но даже приближение к электрическим установкам может повлечь за собой поражение электрическим током.

Вот почему во время работы на электрических установках или вблизи электрических устройств соблюдают особые меры предосторожности и применяют защитные средства.

Рассмотрим некоторые возможные случаи возникновения опасности поражения электрическим током.

Опасность прикосновения к токоведущим частям.

Статистика показывает, что подавляющее большинство несчастных случаев происходит вследствие случайного прикосновения человека к неизолированным проводам, клеммам, рубильникам и другим частям электрических устройств, находящихся

под напряжением. Различают два случая прикосновения: однополюсное и двухполюсное. Однополюсным называется случайное прикосновение человека к одному проводу электрической сети, а двухполюсным — одновременное прикосновение к двум проводам.

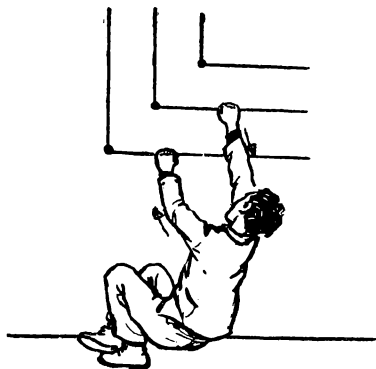


Рис. 183. Двухполюсное прикосновение.

Двухполюсное прикосновение (рис. 183) представляет наибольшую опасность, так как в этом случае величина поражающего тока достигает предельного значения. Однако данный вид поражения встречается крайне редко.

При однополюсном прикосновении последствия поражения током зависят от ряда обстоятельств и прежде всего от того, имеет ли нейтральная точка вторичной обмотки трансформатора электрическое соединение с заземлителями или она изолирована от земли.

Рассмотрим вначале случай однополюсного прикосновения к сети с изолированной нейтралью (рис. 184). В условиях нормальной работы сети, когда ни один из линейных проводов не

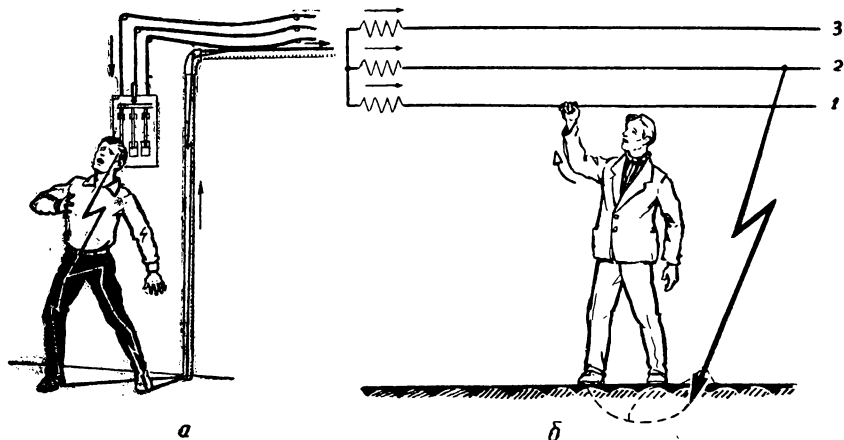


Рис. 184. Однополюсное прикосновение к сети с изолированной нейтралью и замкнутым на земле проводом.

замыкается на землю, прикосновение человека к оголенному проводу не образует замкнутой электрической цепи и, следовательно, не представляет опасности поражения током. Если же

провод замкнется на землю, что может быть в результате соприкосновения оголенного провода с какой-либо заземленной конструкцией, например с водопроводной трубой или частями отопительной системы, то опасность поражения станет реальной. Дело в том, что такое замыкание в течение длительного времени может оставаться совершенно незамеченным, так как это не отражается на работе установки (соприкосновение провода с «землей» не приводит к короткому замыканию). Однако в электрической сети будут созданы крайне опасные условия для ее эксплуатации. Действительно, если человек случайно прикоснется к одному из «здоровых» проводов и заземленной конструкции, то образуется замкнутая цепь из двух фаз трансформатора, металлических частей заземленной конструкции и тела человека. Тем самым человек окажется подверженным воздействию линейного напряжения.

В сетях с заземленной нейтралью трансформатора (рис. 185) случайное замыкание проводов на землю ведет к короткому замыканию одной из фаз трансформатора и немедленно сказывается на нормальной работе установки. Появление тока короткого замыкания вызывает быстрое срабатывание защиты, отключающей трансформатор. Таким образом, аварийное состояние замыкания на землю в сетях с заземленной нейтралью существует лишь в течение короткого периода времени.

Предположим теперь, что в условиях нормальной работы сети человек, стоящий на проводящем полу, прикоснулся к оголенному проводу трехпроводной сети с заземленной нейтралью. Тогда он окажется под воздействием фазного напряжения, а не линейного, как это было при замыкании на землю в трехпроводной сети с изолированной нейтралью. Поскольку фазное напряжение меньше линейного в $\sqrt{3}$ раз, то поражающий ток в этом случае будет меньше, чем при однополюсном прикосновении к сети с изолированной нейтралью и замкнутым на землю проводом.

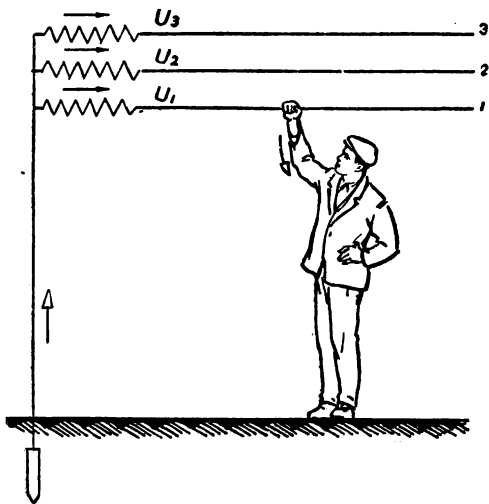


Рис. 185. Однополюсное прикосновение к сети с заземленной нейтралью.

Поэтому в трехпроводных сетях для быстрого срабатывания защиты при коротких замыканиях на землю и уменьшения величины поражающего тока нейтрали трансформаторов обычно заземляют.

Замыкание на землю. Рассмотрим случай обрыва провода воздушной линии, подключенной к трансформатору с заземленной нейтралью. Допустим, что обрыв провода и его замыкание на землю (рис. 186) произошло на значительном удалении от заземлителя.

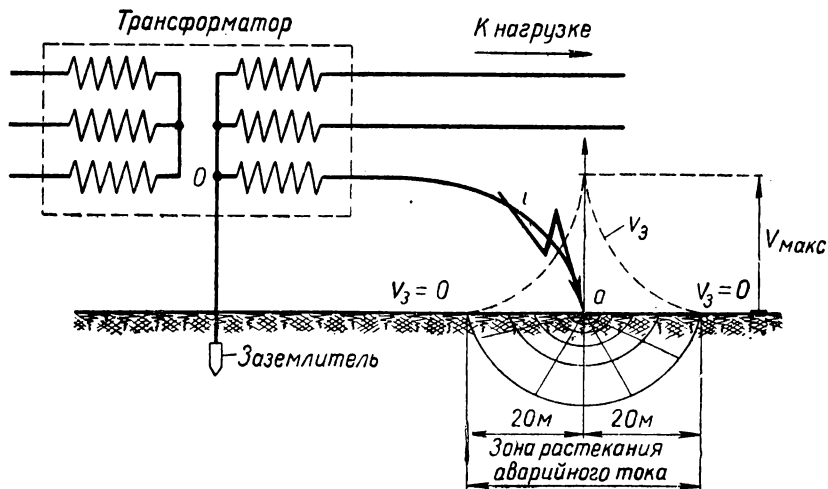


Рис. 186. Распределение потенциалов при замыкании на землю провода трехфазной линии.

Образуется электрическая цепь и аварийный ток в этой цепи будет растекаться по обширной области вокруг места замыкания провода на землю (точка a на рисунке). Наибольшее объемное сопротивление растеканию тока оказывают слои земли, лежащие вблизи места замыкания провода, так как здесь полусферическая поверхность грунта невелика. Поэтому плотность тока в этих слоях значительна и он создает наибольшее падение напряжения. По мере удаления от места замыкания тока на землю полусферическая поверхность грунта увеличивается, объемное сопротивление почвы уменьшается и, следовательно, уменьшается падение напряжения. Как показывают непосредственные измерения, кривая распределения потенциалов V_3 по поверхности почвы приближается к гиперболе (на рис. 186 показаны пунктирной линией). При однородном грунте геометрические места точек с одинаковым потенциалом будут представлять собой концентрические окружности с центром в месте аварийного замыкания провода на землю.

Напряжение относительно земли. Установлено, что точки поверхности почвы, находящиеся от места замыкания тока на расстоянии более 20 м, могут считаться точками с нулевым потенциалом ($V = 0$), то есть «землей» в электротехническом смысле слова.

Разность потенциалов между точками почвы, одна из которых находится в зоне влияния тока замыкания на землю, а другая — вне этой зоны, называется напряжением относительно земли.

Шаговое напряжение. Приближение человека к месту упавшего оборванного провода воздушной линии электропередачи сопряжено с опасностью поражения электрическим током. Дело в том, что ноги человека, касаясь почвы в зоне влияния аварийного тока, приобретают потенциал точек прикосновения (рис. 187). Напряжение, под которым оказываются ноги человека в этом случае, называют шаговым напряжением. Расчетная величина шага принимается равной 80 см. Разность потенциалов между точками почвы, отстоящими друг от друга на расстоянии 80 см, имеет наибольшее значение вблизи места замыкания на землю. По мере удаления от места замыкания величина шагового напряжения уменьшается, а на расстоянии более 20 м от него равна нулю. Следовательно, *шаговое*

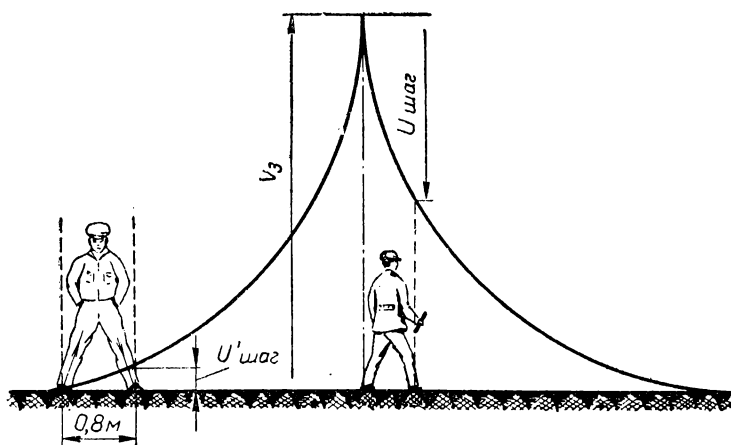


Рис. 187. К вопросу о шаговом напряжении.

напряжение тем меньше, чем дальше от места заземления провода находится человек.

Как показывает практика, при шаговых напряжениях, превышающих 100 в, человек вследствие судорог ног оказывается поверженным на землю. Это не только увеличивает действующее

на человека напряжение, но и подвергает его опасному электрическому удару, так как поражающий ток в этом случае будет замыкаться по опасной для жизни человека петле: руки — ноги.

Замыкание на корпус.

В результате пробоя изоляции обмоток машин и трансформаторов происходит аварийное соединение проводов этих обмоток с корпусами. Такое соединение называют замыканием на корпус.

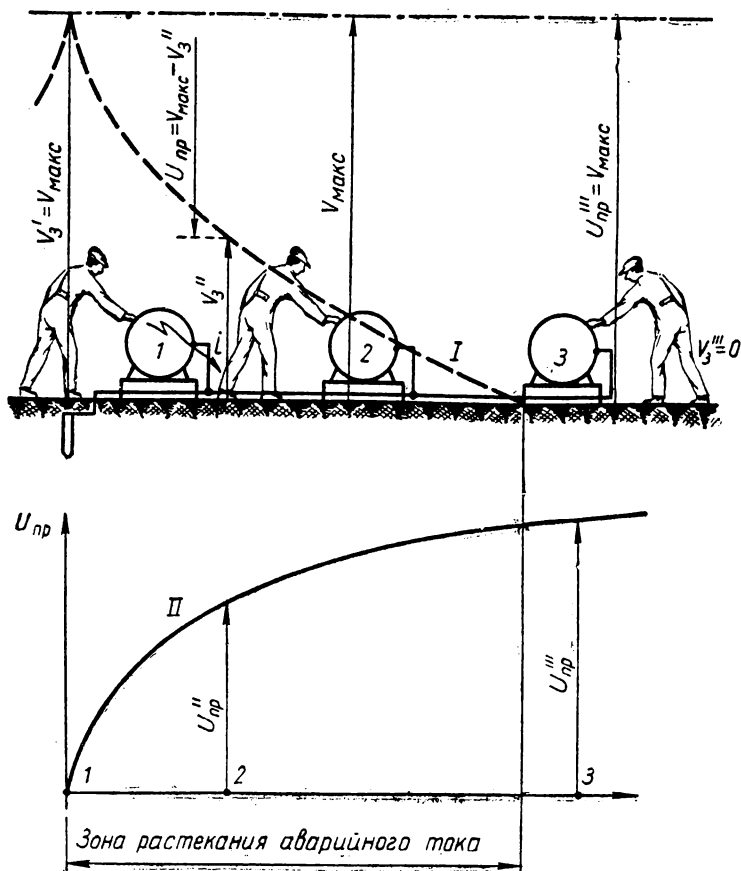


Рис. 188. К вопросу о напряжении прикосновения.

Рассмотрим рисунок 188, где изображены три электродвигателя, корпуса которых присоединены к заземляющему электроду, уложенному в однородный грунт. В электродвигателе 1 произошло замыкание на корпус. Возникающий в результате этого аварийный ток через заземлитель растекается по земле.

Распределение потенциалов точек почвы в зоне растекания показано на рисунке кривой *I*.

На первый взгляд может показаться, что прикосновение к корпусу исправного двигателя 3, расположенного вне зоны растекания аварийного тока, не связано с опасностью. Но это не так. Ведь заземлитель и все электрически соединенные с ним корпуса двигателей получают относительно земли одинаковый и наибольший потенциал $V_{\text{макс}}$. Поэтому руки человека, касаясь корпуса любого электродвигателя (исправного или пробитого), приобретают максимальный потенциал заземлителя $V_{\text{макс}}$, а ноги человека, касаясь точек почвы, приобретают потенциал V_3 этих точек.

Напряжение прикосновения. Разность потенциалов точек одновременного прикосновения человека к корпусу и земле называют напряжением прикосновения. В общем случае напряжение прикосновения $U_{\text{пр}}$, воздействию которого может подвергнуться человек, будет определяться разностью потенциалов.

$$U_{\text{пр}} = V_{\text{макс}} - V_3.$$

В случае прикосновения к электродвигателю 3 (см. рис. 188, *a*) человек попадает под максимальное напряжение прикосновения, так как потенциал его ног практически равен нулю. Напряжение прикосновения, возникающее в месте установки двигателя 2, будет меньше, чем вблизи двигателя 3.

В случае прикосновения к двигателю 1, расположенному рядом с заземлителем, напряжение прикосновения ничтожно мало, так как в этом месте потенциалы точек почвы и корпуса практически одинаковы. Таким образом, *напряжение прикосновения тем меньше, чем ближе к заземлителю находится человек.*

Зависимость величины напряжения прикосновения от расстояния между заземлителем и местом, где стоит человек, представлена кривой *II* (см. рис. 188).

Опасность остающегося заряда. К конденсатору, даже если он отключен от источника напряжения, прикоснуться сразу после отключения нельзя. Дело в том, что конденсатор может длительно сохранять заряды на своих обкладках. Чем лучше изоляция между обкладками конденсатора, тем дольше он сохраняет заряд. Прикосновение человека к незаземленным обкладкам приводит к возникновению поражающего тока, начальное значение которого равно частному от деления остаточного напряжения конденсатора на величину сопротивления тела человека.

Остаточный заряд могут сохранять также и кабельные линии. При этом величина остаточного заряда кабельной линии тем больше, чем длиннее линия.

§ 49. ЗАЩИТА ОТ ПОРАЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

Защита от прикосновения и токоведущим частям.

Для устранения опасности случайного прикосновения или приближения к голым, незащищенным частям установок, которые находятся под напряжением, эти части или установки в целом ограждают.

Токоведущие части у переносных ламп, бытовых приборов и инструментов ограждают независимо от того, к какому напряжению они подключены. При высоком напряжении ограждают не только голые, но и изолированные токоведущие части, так как не исключена возможность пробоя или механического повреждения изоляции при эксплуатации электрооборудования.

Ограждение от случайного прикосновения на установках с напряжением до 1000 в выполняется в виде крышек или коробов, закрывающих голые токоведущие части.

Ограждения снабжают сеткой и дверьми с блокировкой, что позволяет автоматически отключать устройство, когда его части становятся доступными для прикосновения.

Заземление и зануление.

Металлические части установок могут быть случайно замкнуты на корпус. Для того, чтобы можно было безопасно прикасаться к этим частям, их заземляют или зануляют.

Цель защитного заземления — снизить до безопасной величины напряжение прикосновения и шаговое напряжение.

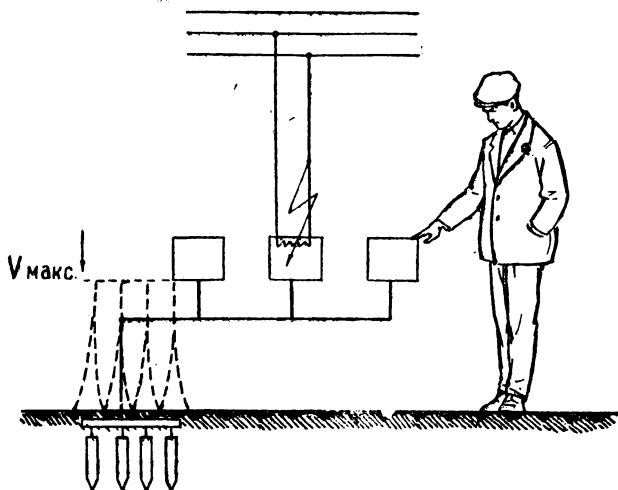


Рис. 189. Защитное заземление корпусов и каркасов электрических установок.

В грунт высокой проводимости закладывают большое количество металлических заземлителей (трубы, листы и т. п.).

К заземлителям с помощью шин малого сопротивления присоединяют корпуса электрических установок (рис. 189). Тогда наибольший потенциал относительно земли, возникающий на заземлителе и на всех связанных с ним металлических частях установок, будет низким. Поэтому прикосновение становится не опасным для жизни.

Цель защитного зануления — обеспечить отключение электрических установок от источников питания при пробое на корпус.

Защитное зануление применяется в четырехпроводных сетях низкого напряжения (до 1000 в), работающих с заземленной нейтралью.

Схематическое изображение защитного зануления показано на рисунке 190. К металлическому корпусу электрической установки присоединяют отдельный провод зануления, которым соединяют корпус установки с нейтральным проводом четырехпроводной сети. В случае пробоя на корпус фазный и нейтральный провода оказываются замкнутыми через металлический корпус устройства. Возникает ток короткого замыкания, достаточный для перегорания плавких вставок или срабатывания реле максимального тока (реле защиты).

В производственных помещениях при напряжении сети 220/127 в занулению подлежат корпуса электродвигателей, металлические рукоятки, маховички и другие части устройств, к которым в процессе работы постоянно прикасается обслуживающий персонал. В сухих и отапливаемых помещениях с плохо проводящими полами зануление не производят.

Защитные средства.

Для устранения опасности поражения электрическим током применяют различные защитные средства. К ним относятся:

- а) средства изоляции человека от земли и токоведущих частей — изолирующие подставки, коврики, галоши и перчатки;
- б) инструменты и приспособления для работы под напряжением — штанги, клещи и монтерский инструмент;
- в) приборы, указывающие напряжение, — трубки с неоновой лампой, контрольные лампы и др.

Для изготовления защитных средств применяют такие изоляционные материалы, как бакелит, эбонит, дерево, проваренное в льняном масле, диэлектрическая резина и т. д. Защитные сред-

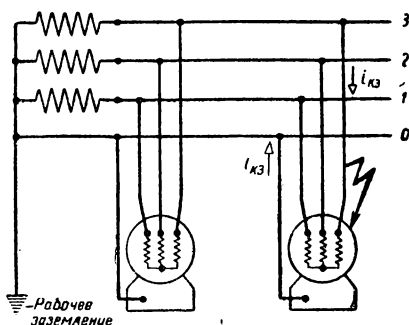


Рис. 190. Защитное зануление корпусов и каркасов электрических установок.

ства содержат в соответствии со специальными правилами хранения; прочность их изоляции периодически проверяют.

При всех работах на электрических установках обслуживающий персонал обязан пользоваться защитными средствами.

§ 50. ОКАЗАНИЕ ПЕРВОЙ ПОМОЩИ ПРИ ПОРАЖЕНИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ТОКОМ

**Освобождение
пострадавшего
от действия
тока.**

В результате поражения током могут наступить потеря сознания, прекращение пульса, иногда останавливается дыхание.

В таких случаях надо принять срочные меры по восстановлению дыхания. Но прежде всего необходимо освободить пострадавшего от действия тока.

Нужно помнить, что прикасаться к человеку, находящемуся под действием тока, опасно. Оказывающий помощь должен соблюдать следующие предосторожности:

1) в целях прекращения действия тока на пострадавшего необходимо отключить ближайший рубильник;

2) если быстрое отключение рубильника невозможно, то надо отделить самого пострадавшего от токоведущих частей, что может быть выполнено различными способами в зависимости от условий, при которых произошло поражение током. Для отделения пострадавшего от токоведущих частей электротехнической установки надевают резиновые перчатки (или обматывают руку шарфом, спускают на руку свой рукав и т. п.); если это воз-



Рис. 191. Отделение пострадавшего от токоведущих частей.

можно, под ноги подкладывают сухую доску. Рекомендуется действовать одной рукой (рис. 191).

В случае, если поражение током возникло от обрыва провода линии (рис. 192), то касаться этого провода голыми руками

нельзя. Чтобы отстранить провод от пострадавшего, надо воспользоваться сухой палкой или доской и встать на изолирующий настил или надеть галоши.

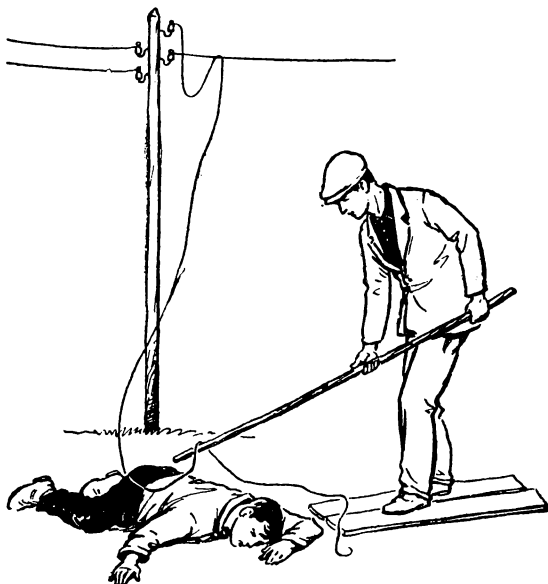


Рис. 192. Отделение провода с током от пострадавшего.

Когда быстро освободить пострадавшего от действия тока невозможно, то при низком напряжении (до 400 в) можно прибег-

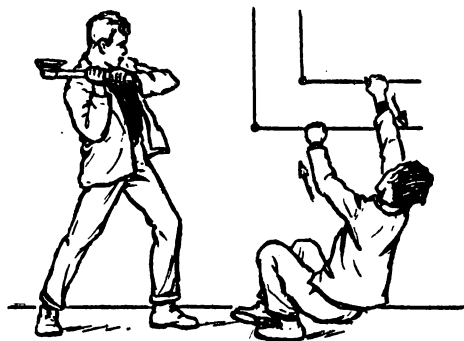


Рис. 193. Освобождение пострадавшего от действия поражающего тока.

нуть к короткому замыканию всех проводов линии (набросом проволоки) или перерубить провода топором с рукояткой из сухого дерева (рис. 193).

Искусственное дыхание.

Если пострадавший после устранения действия на него тока не пришел в сознание и его дыхание не восстановилось, то тут же на месте поражения немедленно приступают к искусственному дыханию.

Перед тем, как приступить к искусственному дыханию, пострадавшего освобождают от стесняющей его одежды, открывают рот и вставляют между коренными зубами предмет (карандаш, ложку и т. п.), препятствующий закрыванию рта. Вытягивают также язык, чтобы он не западал к гортани.

Искусственное дыхание можно осуществить двумя способами.

Первый способ применяют в случае, когда искусственное дыхание делает один человек. Пострадавшего кладут на живот, повернув лицом в сторону. Голова его должна быть несколько приподнята, для чего одну руку пострадавшего подкладывают под голову так, как это показано на рисунке 194. Вторую руку вытягивают.

Оказывающий помощь, стоя на коленях, накладывает ладони на нижние ребра пострадавшего, охватывая их с боков сложенными пальцами.

Нажимать на ребра следует плавно и ритмично с частотой нормального дыхания (15 раз в минуту). Нажатия производят прямыми руками; давление увеличивают постепенно.

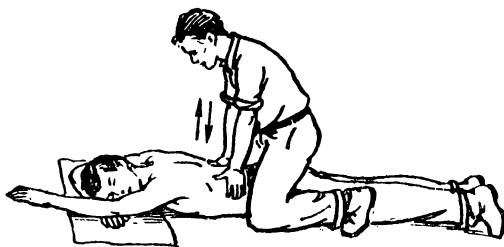
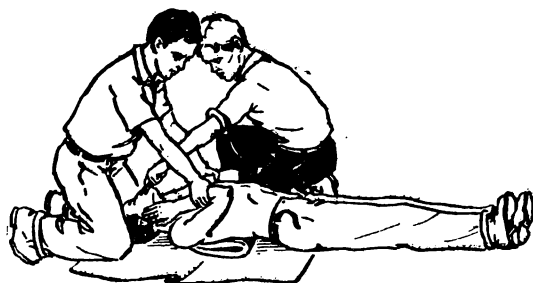


Рис. 194. Искусственное дыхание по первому способу.

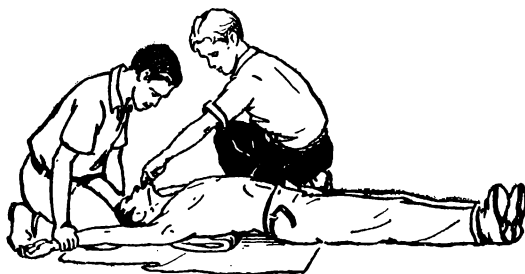
Второй способ применяют в случае, когда пострадавшему могут оказывать помощь два человека. Пострадавшего кладут на спину, подложив под лопатки свернутую одежду, чтобы голова запрокинулась немного назад (рис. 195, а). Делая искусственное дыхание располагается на коленях за головой пострадавшего и, захватив его руки ниже локтей, попеременно то прижимает их к боковым сторонам его груди, то поднимает вверх, закидывая за голову. Движение рук также должно проводиться ритмично с частотой не более 15 раз в минуту.

Другой человек удерживает язык пострадавшего, оттягивая его вниз так, чтобы он не закрывал дыхательные пути.

Когда делают искусственное дыхание, то наблюдают за состоянием пострадавшего. С появлением малейших признаков улучшения дают возможность пострадавшему дышать самостоятельно.



а.



б

Рис. 195. Искусственное дыхание по второму способу:

а — выдох; б — вдох.

Искусственное дыхание производят без перерыва до прихода врача, который определяет, что делать дальше с пострадавшим.

§ 51. ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТАХ В ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ЛАБОРАТОРИИ ШКОЛЫ

1. Приступая к работе с электрическим оборудованием, помните об опасности поражения электрическим током и будьте осторожны.

2. Электрические цепи собирайте только при отключенном источнике питания.

3. Убедитесь в исправности изоляции соединительных проводов. Не пользуйтесь проводами без наконечников. Во избежание обрывов и замыканий соединительных проводов располагайте их аккуратно и надежно зажимайте клеммами.

4. Нельзя проверять пальцами наличие напряжения на источнике питания: для этого служит вольтметр или контрольная лампа.

5. Источники питания включайте только с разрешения учителя, а первое опробование проверенной цепи — в его присутствии.

6. Следите за тем, чтобы во время работы случайно не коснуться оголенных токоведущих частей цепи, находящейся под напряжением.

7. Любые переключения в цепи производите при отключенном источнике питания, а при работе с электрическими машинами — только после полной остановки их роторов.

8. По окончании очередных наблюдений и измерений отключите источник питания.

9. Помните, что прикосновение к конденсаторам, имеющим остаточный заряд, опасно. После выключения цепи с конденсатором не забудьте разрядить его.

10. Обнаружив любую неисправность в приборах, машинах и аппаратах, находящихся под напряжением, немедленно выключите рубильник в цепи источника питания и сообщите об этом учителю.

11. Замену и установку предохранителя производите при отключенном рубильнике на щитке и только с разрешения учителя.

12. После полного окончания работы отключите источники питания, разомкните все рубильники, разберите цепь и приведите в порядок рабочее место.

ГЛАВА XV ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

ТЕМА. «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ»

Работа № 1, а. Поверка вольтметра методом сравнения

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией приборов магнитоэлектрической и электромагнитной систем. Произвести поверку вольтметра методом сравнения с образцовым прибором. Построить график поправок.

Оборудование

1. Поверяемый вольтметр.
2. «Образцовый» вольтметр, класс точности которого должен быть выше класса точности поверяемого вольтметра.
3. Ползунковый реостат 500—1500 ом.
4. Вольтметр электромагнитной системы (для ознакомления с конструкцией).

5. Амперметр магнитоэлектрической системы (для ознакомления с конструкцией).

6. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Частично разобрав приборы, предназначенные для этой цели, рассмотреть устройства успокоителя и корректора, а также ознакомиться с элементами электрической цепи вольтметра и амперметра и начертить схемы этих цепей.

2. Записать паспортные данные образцового и поверяемого вольтметров (класс точности, номинальное значение, система, заводской номер, завод-изготовитель).

3. Начертить схему поверки вольтметра, предусмотрев в ней включение реостата как потенциометра, а образцового и поверяемого вольтметров — параллельно к зажимам потенциометра. Схему дать проверить учителю.

4. Собрать электрическую цепь для поверки вольтметра по составленной схеме. Установить ползунок реостата в такое положение, при котором напряжение на образцовом и поверяемом вольтметрах будет отсутствовать. Собранный цепь показать учителю.

5. С помощью корректора установить стрелки вольтметров на нулевые отметки шкал. Если образцовый вольтметр многопредельный, то перед началом измерений подсчитать цену деления C_V и записать ее в таблицу.

6. Включить источник питания и, плавно передвигая ползунок реостата, поочередно устанавливая стрелку на шкале поверяемого прибора на каждое деление с цифрой. Записать в таблицу показания поверяемого и образцового приборов.

7. По результатам измерений рассчитать погрешность показаний ΔU каждого измерения и поправку δ . Результаты вычислений записать в таблицу.

№ измерения	Показания поверяемого вольтметра, v	Показания образцового вольтметра			Погрешность показаний ΔU	Поправка δ
		C_V	дел	v		

8. По результатам вычислений построить график поправок к вольтметру.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены электрические схемы амперметра и вольтметра, схема поверки прибора, таблица из-

мерений и вычислений, график поправок, а также паспортные данные приборов, используемых в работе.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия приборов электромагнитной системы.
2. Чем отличаются приборы электромагнитной системы от приборов магнитоэлектрической системы?
3. Каково назначение корректора и успокоителя в приборе?
4. Как можно определить действительное значение напряжения, используя график поправок?

Работа № 1, б. Поверка амперметра методом сравнения

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией приборов магнитоэлектрической и электромагнитной систем. Произвести поверку амперметра методом сравнения с образцовым прибором. Построить график поправок.

Оборудование

1. Поверяемый амперметр с пределом измерения до 5 а.
2. «Образцовый» амперметр, класс точности которого должен быть выше класса точности поверяемого амперметра. Верхний предел измерений «образцового» амперметра должен быть равен или несколько больше верхнего предела измерения поверяемого амперметра.
3. Источник постоянного тока 6—12 в или трансформатор 127/6 в (220/12 в) в зависимости от системы используемых амперметров.
4. Два ползунковых реостата на 10—35 ом с предельно допустимым током до 5 а каждый.
5. Вольтметр электромагнитной системы (для ознакомления с конструкцией).
6. Амперметр магнитоэлектрической системы (для ознакомления с конструкцией).
7. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Частично разобрав приборы, предназначенные для этой цели, рассмотреть устройство успокоителя и корректора, а также установить отличие электрической цепи вольтметра от электрической цепи амперметра и начертить их схемы.
2. Записать паспортные данные образцового и поверяемого амперметров (класс точности, номинальное значение, система, заводской номер, завод-изготовитель).

3. Начертить схему поверки амперметра. Один реостат использовать в качестве потенциометра, подключаемого к источнику питания, а другой включить последовательно с образцовым и поверяемым амперметрами. Схему дать проверить учителю.

4. Собрать электрическую цепь для поверки амперметра по составленной схеме. Установить ползунки потенциометра и реостата в положение, соответствующее наименьшему значению тока в цепи амперметров. Собранный цепь показать учителю.

5. С помощью корректора установить стрелки амперметров на нулевые отметки шкал.

Если образцовый амперметр многопредельный, то перед началом измерений подсчитать постоянную амперметра C_I и записать ее в таблицу.

6. Включить источник питания и, плавно передвигая ползунки потенциометра и реостата, поочередно устанавливать стрелку поверяемого прибора на каждое деление с цифрой. Записать в таблицу показания поверяемого и образцового приборов.

7. По результатам измерений рассчитать погрешность показаний ΔI и поправку δ . Результаты расчетов также записать в таблицу.

№ измерения	Показания поверяемого амперметра, a	Показания образцового амперметра			Погрешность показаний ΔI	Поправка δ
		C_I	дел	a		

8. По результатам вычислений построить график поправок к амперметру.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены электрические схемы амперметра и вольтметра, схема поверки прибора, таблица измерений и вычислений, график поправок, а также паспортные данные приборов, использованных в работе.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия приборов электромагнитной системы.

2. Чем отличаются приборы электромагнитной системы от приборов магнитоэлектрической системы?

3. Как можно определить действительное значение тока, используя график поправок?

Работа № 2. Измерение мощности ваттметром

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией электродинамического ваттметра и изучить его электрическую схему. Научиться включать ваттметр. Приобрести навыки измерения мощности ваттметром.

Оборудование

1. Ваттметр электродинамической системы (для измерений).
2. Ваттметр электродинамической системы (для ознакомления с конструкцией).
3. Ламповый реостат из 3—4 ламп разной мощности.
4. Омметр (или авометр).
5. Амперметр переменного тока с верхним пределом измерения, несколько большим номинального тока самой мощной лампы.
6. Вольтметр переменного тока с верхним пределом измерения, несколько большим напряжения сети.
7. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Частично разобрав ваттметр, предназначенный для этой цели, рассмотреть устройство успокоителя и корректора, а также ознакомиться с тем, как соединяются катушки с внешней цепью и начертить электрическую схему прибора.
2. Записать паспортные данные электроизмерительных приборов, используемых в работе (класс точности, номинальное значение, система, заводской номер, завод-изготовитель).
3. С помощью омметра оценить величины сопротивлений параллельной (R_V) и последовательной (R_I) цепей ваттметра.

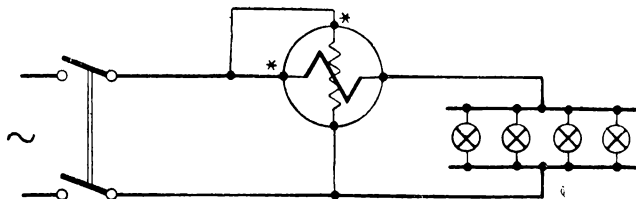


Рис. 196. Схема для измерения мощности ламп.

4. Ознакомиться со схемой измерения мощности с помощью ваттметра по рисунку 196 и дополнить эту схему приборами для одновременного измерения мощности методом вольтметра и амперметра. Дополненную схему дать проверить учителю.
5. Собрать электрическую цепь по дополненной схеме и показать ее учителю.

6. При помощи корректора установить стрелки приборов на нулевые отметки шкал.

7. Если в работе используются многопредельные приборы, то определить постоянные приборов и записать их значения в таблицу, которая приводится ниже.

8. Поочередно включая лампы, измерить их мощность непосредственно ваттметром и методом амперметра и вольтметра.

Результаты измерений занести в таблицу. В эту же таблицу записать номинальную мощность ламп.

Лампы	Номинальная мощность ламп $P_{\text{н}}$, вт	V			I			$P = U \cdot I$ вт	Мощность по ватт- метру P_W , вт
		C_V	дел	в	C_I	дел	а		
1-я лампа									
2-я лампа									
.....									
.....									

9. Сравнить мощность ламп, измеренную ваттметром, и мощность ламп, вычисленную по методу амперметра и вольтметра. Убедиться в том, что эти мощности практически совпадают. Наблюдаемое небольшое расхождение объясняется погрешностями при измерениях.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены электрическая схема ваттметра, схема измерения мощности, таблица измерений, а также паспортные данные приборов, использованных в работе.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип действия приборов электродинамической системы?

2. В цепях какого тока можно использовать приборы электродинамической системы и почему?

3. Как с помощью добавочных сопротивлений расширить пределы измерения ваттметра?

4. Что произойдет с ваттметром, если по ошибке последовательная цепь ваттметра будет включена параллельно с нагрузкой, а параллельная — последовательно?

Работа № 3. Измерение сопротивлений омметром

Цель работы

Ознакомиться с последовательной схемой омметра. Собрать омметр по заданной схеме и проградуировать его шкалу.

лу при помощи магазина сопротивлений. Приобрести навыки измерения сопротивлений.

Оборудование

1. Омметр (или авометр).
2. Вольтметр постоянного тока магнитоэлектрической системы на 3 в.
3. Источник постоянного тока напряжением 4,5 в (батарея от карманного фонаря).
4. Ползунковый реостат 250—500 ом.
5. Набор различных сопротивлений, состоящий из 3—5 сопротивлений величиной от нескольких ом до десятков килоом.
6. Магазин сопротивлений до нескольких десятков килоом.
7. Соединительные провода.

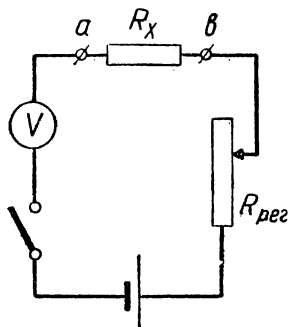


Рис. 197. Принципиальная схема омметра с последовательным включением измерительного механизма.

Порядок выполнения работы

1. По описанию прибора ознакомиться со схемой омметра (или авометра).
2. Измерить омметром сопротивления, имеющиеся в наборе. Результаты измерений записать.
3. Собрать омметр по схеме, указанной на рисунке 197.
4. С помощью регулируемого сопротивления $R_{\text{рег}}$ установить стрелку вольтметра на номинальную отметку его шкалы (верхний предел измерения вольтметра является нулевой отметкой шкалы омметра). Включая различные известные сопротивления (из магазина сопротивлений), отметить отклонения стрелки прибора. Сначала следует включить сопротивления малой, а затем большой величины. Результаты измерений записать в таблицу.

Сопротивление магазина	0									∞
Показания прибора в делениях шкалы или вольтах										0

5. Зная хорду и радиус шкалы вольтметра, вычертить шкалу омметра.

6. Используя собранный омметр, измерить те же самые сопротивления, которые в пункте 2 измерялись омметром (или авометром). Результаты измерения записать в таблицу.

Сопротивление	Показание омметра (или авометра), <i>ом</i>	Показание собранного омметра, <i>ом</i>
1		
2		
⋮		
⋮		

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены схема собранного омметра, результаты измерений, вычерченная шкала омметра, а также паспортные данные приборов, используемых в работе.

Контрольные вопросы

1. Какие существуют схемы омметров?
2. Почему необходима частая проверка установки стрелки омметра на нулевое деление его шкалы?
3. Почему в собранном омметре следует предварительно совместить стрелку вольтметра с его верхним пределом измерения?
4. На каком принципе основана работа омметров?

Работа № 4. Поверка однофазного счетчика

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией однофазного счетчика. Изучить его электрическую схему, а также схему включения счетчика в цепь. Провести поверку счетчика с помощью ваттметра, амперметра, вольтметра и секундомера.

Оборудование

1. Поверяемый однофазный счетчик на номинальный ток 5 а и номинальное напряжение 127/220 в.
2. «Образцовый» ваттметр на номинальный ток и номинальное напряжение, равные или несколько большие номинального тока и номинального напряжения счетчика.
3. «Образцовый» амперметр переменного тока на номинальный ток, равный или несколько больший номинального тока счетчика.
4. «Образцовый» вольтметр переменного тока на номинальное напряжение, равное или несколько большее номинального напряжения счетчика.

5. Однофазный счетчик переменного тока (для ознакомления).
6. Миллиамперметр переменного тока на 100—250 *ма*.
7. Ламповый реостат с набором ламп разной мощности.
8. Ползунковый реостат 100—250 *ом* с номинальным током, примерно 1—2, 5 *а*.
9. Ползунковый реостат 1500—3000 *ом*.
10. Секундомер.
11. Двухполюсный рубильник.
12. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с конструкцией счетчика:
 - а) найти последовательную и параллельную обмотки счетчика и зарисовать схемы их включения;
 - б) зарисовать конструкцию магнитопровода и его положение относительно диска;
 - в) найти магнитоиндукционный тормоз.
2. Записать паспортные данные поверяемого счетчика: тип счетчика...; номинальное напряжение $U_n = \dots$; номинальный ток $I_n = \dots$.
3. Записать паспортные данные всех измерительных приборов, используемых в данной работе (система, номинальная величина, класс точности, заводской номер, завод-изготовитель).
4. Ознакомиться со схемой включения счетчика по рисунку 198 и дополнить эту схему амперметром для измерения ве-

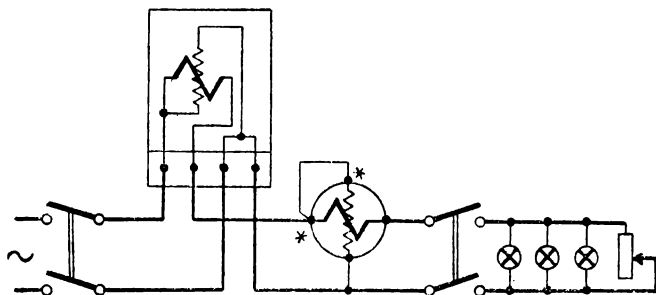


Рис. 198. Принципиальная схема проверки индукционного счетчика.

личины тока и вольтметром для измерения напряжения на зажимах счетчика. Дополненную схему дать проверить учителю.

5. Собрать цепь для испытания счетчика по составленной схеме. Собранную цепь показать учителю.

6. Установить стрелки приборов на нулевые отметки шкал. Определить номинальную постоянную K_n счетчика, постоянную ваттметра C_W и образцовых приборов, если они многопредельные. Постоянные приборов записать в таблицу.

7. Включить источник питания, когда лампы выключены, а сопротивление ползункового реостата максимально. Плавно выводить сопротивление ползункового реостата, пока ток в нем не достигнет предельно допустимого значения. Отметить мелом на реостате положение ползунка (или поставить на стержне ограничивающий хомутик). В дальнейшем следить за тем, чтобы ползунков реостата не перемещался за отмеченную черту.

8. При включении источника питания отключить цепь нагрузки и проверить отсутствие самохода счетчика, то есть убедиться в отсутствии непрерывного вращения диска счетчика (более одного оборота).

9. Включить цепь нагрузки и установить в ней ток, равный 25% от номинального тока счетчика. Отсчитать время t по секундомеру, соответствующее целому числу оборотов N диска счетчика, а также измерить ток I в цепи, напряжение U и мощность P . Все эти величины занести в таблицу.

10. Повторить все измерения, указанные в пункте 9 для тока 50 и 100% от номинального тока счетчика. Результаты записать в ту же таблицу.

№ измерения	На- грузка в %	Измеряемые величины										Вычисляемые величины						
		U			I			P			N	t	K_n	K_d	ΔK	β		
		C_V	дел	в	C_I	дел	а	C_W	дел	вт	об	сек	$\frac{K_n}{\text{вт} \cdot \text{сек}}$		$\frac{K_d}{\text{вт} \cdot \text{сек}}$		$\frac{\Delta K}{\text{вт} \cdot \text{сек}}$	
													об	сек	об	сек	об	сек
1	25																	
2	50																	
3	100																	

Здесь K_d — действительная постоянная счетчика ($K_d = \frac{Pt}{N}$).

ΔK — абсолютная погрешность счетчика ($\Delta K = K_n - K_d$).

β — относительная погрешность ($\beta = \frac{\Delta K}{K_n} \cdot 100$).

11. Определить наименьший ток в цепи нагрузки, при котором начинает работать счетчик. Для этой цели в цепь нагрузки вместо амперметра включить миллиамперметр, а в качестве нагрузки использовать высокоомный реостат. Необходимые переключения в цепи согласовать с учителем.

По миллиамперметру отметить наименьший ток, при котором диск счетчика придет в движение и сделает больше одного оборота.

12. Сделать заключение об исправности счетчика. По условиям стандарта счетчик считается исправным, если его максимальная относительная погрешность не превышает допустимой, он не имеет самохода и начинает вращаться при нагрузках, не превышающих 2% от номинальной.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены паспортные данные счетчика и всех приборов, используемых в работе, схема проверки счетчика, таблица измерений и вычислений, выводы, предусмотренные заданием.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия счетчика.
2. Что такое постоянная счетчика?
3. Каково назначение магнитоиндукционного тормоза?
4. Может ли индукционный счетчик работать в цепях постоянного тока?

ТЕМА. «ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ»

Работа № 5. Определение коэффициента мощности

Цель работы

Научиться определять коэффициент мощности однофазного токоприемника по показаниям ваттметра, вольтметра и амперметра.

Оборудование

1. Амперметр электромагнитной системы с верхним пределом измерения до 5 а.
2. Вольтметр электромагнитной системы на напряжение сети.
3. Ваттметр на номинальный ток 5 а и номинальное напряжение, превышающее напряжение сети.
4. Катушка со стальным сердечником (например, обмотка высокого напряжения школьного разборного трансформатора с подвижным сердечником).
5. Ламповый реостат из 4—6 ламп общей мощностью до 500—1000 вт.
6. Ползунковый реостат на 100—250 ом и ток 1—2,5 а.
7. Однополюсный рубильник.
8. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Дополнить схему, изображенную на рисунке 199, измерительными приборами так, чтобы можно было бы измерять мощность, ток и напряжение нагрузки, образованной последовательным соединением реостата и катушки индуктивности. Дополненную схему дать на проверку учителю.

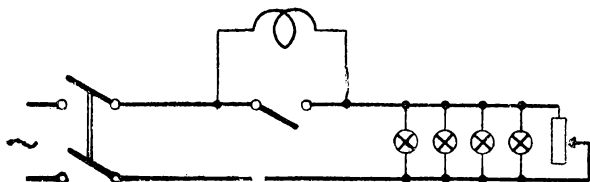


Рис. 199. Схема цепи с активно-индуктивной нагрузкой.

2. Собрать цепь по составленной схеме. Собранную цепь показать учителю.

3. Выключить лампы в реостате и замкнуть однополюсный рубильник. Поставить ползунок проволоочного реостата в положение максимального сопротивления.

Включить источник питания и, плавно перемещая ползунок реостата, установить в реостате номинальный ток. Поставить на стержень реостата хомутик, ограничивающий дальнейшее движение ползунка (или отметить положение ползунка мелом). В дальнейшем следить за тем, чтобы ползунок реостата не перемещался за отмеченную черту.

4. Если в работе используются многопредельные приборы, то определить их постоянные и записать в таблицу.

5. Комбинируя включение различных ламп и перемещая ползунок реостата в допустимых пределах, последовательно устанавливать в цепи активной нагрузки токи 1, 2, 3 а (однополюсный рубильник замкнут). При каждом указанном значении тока измерить напряжение и мощность. Результаты измерений записать в таблицу.

№ измерения	Показания ваттметра P_W			Напряжение на нагрузке U			Ток нагрузки I			Полная мощность $S = UI$, вт
	C_W	дел	вт	C_U	дел	в	C_I	дел	а	

Сравнить значения мощности, измеренной ваттметром с соответствующими значениями полной мощности, определенной методом вольтметра и амперметра. Записать соответствующие выводы.

6. Включить в цепь индуктивную нагрузку, разомкнув однополюсный рубильник. Плавным перемещением якоря сердечника катушки и изменением величины активной нагрузки установить в цепи прежние значения тока (1, 2, 3 а). Следить за показаниями всех приборов и результаты записать в таблицу.

№ измерения	Показания ваттметра P_W			Напряжение на нагрузке U			Ток нагрузки I			Полная мощность $S = UI$, вт	Коэффициент мощности $\cos \varphi = \frac{P_W}{UI}$
	C_W	дел	вт	C_U	дел	в	C_I	дел	а		

Сравнить значения мощности, измеренной ваттметром, с соответствующими значениями полной мощности, определенной методом вольтметра и амперметра. Записать соответствующие выводы.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены схема, составленная для измерений, таблицы с измерениями, выводы, предусмотренные заданием, а также паспортные данные приборов, используемых в работе.

Контрольные вопросы

1. Какую мощность измеряет ваттметр?
2. Какая мощность определяется методом вольтметра и амперметра?
3. Что называется коэффициентом мощности?

Работа № 6. Испытание генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией генератора постоянного тока и научиться снимать его характеристики.

Оборудование

1. Агрегат, состоящий из асинхронного двигателя, рассчитанного на напряжение сети и генератора параллельного возбуждения мощностью 0,25—1,5 кВт. Мощность двигателя должна превышать мощность генератора приблизительно в 1,2—1,5 раза, а их номинальные скорости вращения — примерно совпадать.
2. Генератор параллельного возбуждения в разобранном виде.
3. Ламповый или проволочный реостаты. Мощность реостатов должна превышать номинальную мощность генератора в 1,2—1,5 раза.

4. Ползунковый регулировочный реостат для включения в цепь возбуждения. Сопротивление реостата должно превышать сопротивление обмотки возбуждения в 5—10 раз, а его номинальный ток должен быть больше номинального тока возбуждения.

5. Амперметр с верхним пределом измерения, превышающим максимальный ток возбуждения генератора в 1,2—1,5 раза.

6. Амперметр с верхним пределом измерения, превышающим номинальный ток якоря генератора в 1,2—1,5 раза.

7. Вольтметр с верхним пределом измерения, превышающим номинальное напряжение генератора в 1,2—1,5 раза.

8. Авометр.

9. Двухполюсный рубильник.

10. Однополюсный рубильник.

11. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы.

1. Ознакомиться с деталями разобранного генератора:

а) найти обмотку возбуждения и проследить способ ее соединения с обмоткой якоря;

б) рассмотреть конструкцию полюсов возбуждения;

в) рассмотреть устройства якоря, коллектора и щеткодержателей.

2. Ознакомиться с испытуемым генератором и записать его паспортные данные: тип генератора..., мощность $P = \dots$, напряжение $U = \dots$, ток $I = \dots$, к.п.д. $\eta = \dots$, скорость вращения $n = \dots$.

3. Авометром измерить сопротивление якорной обмотки и обмотки возбуждения. При измерении сопротивления якорной обмотки необходимо прибор подключать непосредственно к двум диаметрально противоположным коллекторным пластинам (при двухщеточном генераторе), а не к щеткам или выходным зажимам, так как иначе скажется сопротивление переходного контакта между щетками и коллектором.

Результаты измерений записать.

4. Дополнить схему испытания генератора (рис. 200) амперметром для измерения тока возбуждения, амперметром для измерения тока нагрузки и вольтметром для измерения напряжения на зажимах генератора. Дополнительную схему дать про-
верить учителю.

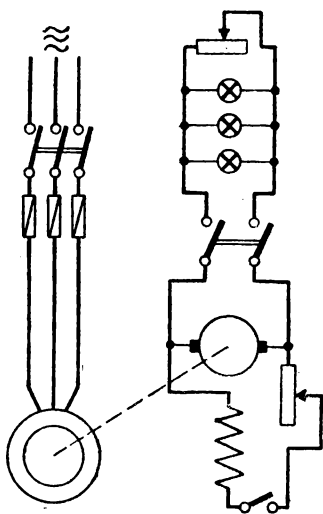


Рис. 200. Принципиальная схема испытания генератора параллельного возбуждения.

5. Соединить соответствующим образом фазы обмотки асинхронного двигателя и подключить их к трехполюсному рубильнику. Собранный цепь показать учителю.

6. Включить асинхронный двигатель. Если вращение вала двигателя не совпадает с направлением стрелки на генераторе, то отключить двигатель и сделать соответствующие изменения в схеме его включения. Согласовав выполненные изменения с учителем, снова включить двигатель. Добившись правильного вращения вала, выключить асинхронный двигатель.

7. Выполнить монтаж цепи по схеме, составленной для испытания генератора и показать учителю.

8. Снять характеристику холостого хода генератора. Для этой цели необходимо отключить нагрузку, ввести все сопротивление реостата возбуждения, однополюсным рубильником разорвать цепь обмотки возбуждения и включить двигатель. Записать в таблицу значение э.д.с. E на зажимах генератора при разомкнутой цепи возбуждения. Не останавливая двигатель, замкнуть однополюсный рубильник в цепи обмотки возбуждения и, постепенно выводя реостат возбуждения, каждый раз отмечать значения тока возбуждения и э.д.с. на зажимах генератора. Сделать 5—7 измерений до полного выключения реостата возбуждения. Результаты записать в таблицу и построить характеристику холостого хода.

I, a							
$E, в$							

9. Снять внешнюю характеристику генератора. Для этой цели необходимо вначале замкнуть рубильник в цепи обмотки возбуждения, а затем включить двигатель. Перемещая ползунок регулировочного реостата в цепи обмотки возбуждения и изменяя сопротивление нагрузочных реостатов, добиться того, чтобы при номинальном токе нагрузки напряжение на клеммах генератора было также номинальным. Далее, не изменяя сопротивления цепи обмотки возбуждения, уменьшать ток нагрузки реостатом в цепи якоря, каждый раз отмечая значение напряжения на зажимах генератора. Сделать 5—7 измерений. Результаты измерений записать в таблицу и построить внешнюю характеристику.

I, a							
$U, в$							

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены паспортные данные испытуемого генератора, а также приборов, использованных в работе; схема испытаний; таблицы измерений и графики, предусмотренные заданием.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип самовозбуждения генератора?
2. Почему нельзя якорь шунтового генератора вращать в произвольном направлении?
3. Почему с ростом нагрузки падает напряжение на зажимах генератора?
4. Почему сердечник якоря выполняется из листовой стали, а сердечник статора генератора литым?

Работа № 7. а. Испытание двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией двигателя и приобрести навыки управления двигателем (пуск, реверсирование, регулирование скорости вращения). Научиться снимать характеристики двигателя.

Оборудование

1. Двигатель параллельного возбуждения мощностью 0,2—1,5 кВт.
2. Тормозное устройство: ленточный тормоз с динамометрами или колодочный тормоз.
3. Источник постоянного тока на номинальное напряжение двигателя.
4. Двигатель параллельного возбуждения в разобранном виде.
5. Амперметр с верхним пределом измерения, превышающим номинальный ток двигателя в 1,2—1,5 раза.
6. Амперметр с верхним пределом измерения, равным или превышающим номинальный ток возбуждения двигателя в 1,2—1,5 раза.
7. Вольтметр с верхним пределом измерения, превышающим номинальное напряжение двигателя в 1,2—1,5 раза.
8. Ползунковый или специальный регулировочный реостат для включения в цепь возбуждения, обладающий сопротивлением, превышающим сопротивление обмотки возбуждения в 5—10 раз.
9. Ползунковый реостат (пусковой), рассчитанный на ток приблизительно равный половине номинального тока двигателя,

обладающий сопротивлением, превышающим сопротивление обмотки якоря примерно в 10—20 раз.

10. Авометр.

11. Тахометр.

12. Соединительные провода.

Предварительные сведения

Измерение полезной мощности и момента на валу двигателя производится с помощью различных устройств. Таким устройством может быть, например, тормозная система, представленная на рисунке 201. Вал или шкив двигателя охватывается колодками *a* и *b*, к которым крепится рычаг *d* с противовесом *c* так, чтобы центр всей тормозной системы совпадал с вертикальной прямой, проходящей через ось вращения вала. При свободных колодках рычаг будет занимать горизонтальное положение, так как сила трения между вращающимся валом и колодками ничтожно мала. По мере стягивания колодок винтами *e* будет возрастать сила трения $F_{тр}$ между колодками и валом, что создаст вращающий момент $M_{вр}$, стремящийся повернуть рычаг вместе с колодками по часовой стрелке. Величина этого вращающего момента определится выражением

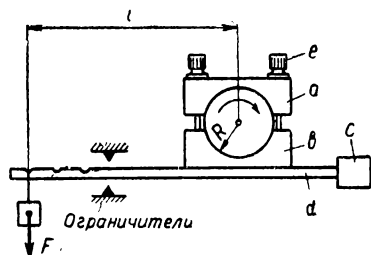


Рис. 201. Схема колодочного тормоза.

где R — радиус вала (шкива).

Для измерения вращающего момента следует на длинный конец рычага воздействовать силой F (подвешиванием груза), которая создала бы противодействующий момент $M_{пр}$ равный, но противоположный моменту вращения

$$M_{вр} = F_{тр}R,$$

где R — радиус вала (шкива).

Для измерения вращающего момента следует на длинный конец рычага воздействовать силой F (подвешиванием груза), которая создала бы противодействующий момент $M_{пр}$ равный, но противоположный моменту вращения

$$M_{вр} = M_{пр}.$$

В этом случае рычаг будет находиться в горизонтальном положении.

Если сила F , действующая на рычаг, приложена на расстоянии l от оси вращения, то

$$M_{пр} = Fl.$$

Для определения мощности на валу двигателя, необходимо вспомнить формулу мощности из раздела механики:

$$N = F\dot{v}.$$

На основании этой формулы можно рассчитать мощность, развиваемую на валу двигателя при равномерном его вращении. Она будет определяться произведением силы трения $F_{\text{тр}}$ на линейную скорость вращения вала (шкива). Производя соответствующие преобразования, получим:

$$N = F_{\text{тр}} v \frac{\kappa \Gamma \text{М}}{\text{сек}} = F_{\text{тр}} \frac{2\pi R n}{60} \frac{\kappa \Gamma \text{М}}{\text{сек}} = 1,027 F_{\text{тр}} R n \text{ вт},$$

так как

$$F_{\text{тр}} R = Fl,$$

то

$$N = 1,027 Fl n \text{ вт} = 1,027 M_{\text{пр}} n = P_2 \text{ вт}.$$

Таким образом, измеряя момент силы F при горизонтальном положении рычага d и зная скорость вращения вала, можно вычислить полезную мощность, развиваемую на валу двигателя.

На рисунке 202 представлен иной вид тормозного устройства, когда вал (шкив) двигателя охватывает тормозная лента L с двумя динамометрами D на концах. Натяжение ленты (и динамометров) производится с помощью гаек Γ . При свободной тормозной ленте трение между валом и лентой отсутствует. Подтягиванием любого динамометра прижимают ленту к валу, и силой трения она увлекается в сторону вращения вала. При этом лента растягивает пружину динамометра, расположенного со стороны набегающей и сжимает пружину другого динамометра. Сила трения между лентой и валом будет равна разности показаний динамометров, а противодействующий момент определится выражением

$$M_{\text{пр}} = (F_1 - F_2) R,$$

где

R — радиус вала;

F_1 и F_2 — показания динамометров.

Теперь формула для вычисления механической мощности, развиваемой двигателем, примет вид

$$N = 1,027 n R (F_1 - F_2) \text{ вт} = P_2.$$

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с деталями разобранного двигателя:

а) найти обмотку возбуждения и проследить способ ее соединения с обмоткой якоря;

б) рассмотреть конструкцию полюсов возбуждения;

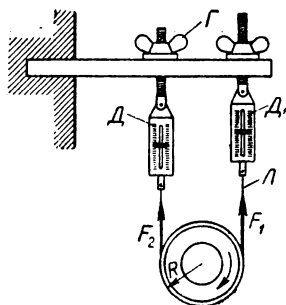


Рис. 202. Схема ленточного тормоза с динамометрами.

в) рассмотреть устройства якоря, коллектора и щеткодержателей.

2. Ознакомиться с испытуемым двигателем и записать его паспортные данные: тип ...; мощность $P = \dots$; напряжение $U = \dots$; ток якоря $I_{\text{я}} = \dots$; ток возбуждения $I_{\text{в}} = \dots$; к. п. д. $\eta = \dots$; скорость вращения $n = \dots$.

3. Авометром измерить сопротивление якорной обмотки и обмотки возбуждения. При измерении сопротивления якорной обмотки прибор необходимо подключать непосредственно к двум любым диаметрально противоположным коллекторным пластинам (при двухщеточном двигателе), а не к щеткам или выходным зажимам, так как иначе скажется сопротивление переходного контакта между щетками и коллектором.

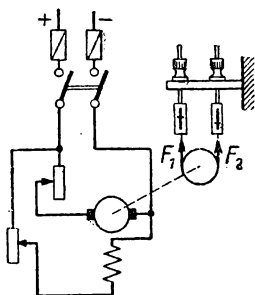


Рис. 203. Принципиальная схема испытания двигателя параллельного возбуждения.

Результаты измерения записать.

4. Дополнить схему испытания двигателя (рис. 203) амперметром для измерения тока возбуждения, амперметром для измерения тока якоря и вольтметром для измерения напряжения источника питания. Дополненную приборами схему дать проверить учителю.

5. Собрать цепь для испытания двигателя. Полностью ввести пусковой реостат и вывести реостат в цепи возбуждения. Сбранную цепь для испытания двигателя показать учителю.

6. Пустить двигатель (замкнуть рубильник в цепи источника питания) и плавно вывести сопротивление пускового реостата.

7*. Снять механическую характеристику и характеристику тока якоря двигателя. Для этого необходимо при номинальном напряжении и номинальном токе возбуждения изменять механическую нагрузку на валу двигателя путем регулировки натяжения тормозной ленты. Для каждой нагрузки измерить скорость вращения вала, величину тока якоря и записать показания динамометров. Сделать 5—7 измерений. Проследить за тем, чтобы ток якоря не превышал номинального значения.

Результаты измерений и вычислений записать в таблицу.

№ измерения	Измеряемые величины							Вычисляемые величины	
	$I_{\text{я}}$ а	$I_{\text{в}}$ а	U в	n об/мин	F_1 кг	F_2 кг	R М	$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}$ а	M кг·м

* Здесь и далее звездочкой отмечены дополнительные задания.

Здесь

I — общий ток двигателя,
 U — напряжение источника питания,
 n — скорость вращения,
 $F_1; F_2$ — показания динамометров,
 R — радиус шкива,
 M — момент на валу двигателя.

По результатам вычислений построить график зависимости скорости вращения n и тока якоря I_a от вращающего момента M .

8. Снять характеристику холостого хода. Для этого необходимо при отсутствии механической нагрузки изменять ток обмотки возбуждения и измерять скорость вращения вала двигателя.

Сделать 5—6 измерений и результаты записать в таблицу.

I_a, a							
$n_0, об/мин$.					

По результатам измерения построить кривую зависимости скорости холостого хода от тока возбуждения.

9. Произвести реверсирование двигателя, изменяя направление токов: 1) в обмотке возбуждения, 2) в обмотке якоря.

Переключения в цепях согласовать с учителем.

Перед каждым включением двигателя необходимо, чтобы сопротивление пускового реостата (в цепи якоря) было полностью введено, а сопротивление регулирующего реостата (в цепи возбуждения) полностью выведено.

Включить двигатель и убедиться в изменении направления вращения якоря.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены паспортные данные испытуемого двигателя и приборов, использованных в работе, а также схема испытаний, таблицы измерений и вычислений, графики, предусмотренные заданием.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия двигателя параллельного возбуждения.

2. Какое назначение имеет пусковой реостат в цепи якоря двигателя параллельного возбуждения?

3. Почему при пуске двигателя необходимо устанавливать наибольший ток в обмотке возбуждения?

4. Какие существуют способы для изменения направления вращения якоря двигателя?

Работа № 7, б. Испытание двигателя постоянного тока последовательного возбуждения

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией двигателя и приобрести навыки управления процессами пуска в ход и реверсирования. Научиться снимать характеристики двигателя.

Оборудование

1. Двигатель последовательного возбуждения мощностью 0,2—1,5 кВт с тормозным устройством.

2. Источник постоянного тока на номинальное напряжение двигателя.

3. Двигатель последовательного возбуждения в разобранном виде.

4. Амперметр с верхним пределом измерения, превышающим номинальный ток двигателя в 1,2—1,5 раза.

5. Вольтметр с верхним пределом измерения, превышающим номинальное напряжение двигателя в 1,2—1,5 раза.

6. Ползунковый реостат (пусковой), рассчитанный на ток приблизительно равный половине номинального тока двигателя и имеющий сопротивление, превышающее сопротивление обмотки якоря примерно в 10—20 раз.

7. Авометр.

8. Тахометр.

9. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с деталями разобранного двигателя:

а) найти обмотку возбуждения и проследить способ ее соединения с обмоткой якоря;

б) уяснить конструкцию полюсов на статоре двигателя;

в) рассмотреть устройства якоря, коллектора и щеткодержателей.

2. Ознакомиться с испытуемым двигателем и записать его техническую характеристику: тип двигателя..., мощность $P = \dots$, напряжение $U = \dots$, ток $I = \dots$, к. п. д. $\eta = \dots$, скорость вращения $n = \dots$.

3. Авометром измерить сопротивление якорной обмотки и обмотки возбуждения (метод измерения тот же, что и в предыдущей работе). Результаты измерения записать.

4. Дополнить схему испытания (рис. 204) двигателя вольтметром для измерения напряжения источника питания и амперметром для измерения тока. Дополненную приборами схему дать проверить учителю.

5. Собрать цепь для испытания двигателя. Полностью ввести сопротивление пускового реостата и с помощью тормозного устройства создать на валу (так же, как и в предыдущей работе) противодействующий момент. Собранный цепь для испытания двигателя показать учителю.

6. Пустить двигатель (закрыть рубильник в цепи источника питания) и плавно вывести сопротивление пускового реостата.

7*. Снять механическую характеристику и характеристику тока якоря двигателя. Для этого следует увеличивать тормозной момент на валу двигателя до тех пор, пока ток в цепи якоря не достигнет значения примерно равного 120% от номинальной величины. Затем, постепенно уменьшая нагрузку, каждый раз записывать показания всех приборов в нижеприведенную таблицу. Уменьшать нагрузку двигателя следует до тех пор, пока ток в цепи якоря не достигнет примерно 30% номинальной величины. Дальнейшее уменьшение нагрузки недопустимо. Сделать 6—8 измерений.

Результаты измерений и вычислений записать в таблицу

№ измерения	Измеряемые величины						Вычисляемая величина
	U в	I а	F_1 кг	F_2 кг	R м	n об/мин	$M = (F_1 - F_2) R$ кгм

Здесь U — напряжение на зажимах двигателя,

I — ток двигателя,

F_1 ; F_2 — показания динамометров,

R — радиус шкива,

M — момент на валу двигателя.

По результатам вычислений построить график зависимости скорости вращения n и тока в якорь $I_{\text{я}}$ от момента M на валу двигателя.

8. Произвести реверсирование двигателя, изменяя направление токов: 1) в обмотке возбуждения, 2) в обмотке якоря.

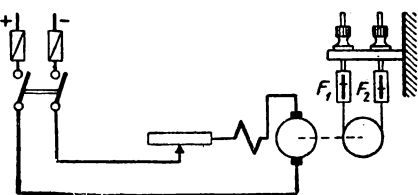


Рис. 204. Принципиальная схема испытания двигателя последовательного возбуждения.

Переключения в цепях согласовать с учителем. Перед включением двигателя необходимо полностью ввести сопротивление пускового реостата и создать противодействующий момент.

Включить двигатель и убедиться в изменении направления вращения якоря.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены паспортные данные испытуемого двигателя и приборов, использованных в работе, а также схема испытаний, таблица измерений и графики, предусмотренные заданием.

Контрольные вопросы

1. Почему необходима предварительная нагрузка двигателя последовательного возбуждения перед его пуском?
2. Почему перед пуском двигателя необходимо полностью вводить сопротивление пускового реостата?
3. Где применяются двигатели последовательного возбуждения?
4. Как можно изменить направление вращения двигателя последовательного возбуждения?

Работа № 8. Испытание однофазного трансформатора под нагрузкой

Цель работы

Ознакомиться с устройством однофазного трансформатора и исследовать зависимость напряжения вторичной обмотки, к. п. д. и коэффициента мощности трансформатора от тока нагрузки.

Оборудование

1. Однофазный двухобмоточный понижающий трансформатор мощностью до 250 *ва*, рассчитанный на напряжение питающей сети.
2. Вольтметр переменного тока на напряжение питающей сети.
3. Вольтметр переменного тока для измерения напряжения на зажимах вторичной обмотки.
4. Амперметр переменного тока для измерения тока во вторичной обмотке.
5. Амперметр переменного тока для измерения тока холостого хода.
6. Амперметр для измерения тока первичной обмотки при нагрузке.
7. Ваттметр с номинальным током 2,5—5 *а* и номинальным напряжением, превышающим напряжение сети.

8. Ламповый реостат из 4—5 ламп общей мощностью, превышающий мощность трансформатора на 15—20%.
9. Ползунковый реостат примерно 500 *ом*, 0,6 *а*.
10. Двухполюсный рубильник.
11. Трансформатор в разобранном виде.
12. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с деталями разобранного трансформатора:
а) рассмотреть обмотки, б) ознакомиться с конструкцией сердечника.

2. Ознакомиться с испытуемым трансформатором и записать его паспортные данные: $S = \dots$, $U_1 = \dots$, $U_2 \dots$.

3. Начертить эскиз трансформатора, обратив внимание на конструкцию обмоток и сердечника.

4. Руководствуясь схемой (рис. 205), составить цепь для испытания трансформатора. Для этого схему дополнить вольтметрами для измерения напряжений первичной и вторичной обмоток, амперметрами для измерения токов в первичной и вторичной цепях, ваттметром для измерения активной мощности первичной цепи трансформатора. Зарисовать схему в тетрадь и дать проверить учителю.

5. Собрать цепь по составленной схеме, выключить все лампы, поставить движок реостата в положение, соответствующее его максимальному сопротивлению.

6. После проверки схемы учителем включить рубильники P_1 и P_2 . Плавно перемещать ползунок реостата, пока ток во вторичной цепи трансформатора не достигнет номинального значения для данного реостата. Отметить мелом на реостате положение ползунка, отвечающее этому току (или поставить хомутик на его стержень). В дальнейшем следить за тем, чтобы ползунок не перемещался за отмеченную черту.

7. Разомкнуть вторичную обмотку трансформатора и измерить напряжения U_1 и U_2 на первичной и вторичной обмотках трансформатора. Определить коэффициент трансформации.

8. Подключить нагрузочные реостаты к зажимам вторичной обмотки трансформатора и, изменяя их сопротивление, постепенно увеличивать ток в обмотках трансформатора. Сделать 5—7 измерений и записать показания приборов. Результаты наблюдений и вычислений свести в таблицу и построить графики

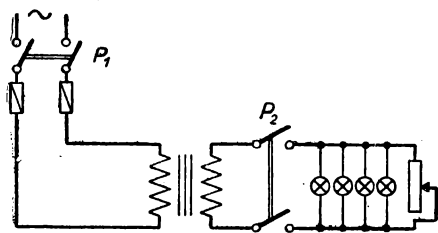


Рис. 205. Принципиальная схема испытания однофазного трансформатора.

зависимости напряжения на вторичной обмотке U_2 и коэффициента мощности $\cos \varphi$ трансформатора от тока нагрузки I_2 .

№ измерения	Измеряемые величины					Вычисляемые величины	
	I_1 а	U_1 в	P_1 вт	I_2 а	U_2 в	$S_1 = U_1 I_1$ ва	$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1}$

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены паспортные данные трансформатора и приборов, использованных в работе, а также схема исследования трансформатора, таблицы измерений и графики, предусмотренные заданием.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается принцип действия трансформатора?
2. Какие существуют конструкции сердечников и обмоток трансформаторов?
3. Что называется коэффициентом трансформации?
4. На что расходуется энергия, потребляемая из сети при холостом ходе трансформатора?

Работа № 9. Ознакомление с трехпроводной и четырехпроводной трехфазными цепями

Цель работы

Ознакомиться со способами соединения однофазных токоприемников звездой и треугольником. Определить соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями при включении потребителей звездой и треугольником методом непосредственных измерений. Выяснить роль нейтрального провода.

Оборудование

1. Ламповые реостаты — 3 шт. (с тремя лампами по 50—75 вт в каждом реостате). Лампы должны быть взяты на номинальное напряжение, равное линейному напряжению питающей сети.
2. Вольтметр переменного тока, рассчитанный на линейное напряжение.
3. Амперметры переменного тока на 3 а.
4. Соединительные провода. (Два провода для включения вольтметра должны иметь с одной стороны штекеры с длинными изолированными ручками.)

Порядок выполнения работы

I. Исследование четырехпроводной трехфазной цепи

1. Нарисовать схему соединения нагрузки (ламповые реостаты) звездой с нейтральным проводом, предусмотрев возможность измерения тока в линейных и нейтральном проводах, а также линейных и фазных напряжений на нагрузке. Показать схему учителю.

2. Собрать по составленной схеме цепь и дать проверить учителю.

3. Включая одинаковое число ламп в фазах нагрузки, измерить фазные и линейные токи и напряжения. Измерить ток в нейтральном проводе. Результаты измерений и вычислений записать в таблицы.

№ наблюдения	Количество ламп в фазах	Линейные напряжения			Фазные напряжения			$\frac{U_L}{U_F}$
		$U_{Л12}$ в	$U_{Л23}$ в	$U_{Л31}$ в	$U_{Ф1}$ в	$U_{Ф2}$ в	$U_{Ф3}$ в	
1								
2								
3								

№ наблюдения	Количество ламп в фазах	Линейные токи			Фазные токи			$\frac{I_L}{I_F}$	I_0 а
		$I_{Л1}$ а	$I_{Л2}$ а	$I_{Л3}$ а	$I_{Ф1}$ а	$I_{Ф2}$ а	$I_{Ф3}$ а		
1									
2									
3									

4. Включить в первую фазу две лампы, а во вторую и третью фазу — по три лампы, затем выключить в первой и второй фазах по одной лампе. Наконец, в первой фазе выключить все лампы, во второй фазе оставить включенной одну лампу, а в третьей фазе — две лампы. В каждом случае следить за показаниями амперметра в нейтральном проводе и контролировать величины фазных напряжений. Записать результаты наблюдений в виде вывода.

5. Включить все лампы и отключить нейтральный провод. Последовательно (как и в пункте 4), изменяя нагрузку в фазах, проследить за изменением фазных напряжений. Результаты наблюдений также записать в виде вывода.

II. Исследование трехпроводной трехфазной цепи

1. Нарисовать схему соединения нагрузки (ламповые реостаты) треугольником, предусмотрев включение амперметров для измерения фазных и линейных токов. Схему показать учителю.

2. Собрать цепь по составленной схеме и дать проверить учителю.

3. Включая одинаковое число ламп в фазах нагрузки, измерить линейные и фазные напряжения. Результаты измерений записать в таблицу и сделать вывод о соотношении между линейными и фазными напряжениями.

№ наблюдения	Количество ламп в фазах	Линейные напряжения			Фазные напряжения			$\frac{U_L}{U_F}$
		U_{L12} в	U_{L23} в	U_{L31} в	$U_{Ф1}$ в	$U_{Ф2}$ в	$U_{Ф3}$ в	
1								
2								
3								

4. Создавая неравномерную нагрузку в фазах (как и в пункте 4 предыдущего задания), следить за фазными напряжениями и накалом ламп. На основании наблюдений сделать вывод о зависимости фазных напряжений от сопротивления фаз нагрузки при их соединении треугольником.

5. Установить соотношение между линейными и фазными токами при равномерной нагрузке фаз для случая включения одной, двух или трех ламп в каждой фазе.

Результаты измерений записать в таблицу и сделать соответствующие выводы.

№ измерения	Количество ламп в фазах	I_F а	I_L а	$\frac{I_L}{I_F}$
1				
2				
3				

Проверить соотношение между линейными и фазными токами при неравномерной нагрузке и записать результаты наблюдений. Сопоставить со случаем равномерной нагрузки.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены схемы включения нагрузки, результаты измерений и выводы, предусмотренные заданием, а также паспортные данные приборов, использованных в работе.

Контрольные вопросы

1. Почему плавкие предохранители не ставят в нейтральный провод четырехпроводной трехфазной сети?

2. Каково назначение нейтрального провода?

3. Как следует включать ламповую нагрузку, если линейное напряжение 220 в, а номинальное напряжение ламп 127 в?

4. Как следует включить ламповую нагрузку, если линейное напряжение 220 в и номинальное напряжение ламп также 220 в?

Работа № 10, а. Пусковые свойства трехфазного асинхронного двигателя

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией трехфазного короткозамкнутого асинхронного двигателя. Приобрести навыки управления процессом пуска, переключения фаз обмотки статора, а также реверсирования двигателя.

Оборудование

1. Трехфазный асинхронный двигатель мощностью 0,25—2 квт.
2. Амперметр переменного тока с верхним пределом измерения, превышающим номинальный ток двигателя в 5—7 раз.
3. Перекидной трехполюсный рубильник.
4. Асинхронный двигатель, предназначенный для разборки.
5. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с деталями разобранного асинхронного двигателя:

а) рассмотреть конструкцию статора (сердечник, обмотку, боковые подшипниковые щиты);

б) рассмотреть устройство ротора (сердечник, беличью клетку, вентилятор).

2. Ознакомиться с испытуемым двигателем и записать его паспортные данные: тип двигателя... мощность $P = \dots$, напряжение $U = \dots$, ток $I = \dots$, скорость вращения $n = \dots$.

3. В соответствии с напряжением сети нарисовать схему соединения фаз обмотки статора двигателя, предусмотрев в ней необходимость включения в линейный провод амперметра для измерения пускового тока. Схему показать учителю.

4. По составленной схеме собрать цепь для пуска двигателя прямым включением обмотки статора в трехфазную сеть и дать проверить ее учителю.

5. Включить двигатель и по максимальному отклонению стрелки амперметра оценить величину пускового тока $I_{\text{пуск}}$.

6. Определить отношение пускового тока ($I_{\text{пуск}}$) к номинальному току ($I_{\text{ном}}$) для данного двигателя

$$k_i = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{ном}}}.$$

7*. Собрать цепь для пуска двигателя в ход путем дереключения фаз обмотки статора со звезды Y на треугольник Δ по рисунку 206.

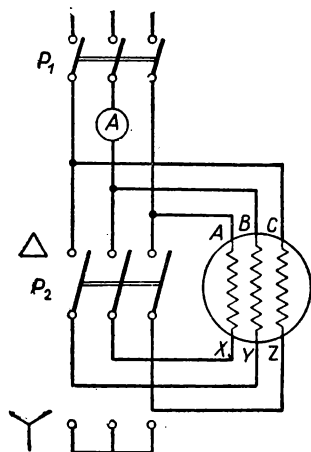


Рис. 206. Принципиальная схема пуска асинхронного двигателя переключением обмотки статора со звезды на треугольник.

Собранную цепь дать проверить учителю.

8*. Включить рубильник P_1 . Рубильником P_2 соединить фазы статорной обмотки звездой, а затем, когда ротор станет вращаться равномерно, соединить их треугольником. По максимальному отклонению стрелки амперметра оценить наибольшее значение пускового тока ($I_{\text{пуск } 2}$) при этом способе пуска двигателя.

9*. Оценить, во сколько раз снизится линейный ток ($I_{\text{пуск } 2}$) при пуске двигателя в ход переключением его статорных обмоток со звезды на треугольник по сравнению с прямым пуском ($I_{\text{пуск } 1}$).

$$\frac{I_{\text{пуск } 1}}{I_{\text{пуск } 2}} = \dots$$

10. Собрать цепь для реверсирования двигателя по рисунку 97. Собранную цепь показать учителю. Осуществить реверсирование ротора двигателя.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены паспортные данные двигателя, амперметра, а также составленные схемы и результаты измерений.

Контрольные вопросы

1. Объясните принцип действия асинхронного двигателя.
2. Как устроен асинхронный двигатель?
3. Как изменить направление вращения ротора асинхронного двигателя?
4. Зачем нужна вентиляция двигателя?
5. От чего зависит скорость вращения магнитного поля двигателя?

Работа № 10, б. Испытание асинхронного короткозамкнутого двигателя

Цель работы

Научиться измерять механическую нагрузку на валу двигателя и снимать рабочие характеристики двигателя.

Оборудование

1. Трехфазный асинхронный двигатель мощностью 0,25—2 квт.
2. Амперметр переменного тока с верхним пределом измерения, превышающим номинальный ток двигателя в 1,5—2 раза.
3. Вольтметр переменного тока с верхним пределом измерения, соответствующим напряжению сети.
4. Однополюсный рубильник.
5. Неоновая лампа.
6. Соединительные провода.
7. Секундомер.

Предварительные сведения

Скорость вращения валов машин обычно измеряют центробежным тахометром. Однако с помощью центробежного тахометра трудно проследить за незначительным изменением скорости вращения вала асинхронного двигателя при изменениях его механической нагрузки.

В этом случае целесообразнее воспользоваться более точным стробоскопическим методом измерения скорости с применением многосекторного диска (рис. 207) и неоновой лампы.



Рис. 207. Виды секторов для определения скорости вращения ротора стробоскопическим методом.

Неоновая лампа, включенная в цепь переменного тока, вспыхивает дважды за период. Если последовательно с неоновой лампой включить полупроводниковый столбик, то лампа будет вспыхивать один раз за период, а при частоте переменного тока 50 гц она вспыхнет 50 раз в секунду. Освещая светом неоновой лампы стробоскопический диск, насаженный на конец вала асинхронного двигателя, наблюдают медленное вращение секторов диска в сторону, противоположную вращению ротора.

Предположим, что двигатель имеет одну пару полюсов и ротор вращается со скоростью вращения поля. Тогда стробоскопический диск, освещаемый неоновой лампой, будет казаться неподвижным, так как диск имеет скорость вращения 3000 об/мин и лампа вспыхивает также 3000 раз в минуту и всегда будет освещать диск в одном и том же его положении.

Если же ротор, а с ним и диск вращаются несколько медленнее, чем поле, то за промежуток времени между двумя вспышками диск не будет успевать делать полного оборота. Секторы диска будут зрительно фиксироваться в положении несколько повернутом против вращения ротора. При повторных вспышках лампы это явление будет повторяться и создастся впечатление вращения секторов стробоскопического диска. Если разность скорости вращения поля n_1 и скорости вращения ротора n_2 будет равна одному обороту в минуту, то секторы стробоскопического диска сделают один оборот. Таким образом, подсчитывая число оборотов $n_{стр}$ секторов стробоскопического диска в минуту, можно определить скорость вращения ротора $n_2 = n_1 - n_{стр}$, так как скорость вращения n_1 поля известна.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с испытуемым двигателем и записать его паспортные данные: тип двигателя..., мощность $P = \dots$, напряжение $U = \dots$, номинальный ток $I = \dots$, скорость вращения $n = \dots$.

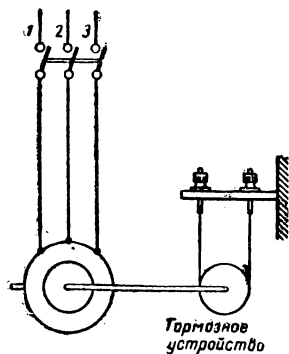


Рис. 208. Принципиальная схема испытания короткозамкнутого асинхронного двигателя.

2. Ознакомиться с тормозным устройством двигателя и выписать формулы расчета его момента и механической мощности (см. описание к работе 7, а).

3. Дополнить схему рисунка 208 вольтметром для измерения линейного напряжения, амперметром для измерения линейного тока и однополюсным рубильником для закорачивания амперметра на время пуска двигателя. Составленную схему дать проверить учителю.

4. Собрать цепь по составленной схеме и показать ее учителю.

5. Закоротить рубильником амперметр и включить обмотку двигателя в сеть. Когда ротор начнет вращаться с постоянной скоростью, включить амперметр (выключением закорачивающего рубильника). Подсчитать число оборотов секторов стробоскопического диска и измерить линейный ток в режиме холостого хода двигателя.

Постепенно увеличивать тормозной момент на валу двигателя и наблюдать за показаниями приборов.

Нагрузку двигателя изменять так, чтобы ток в линейном проводе не превышал номинального значения тока для данного двигателя. Сделать 5—7 измерений.

Результаты измерений занести в таблицу. Вычислить скорость вращения ротора, скольжение, вращающий момент и механическую мощность на валу двигателя.

№ наблю- дения	Измеряемые величины					Вычисляемые величины			
	$n_{\text{стр}}$ об/мин	U в	I а	F_1 кг	F_2 кг	$n_2 = n_1 - n_{\text{стр}}$ об/мин	$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100$ %	$M = (F_1 - F_2)R$ кгм	$P_2 = 1,027 M n_2$ вт
1									
2									
•									
•									

где U — линейное напряжение сети,
 F_1 и F_2 — показания динамометров,
 S — скольжение,
 P_2 — механическая мощность на валу двигателя (полезная),
 M — момент на валу двигателя,
 R — радиус шкива.

6. По результатам измерений и вычислений построить рабочие характеристики, то есть графики зависимости скорости вращения, скольжения, тока и момента двигателя от механической мощности на валу двигателя.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены паспортные данные испытуемого двигателя и всех измерительных приборов, а также составленная схема испытаний, таблица измерений и графики, предусмотренные заданием.

Контрольные вопросы

1. Почему скорость вращения ротора меньше скорости вращения поля?
2. Что такое скольжение?
3. Почему полезная механическая мощность на валу двигателя меньше его электрической мощности?

Работа № 11. Ознакомление с полупроводниковым выпрямителем

Цель работы

Ознакомиться с эффектом односторонней проводимости полупроводниковых вентилях. Научиться собирать полупроводниковые выпрямители.

Оборудование

1. Демонстрационный школьный вольтметр с двухсторонней шкалой.

2. Демонстрационный школьный амперметр с двухсторонней шкалой и шунтом на 100—150 *ма*.
3. Вольтметр переменного тока на 15 *в*.
4. Вольтметр постоянного тока на 15 *в*.
5. Потенциометр со средней точкой* 30 *ом*.
6. Источники постоянного тока 6—12 *в*.
7. Источник переменного тока на 127 *в*.
8. Ползунковый реостат 50—100 *ом*.
9. Селеновый столбик для разборки.
10. Селеновый столбик (из 3—8 элементов) с выведенной средней точкой.
11. Школьный разборный трансформатор.
12. Двухполюсный рубильник.
13. Аккумулятор.
14. Осциллограф (любого типа).
15. Соединительные провода.

Предварительные сведения

Для получения переменного напряжения весьма низкой частоты очень удобно использовать механические преобразователи постоянного тока в переменный. В простейшем виде таким

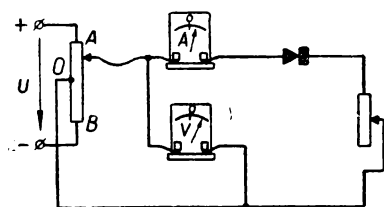


Рис. 209. Схема для наблюдения односторонней проводимости вентилей.

преобразователем является ползунковый реостат *AB* (рис. 209), с выведенной средней точкой *O*. Когда ползунок будет находиться выше средней точки, то его потенциал относительно этой точки будет положительным, а когда он займет положение ниже средней точки, то его потенциал станет отрицательным. Величина потенциала ползунка пропорциональна его смещению относительно средней точки. Плавно и непрерывно перемещая ползунок реостата между точками *A* и *B*, можно получать переменное напряжение, закон изменения которого соответствует характеру движения ползунка.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с испытуемым селеновым столбиком и записать его техническую характеристику: тип...; диаметр шайбы...; допустимый прямой ток...

* Для этой цели используют ползунковый реостат, на среднюю часть которого надевают узкий (5—10 *мм*) хомутик, стягиваемый клеммой, которая служит средней точкой потенциометра.

2. Разобрать столбик, специально предназначенный для этой цели, и ознакомиться с его конструкцией. После ознакомления произвести сборку столбика. Записать число последовательно соединяемых элементов в столбике.

3. Собрать схему (рис. 209) для наблюдения односторонней проводимости вентиля и показать ее учителю.

4. Плавно перемещая ползунок потенциометра, наблюдать за перемещением стрелок прибора. Объяснить наблюдаемое явление.

5. Собрать однополупериодный выпрямитель по схеме рисунка 210 и дать проверить учителю.

6. Включить выпрямитель и измерить напряжение U_2 на вторичной обмотке трансформатора и напряжение U_0 на зажимах нагрузки выпрямителя. Найти отношение напряжений $U_0 : U_2$ и объяснить результаты измерений.

7*. Подключить осциллограф к зажимам вторичной обмотки трансформатора и зарисовать наблюдаемую осциллограмму. Переключить осциллограф на зажимы нагрузки выпрямителя и снова зарисовать наблюдаемую картину.

8. Собрать схему двухполупериодного выпрямителя (рис. 211) со средней точкой и дать проверить ее учителю.

9. Включить выпрямитель и измерить напряжение U_2 между средней точкой и одним из зажимов вторичной обмотки трансформатора, а также напряжение U_0 на нагрузке выпрямителя. Найти отношение напряжений $U_0 : U_2$ и объяснить результаты измерений.

10*. Подключить к выходным зажимам выпрямителя осциллограф. Зарисовать кривую выпрямленного напряжения.

11. Нарисовать схему зарядки аккумулятора, предусмотрев в ней включение последовательно с аккумулятором реостата (для изменения зарядного тока) и амперметра для контроля величины зарядного тока. Нарисованную схему показать учителю.

12. Собрать цепь для зарядки аккумулятора. Дать проверить ее учителю и включить аккумулятор для зарядки. Проследить, чтобы зарядный ток не превышал максимально допустимого для выпрямителя значения.

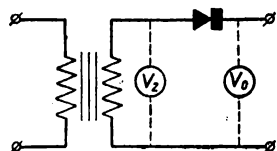


Рис. 210. Принципиальная схема однополупериодного выпрямителя.

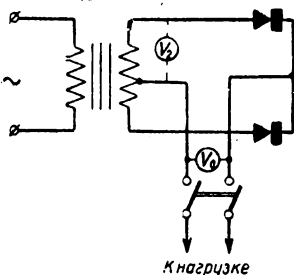


Рис. 211. Принципиальная схема двухполупериодного выпрямителя с выведенной средней точкой обмотки трансформатора.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены техническая характеристика столбика, паспортные данные измерительных приборов, составленные схемы, осциллограммы выпрямленного напряжения.

Контрольные вопросы

1. Чем объясняется эффект односторонней проводимости полупроводниковых вентиляей?
2. Как работает двухполупериодный выпрямитель со средней точкой?

ТЕМА. «ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ»

Работа № 12. Сборка и испытание однокаскадного электронного усилителя

Цель работы

Собрать цепь однокаскадного электронного усилителя и исследовать ее. Определить опытным путем коэффициент усиления однокаскадного усилителя. Установить влияние сопротивления в цепи анода на коэффициент усиления.

Оборудование

1. Электронная лампа типа 6С5, укрепленная на панели (е выведенными под зажимы концами).
2. Блок сопротивлений (10; 30; 50 *ком*) с переключателем и зажимами для включения.
3. Ползунковый реостат на 500—1000 *ом*.
4. Переменное сопротивление на 0,5—1 *мом*, укрепленное на панели с зажимами для его включения в цепь.
5. Вольтметр переменного тока на 15 *в*.
6. Миллиамперметр на 50 *ма*.
7. Источник постоянного тока на 250 *в*.
8. Источник постоянного тока на 12 *в*.
9. Источник переменного тока на 6,3 *в*.
10. Съемные знаки (А, К, Н, Н, С,) для маркировки ламповой панели.
11. Двухполюсные или однополюсные рубильники.
- 12*. Электронный осциллограф.
13. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Используя схему цоколевки лампы, определить маркировку зажимов ламповой панели и укрепить у зажимов соответствующие знаки.

2. Руководствуясь рисунком 212, собрать однокаскадный электронный усилитель, предусмотрев включение источников

питания через двухполюсные рубильники. Собранныю цепь дать проверить учителю.

3. Установить ползунок переключателя сопротивлений в цепи анода на сопротивление $R_{a1} = 10 \text{ ком}$ и, перемещая ползунок потенциометра Π_1 , подать на сетку лампы напряжение примерно $U_{c1} = 5 \text{ в}$. Включить источники питания.

4. Измерить величину анодного тока I_{a1} в сопротивлении R_{a1} .

5. Снизить напряжение на сетке до U_{c2} и определить изменение напряжения на сетке

$$\Delta U_c = U_{c1} - U_{c2}.$$

6. Измерить ток в цепи анода I_{a2} при новом значении напряжения на сетке (U_{c2}) и определить изменение анодного тока

$$\Delta I_a = I_{a1} - I_{a2}.$$

7. Определить изменение падения напряжения ΔU_a на сопротивлении R_{a1}

$$\Delta U_a = \Delta I_a R_{a1}.$$

8. Определить коэффициент усиления каскада по напряжению, то есть отношение приращения напряжения на анодном сопротивлении к приращению напряжения на сетке

$$K_U = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}.$$

9. Повторить все измерения для сопротивлений $R_{a2} = 30 \text{ ком}$; $R_{a3} = 50 \text{ ком}$ и результаты записать в таблицу.

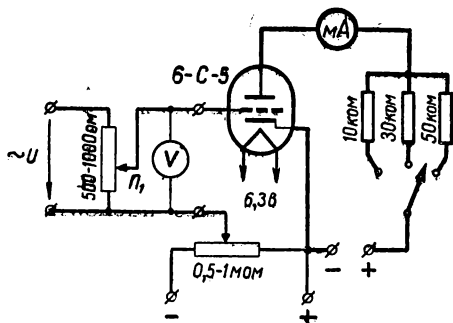


Рис. 212. Схема однокаскадного лампового усилителя.

№ наблюдения	Анодное сопротивление ком	Измеряемые величины				Вычисляемые величины			
		U_{c1} в	U_{c2} в	I_{a1} ма	I_{a2} ма	ΔU_c в	ΔI_a ма	ΔU_a в	K_U в
1	10								
2	30								
3	50								

На основании полученных результатов сделать вывод о зависимости коэффициента усиления каскада от величины сопротивления в цепи анода.

10*. Включить осциллограф сначала на входные, а затем на выходные зажимы (при неизменном коэффициенте усиления осциллографа) и сравнить амплитуды подаваемого напряжения и напряжения на анодном сопротивлении. С помощью осциллографа также проследить за влиянием смещения на сетке лампы и амплитуды подаваемого сигнала на характер усиленного сигнала. Наблюдаемые картины зарисовать.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены схемы цоколевки триода, схема исследуемого усилителя, таблица измерений и вычислений, а также паспортные данные приборов, использованных в работе.

Контрольные вопросы

1. Зачем на сетку лампы подают постоянный отрицательный потенциал?
2. Что называется коэффициентом усиления каскада?
3. Как происходит перераспределение напряжения анодного источника питания между лампой и сопротивлением нагрузки с ростом анодного тока, вызванного изменением потенциала на управляющей сетке?

Работа № 13. Сборка и испытание электронного реле

Цель работы

Ознакомиться с принципом действия электронного реле и уяснить назначение отдельных элементов схемы. Получить навыки сборки электронного реле.

Оборудование

а) Детали электронного реле:

1. Электронная лампа типа 6С5, укрепленная на панели (с выведенными под зажимы концами).
2. Фотоэлемент ЦГ-4, укрепленный на панели, имеющей зажимы для включения фотоэлемента.
3. Сопротивления разные, примерно на 1, 2, 3 *мом* с припаянными к ним концами проводов длиной по 100—120 *мм*.
4. Переменное сопротивление со шкалой (самодельной) порядка 50 *ком*.
5. Сопротивления на 10; 20; 30; 40; 50 *ком* с припаянными к ним концами проводов длиной по 100—120 *мм*.
6. Электромагнитное реле с током срабатывания до 6 *ма* и одной парой контактов. Реле должно быть укреплено на панели, содержащей зажимы для его включения.
7. Конденсатор бумажный емкостью около 2 *мф*. Конденсатор должен иметь зажимы для включения.

8. Источник света для освещения фотоэлемента.
 9. Авометр (или тестер).
 10. Однополюсный ключ или кнопка для звонка.
 11. Съемные знаки (*A*, *K*, *H*, *H*, *C*) для маркировки зажимов ламповой панели.
 12. Рубильники однополюсные или двухполюсные.
 13. Соединительные провода.
- б) Детали исполнительной цепи:
1. Электрическая лампа (или звонок) мощностью до 20 *вт* на подставке с зажимами для ее включения.
 2. Источник питания лампы (звонка).
 3. Соединительные провода.

Предварительные сведения

Схема фотореле, используемого в данной работе, дана на рисунке 213. Поясним принцип ее действия. При включенных источниках питания и разомкнутых гнездах (*a*, *b*) фотоэлемента потенциал сетки лампы будет равен потенциалу катода, так как они соединены сопротивлением, в котором нет тока; лампа открыта. Анодный ток лампы будет иметь наибольшее значение. Если анодный ток больше тока срабатывания электромагнитного реле, то якорь электромагнитного реле притянется и контакты исполнительной цепи замкнутся, вызвав включение лампы (звонка).

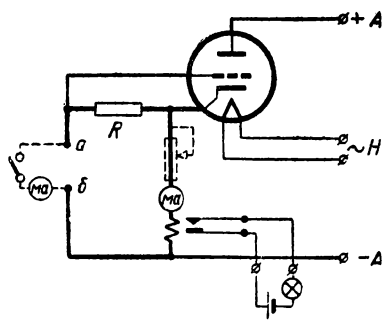


Рис. 213. Схема электронного фотореле.

При замыкании гнезд *a* и *b* в сопротивлении установится постоянный ток, направленный от катода лампы к зажиму *a*. Ток в сопротивлении *R* создаст падение напряжения IR , и на сетке возникнет отрицательный потенциал.

Появление на сетке лампы отрицательного потенциала вызовет уменьшение анодного тока лампы, а следовательно, и тока в обмотке электромагнитного реле. Контакты реле разомкнутся и исполнительная цепь будет отключена.

При размыкании гнезд *a* и *b* ток в сопротивлении *R* прекращается и отрицательный потенциал на сетке исчезает. Анодный ток снова возрастет, вызывая срабатывание реле. Таким образом, управление исполнительной цепью сводится к замыканию и размыканию промежутка *a — b*.

Замыкание гнезд *a — b* может быть произведено и фотоэлементом. Для этой цели в них следует вставить фотоэлемент, ко-

торый при освещении и затемнении будет выполнять роль периодически замыкаемого и размыкаемого ключа в цепи управления.

Может случиться (в зависимости от величины сопротивления обмотки электромагнитного реле), что при отрицательном потенциале сетки уменьшение анодного тока не вызовет отпускания якоря электромагнитного реле, так как анодный ток будет превышать ток отпускания электромагнитного реле. В этом случае последовательно с обмоткой электромагнитного реле включают переменное сопротивление (на схеме показано пунктиром). Изменяя величину переменного сопротивления, добиваются четкого срабатывания электромагнитного реле при замыкании и размыкании промежутка $a — б$. Отметив величину дополнительно введенного сопротивления, целесообразно заменить его наиболее подходящим постоянным сопротивлением из прилагаемого набора сопротивления. Полезной может оказаться и замена сопротивления R в цепи сетки.

Порядок выполнения работы

1. Используя схему цоколевки лампы, определить маркировку ее выводов и укрепить у зажимов ламповой панели соответствующие знаки.

2. Руководствуясь рисунком 213, собрать электронное реле, предусмотрев включение источников питания через рубильники. Собранную цепь дать проверить учителю.

3. Включить источники питания. При разомкнутых гнездах $a — б$ якорь электромагнита должен притянуться и замкнуть контакты исполнительной цепи. Измерить величину тока в обмотке электромагнита и сравнить ее с током срабатывания электромагнитного реле. Замкнуть гнезда $a — б$ ключом. Снова измерить величину тока и сравнить ее с током отпускания электромагнитного реле. Если при замыкании гнезд $a — б$ электромагнитное реле не будет размыкать исполнительной цепи, то произвести регулировку реле в соответствии с приведенным выше указанием.

4. Измерив ток в обмотке электромагнитного реле при его срабатывании, переключить миллиамперметр в цепь управления и измерить в ней ток.

5. Вставить фотоэлемент в гнезда a и $б$ (с соблюдением полярности) и, периодически освещая его, добиться срабатывания реле от импульсов света.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены схема цоколевки лампы, схема электронного реле, схема фотореле и величины токов срабатывания и отпускания реле.

Контрольные вопросы

1. Каков принцип действия трехэлектродной лампы?
2. Какое назначение имеет сопротивление R в цепи электронного реле?
3. Какое назначение имеет сопротивление, включаемое последовательно с обмоткой электромагнитного реле?

Работа № 14. Испытание токовой защиты с выдержкой времени

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией и принципом действия реле различных типов. Приобрести навыки сборки схемы токовой защиты.

Оборудование

1. Реле максимального тока на предельный ток до 2—5 а.
2. Реле времени с выдержкой времени до 5 сек.
3. Промежуточное реле на ток до 2—5 а.
4. Амперметр переменного тока с верхним пределом измерения 5—10 а.
5. Реостат ламповый из 4—5 ламп мощностью 50—100 вт каждая.
6. Реостат ползунковый сопротивлением 150—200 ом.
7. Источник постоянного тока на 4,5 в (батарея от карманного фонаря).
8. Лампочка на 4,5 в, укрепленная на подставке с зажимами для включения.
9. Источник постоянного напряжения на 110 в.
10. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Записать типы и паспортные данные реле максимального тока, времени и промежуточного реле.
2. Открыть каждое реле и ознакомиться с их конструкцией:
 - а) найти контакты цепи управления и проследить их соединение с зажимами реле;
 - б) найти контакты главной цепи и также проследить их соединение с зажимами реле.
3. Ознакомиться со способом регулировки реле максимального тока и реле времени.
4. Руководствуясь рисунком 214, собрать цепь для исследования реле максимального тока. Собранную цепь дать проверить учителю.
5. Плавнo увеличивая нагрузку, следить за показаниями амперметра и отметить величину тока $I_{ср\text{аб}}$, при которой реле

срабатывает и включается лампочка. После срабатывания реле максимального тока плавно уменьшать нагрузку и отметить величину тока, при котором реле возвращается в исходное состояние (лампочка гаснет), то есть величину тока возврата $I_{\text{возв}}$ (или, что то же — тока отпущения).

Найти коэффициент возврата $K_v = \frac{I_{\text{возв}}}{I_{\text{сраб}}}$, который должен быть не ниже 0,85.

6. Собрать в соответствии с рисунком 215 цепь токовой защиты и дать проверить ее учителю.

7. Включить цепь и, плавно увеличивая нагрузку, добиться срабатывания реле максимального тока.

О срабатывании максимального реле следует судить по характерному звуку при замыкании контактов. После срабатывания максимального реле немедленно уменьшить нагрузку и убедиться в том, что при кратковременных перегрузках не про-

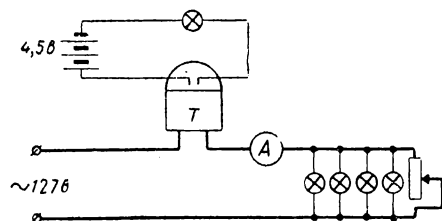


Рис. 214. Схема испытания реле максимального тока.

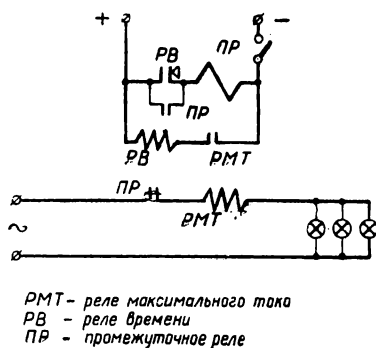


Рис. 215. Схема токовой защиты двухпроводниковой линии от длительных перегрузок.

исходит отключение источника (если время перегрузки остается в пределах срабатывания реле времени).

Создать длительную перегрузку и проследить, как срабатывают все реле, отключая нагрузку от источника питания.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены паспортные данные реле и приборов, использованных в работе, а также схема цепей защиты и результаты измерений.

Контрольные вопросы

1. Как устроено реле максимального тока?
2. Как устроено реле времени?
3. Почему ток срабатывания реле максимального тока больше тока возврата?

Работа № 15. Ознакомление с магнитным пускателем

Цель работы

Ознакомиться с конструкцией магнитного пускателя и его электрическими цепями. Приобрести навыки пуска асинхронного двигателя с помощью магнитного пускателя.

Оборудование

1. Магнитный пускатель.
2. Комплект кнопок управления (кнопочная станция).
3. Трехфазный асинхронный двигатель с тормозным приспособлением.
4. Амперметр переменного тока с верхним пределом измерения, превышающим номинальный ток двигателя в 1,5—2 раза.
5. Секундомер.
6. Вольтметр переменного тока для измерения линейного напряжения трехфазной сети.
7. Реостат ползунковый 75—150 ом, 2,5—1,5 а.
8. Соединительные провода.

Порядок выполнения работы

1. Записать паспортные данные магнитного пускателя.
2. Ознакомиться с конструкцией магнитного пускателя и рассмотреть:
 - а) главные контакты трехполюсного контактора,
 - б) блок-контакты,
 - в) электромагнит контактора,
 - г) нагревательные элементы теплового реле,
 - д) биметаллические пластинки тепловых реле.
3. Найти и проследить главную цепь и цепь управления.
4. Ознакомиться с устройством кнопочной станции.
5. Зарисовать эскиз конструкции теплового реле.
6. Для определения напряжений ($U_{\text{вкл}}$, $U_{\text{откл}}$), при которых контактор магнитного пускателя включается и отключается, собрать цепь в соответствии с рисунком 216 и дать проверить ее учителю.

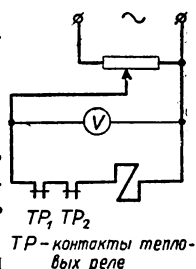


Рис. 216. Схема испытания электромагнита контактора пускателя.

7. Плавное перемещение ползунка потенциометра, определить напряжения включения и отключения магнитного пускателя.

8. Изменить схему так, чтобы она была пригодна для пуска двигателя (см. рис. 174). Обмотки двигателя должны быть включены звездой или треугольником в зависимости от напряжения сети. В линейный провод включить амперметр и преду-

смотреть его защиту от пускового тока однополюсным рубильником (чтобы закоротить цепь амперметра).

Нарисованную схему показать учителю.

9. По составленной схеме собрать электрическую цепь и после проверки ее учителем включить двигатель. Сделать несколько повторных включений и отключений двигателя.

10. Создать такую нагрузку на двигатель, чтобы линейный ток был равен номинальному току двигателя. Если нагревательный элемент теплового реле подобран правильно, то пускатель не будет отключать двигатель. Создавая нагрузку на двигатель больше номинальной, отмечать время срабатывания теплового реле по отключению двигателя. Произвести 5—6 измерений времени срабатывания теплового реле для различных значений нагрузки на двигатель. Повторно включать тепловое реле можно только после его охлаждения. Результаты записать в таблицу:

I, a						
$t, сек$						

По результатам измерений построить график зависимости времени работы двигателя с перегрузкой от тока в линейных проводах.

Содержание отчета

В отчете должны быть представлены паспортные данные магнитного пускателя и измерительных приборов, использованных в работе, а также: схемы испытаний, таблица и график, предусмотренные заданием.

Контрольные вопросы

1. В чем преимущество магнитного пускателя перед рубильником?
2. Для чего в магнитном пускателе ставят тепловые реле?
3. Какое назначение имеют блокировочные контакты?
4. Чем конструктивно отличается кнопка «Пуск» от кнопки «Стоп»?
5. Почему магнитный пускатель отключает двигатель при уменьшении напряжения питающей сети?

Международная система единиц «СИ»

С 1 января 1963 г. введен новый Государственный стандарт на единицы измерения «Международная система единиц» (ГОСТ 9867—61). Система сокращенно обозначается русскими буквами СИ (или латинскими SI).









В электротехнической практике для измерения электрических и магнитных величин система СИ использует наиболее распространенную практическую систему единиц МКСА (метр, килограмм, секунда, ампер).

В настоящее время в учебной, научной и технической литературе встречаются и другие системы единиц. Для перехода от одной системы единиц к другой можно пользоваться приведенной ниже таблицей. В ней даются лишь важнейшие единицы, встречающиеся в учебнике.

Наименование величин	Единица измерения	Сокращен. обозначения		Содержит единиц системы			
		русские	латинск. и греческ.	СГС	МКГСС	СГСМ	СГСМ и гауссовой
Сила	ньютон	<i>н</i>	<i>N</i>	$10^5 \frac{дин}{сек}$	$0,102 \frac{кг}{сек}$	—	—
Скорость	метр в секунду	$\frac{м}{сек}$	$\frac{m}{s}$	$10^2 \frac{см}{сек}$	$1 \frac{м}{сек}$	—	—
Работа, энергия, кол-во теплоты	джоуль	<i>дж</i>	<i>J</i>	$10^7 \frac{эрг}{сек}$	$0,102 \frac{кгм}{сек}$	—	—
Мощность	ватт	<i>вт</i>	<i>W</i>	$10^7 \frac{эрг}{сек}$	$0,102 \frac{кгм}{сек}$	—	—
Частота	герц	<i>гц</i>	<i>Hz</i>	$1 \frac{гц}{сек}$	$1 \frac{гц}{сек}$	—	—
Ток	ампер	<i>а</i>	<i>A</i>	—	—	10^{-1}	—
Плотность тока	ампер на кв. метр	$\frac{а}{м^2}$	$\frac{A}{m}$	—	—	10^{-5}	—
Электрическое напряжение, э. д. с.	вольт	<i>в</i>	<i>V</i>	—	—	10^8	—
Напряженность электрического поля	вольт на метр	$\frac{в}{м}$	$\frac{V}{m}$	—	—	10^6	—
Электрическое сопротивление	ом	<i>ом</i>	Ω	—	—	10^9	—
Электрическая емкость	фарада	<i>ф</i>	<i>F</i>	—	—	10^{-9}	—
Индуктивность	генри	<i>гн</i>	<i>H</i>	—	—	—	10^9
Магнитный поток	вебер	<i>вб</i>	<i>Wb</i>	—	—	—	10^8
Магнитная индукция	тесла	<i>тл</i>	<i>T</i>	—	—	—	(максвелл) 10^4
Напряженность магнитного поля	ампер на метр	$\frac{а}{м}$	$\frac{A}{m}$	—	—	—	(гаусс) 10^{-3}
Намагничивающая сила	ампер-виток (ампер)	<i>а</i>	<i>A</i>	—	—	—	$4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}$

Приложение II

Условные обозначения проводов, отдельных элементов машин и аппаратов на электрических схемах (ГОСТ 7624—55)

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Провод силовой цепи		Нормально закрытый контакт с выдержкой времени при закрывании	
Провод цепи управления		Нагревательный элемент теплового реле	
Катушка контактора		Нормально открытый контакт кнопки управления	
Катушка реле напряжения		Нормально закрытый контакт кнопки управления	
Катушка токового реле		Активное сопротивление нерегулируемое	
Нормально открытый силовой контакт		Активное сопротивление регулируемое	
Нормально закрытый силовой контакт		Рубильник однополюсный	
Нормально открытый контакт с выдержкой времени при закрывании		Предохранитель	
Нормально открытый контакт с выдержкой времени при открывании		Выпрямитель	
Нормально закрытый контакт с выдержкой времени при открывании		Лампа сигнальная	

Приложение III

Схемы соединения электродов ламп со штырьками

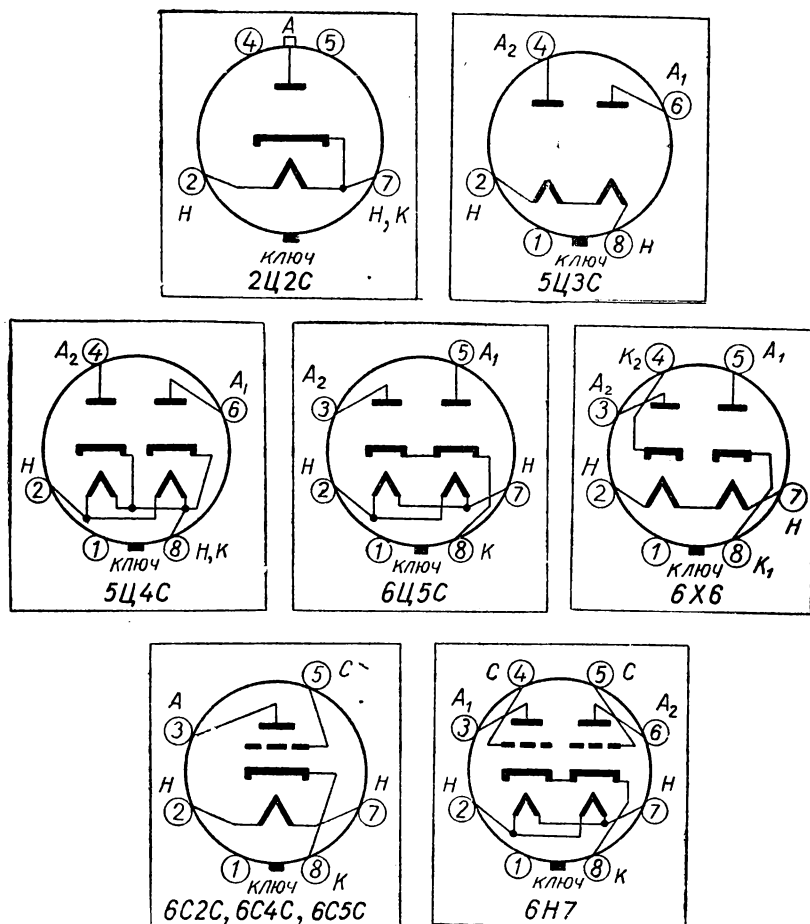












Рис. 218.

Приложение IV

Условные обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы (ГОСТ 1845—59)

Наименование		Условное обозначение на шкале прибора
Магнитоэлектрический прибор	С подвижной рамкой	
	С подвижным магнитом	
Электромагнитный прибор		
Электродинамический прибор		
Индукционный прибор		
Класс точности (например, 1,5)		1,5
Горизонтальное положение шкалы		
Вертикальное положение шкалы		
Наклонное положение шкалы под углом к горизонту, например 60°		
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например 2 кВ		
Отрицательный зажим		—
Положительный зажим		+
Генераторный зажим (для ваттметров)		

Приложение V

Условные обозначения приемно-усилительных ламп, электровакuumных приборов и кенотронов (ГОСТ 5461—50)

Условные обозначения электровакuumных приборов состоят из ряда цифр и букв.

Первая цифра указывает (округленно) напряжение накала в вольтах; первая буква обозначает вид лампы (Д—диод; Х—двойной диод; С—триод; Н—двойной триод; Ц—кенотрон); вторая цифра обозначает условный порядковый номер типа лампы; вторая буква обозначает конструктивное оформление стеклянного баллона (С — лампа с цоколем; Ж — лампа «желудь»; П — пальчиковая; А — миниатюрная, диаметром 5 мм, Б — миниатюрная, диаметром 10 мм).

Примечание. Лампы в металлическом баллоне второй буквы не имеют.

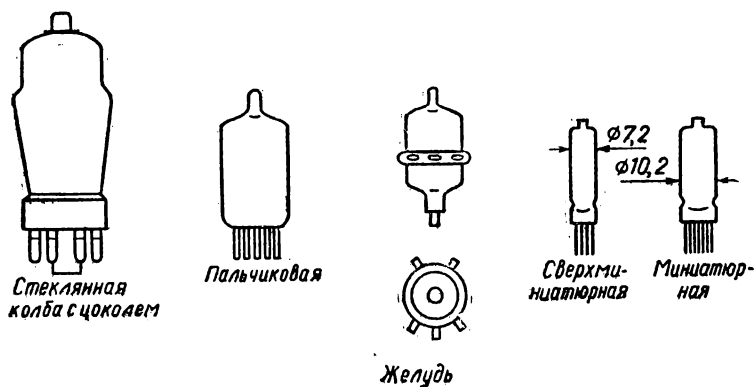


Рис. 217.

ОГЛАВЛЕНИЕ

От редакции	2
Введение	3

РАЗДЕЛ ПЕРВЫЙ

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

<i>Глава I. Электроизмерительные приборы</i>	<i>8</i>
§ 1. Основные элементы приборов	8
Назначение приборов (8). Измерительный механизм (8). Успокоитель (9).	
§ 2. Классы точности приборов	10
Погрешность показаний (10). Приведенная погрешность (11).	
§ 3. Приборы магнитоэлектрической системы	12
Устройство измерительного механизма (12). Принцип действия (13). Достоинства, недостатки и область применения (15).	
§ 4. Приборы электромагнитной системы	16
Устройство измерительного механизма (16). Принцип действия (16). Работа прибора в цепи постоянного тока (17). Работа прибора в цепи переменного тока (17). Достоинства, недостатки и область применения (20).	
§ 5. Приборы электродинамической системы	20
Устройство измерительного механизма (20). Принцип действия (21). Достоинства, недостатки и область применения (22). Упражнения и задачи (22).	
<i>Глава II. Измерение электрических величин</i>	<i>24</i>
§ 6. Погрешности измерения	24
График поправок (24). Относительная погрешность измерения (25).	
§ 7. Измерение мощности в цепи постоянного тока	26
Мощность в цепи постоянного тока (26). Измерение мощности методом амперметра и вольтметра (27).	
§ 8. Измерение мощности в цепи переменного тока	27
Мгновенная мощность (27). Активная мощность и коэффициент мощности (29). Реактивная мощность (32). Полная мощность (32). Измерение активной мощности (33). Ваттметр (33). Разметка зажимов ваттметра (34). Цена деления ваттметра (34).	
§ 9. Измерение энергии в цепях переменного тока	35
Способы учета электрической энергии (35). Принцип действия индукционного счетчика (35). Устройство индукционного счетчика (38). Погрешность счетчика (41).	
§ 10. Измерение сопротивлений	41
Способы измерения сопротивлений (41). Измерение сопротивлений омметром (42). Омметр с последовательной схемой (42). Омметр с параллельной схемой (43).	
§ 11. Измерение напряжения, тока и сопротивления универсальным прибором	44
Авометр (44). Включение авометра (44). Упражнения и задачи (45).	

РАЗДЕЛ ВТОРОЙ

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ И ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЕ ПРЕДПРИЯТИЙ

<i>Глава III. Электрические машины постоянного тока</i>	48
§ 12. Принцип устройства машин постоянного тока	48
Основные части машин (48). Машины с кольцевым якорем (48). Параллельные ветви обмотки якоря (49). Коллектор (51).	
§ 13. Принцип действия машин постоянного тока	51
Работа машины в режиме генератора (51). Работа машины в режиме двигателя (52). Свойство обратимости (53).	
§ 14. Конструкция машин постоянного тока	54
Барабанный якорь (54). Полюсы возбуждения (55). Способы соединения обмоток якоря и возбуждения (56).	
§ 15. Генераторы постоянного тока	56
Внешняя характеристика (56). Генератор независимого возбуждения (57). Генератор параллельного возбуждения (58).	
§ 16. Двигатели постоянного тока	60
Механическая характеристика (60). Двигатель независимого возбуждения (60). Двигатель последовательного возбуждения (63). Упражнения и задачи (64).	
<i>Глава IV. Трехфазные электрические цепи</i>	66
§ 17. Элементы трехфазной цепи	66
Трехфазный генератор (66). Трехфазные токоприемники (68).	
§ 18. Способы соединения фаз генератора и токоприемников	68
Несвязанная и связанная трехфазные цепи (68). Соединение фаз генератора звездой (69). Соединение фаз токоприемников звездой (70). Соединение фаз токоприемников треугольником (73). Упражнения и задачи (74).	
<i>Глава V. Трансформаторы</i>	75
§ 19. Принципы устройства и действия трансформаторов	75
Назначение трансформаторов (75). Однофазный трансформатор (76). Режим холостого хода (77). Режим нагрузки (78). Трехфазный трансформатор (79).	
§ 20. Конструкция трансформаторов	81
Конструкция сердечников и обмоток (81). Система охлаждения (82). Упражнения и задачи (83).	
<i>Глава VI. Асинхронные двигатели</i>	84
§ 21. Принципы устройства и действия асинхронных двигателей	84
Назначение асинхронных двигателей (84). Вращающееся магнитное поле (84). Принцип действия (89).	
§ 22. Основные характеристики и конструкция асинхронного двигателя	91
Соотношение скоростей поля и ротора (91). Скольжение (91). Механическая характеристика (92). Реверсирование ротора (92). Пусковой ток (93). Конструктивные элементы асинхронного двигателя (93). Упражнения и задачи (95).	
<i>Глава VII. Полупроводниковые выпрямители</i>	96
§ 23. Принцип действия полупроводниковых вентилей	96
Общие сведения о выпрямителях (96). Собственная проводимость (96). Прямая проводимость (97). Запирающий слой (98). Режим прямого тока (99). Режим обратного тока (99).	
§ 24. Устройство полупроводниковых вентилей	101
Меднозакисный вентиль (101). Селеновый вентиль (102). Германиевый вентиль (103).	

§ 25. Схемы полупроводниковых выпрямителей	104
Полупроводниковые выпрямители (104). Однополупериодный выпрямитель (104). Двухполупериодные выпрямители (106). Упражнения и задачи (108).	
<i>Глава VIII. Производство и передача электрической энергии</i>	<i>108</i>
§ 26. Электрические станции	108
Типы электрических станций (108). Тепловые электрические станции (110). Атомные электростанции (111). Гидроэлектрические станции (111).	
§ 27. Энергетические системы	112
Передача электрической энергии (112). Совместная работа электростанций (115).	
§ 28. Коэффициент мощности предприятий и его технико-экономическое значение	116
Коэффициент мощности предприятия (116). Последствия низкого коэффициента мощности предприятия (117). Способы повышения коэффициента мощности (118). Упражнения и задачи (119).	
РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ	
ОСНОВЫ АВТОМАТИКИ	
<i>Глава IX. Системы устройств автоматики</i>	<i>121</i>
§ 29. Управление машинами и контроль за их работой	121
Работа машин под контролем и управлением человека (121). Работа машин под контролем и управлением автоматических устройств (122).	
§ 30. Автоматы	122
Машины-автоматы (122). Приборы-автоматы (123).	
§ 31. Автоматика в современном производстве	124
Разновидности автоматических устройств и их назначение (124). Определение понятия «автоматика» (124). Развитие автоматики (125).	
<i>Глава X. Элементы систем автоматики</i>	<i>125</i>
§ 32. Назначение устройств, применяемых в автоматике	125
§ 33. Электрические датчики	126
Основное свойство датчиков (126). Назначение датчиков (127). Генераторные датчики (127). Параметрические датчики (128).	
§ 34. Механические чувствительные элементы	131
Основное свойство механических чувствительных элементов (131). Воздействие чувствительного элемента на датчик с подвижной частью (131). Воздействие чувствительного элемента на датчик без подвижной части (133).	
§ 35. Усилители	134
Назначение усилителей (134). Составные части усилителя (134). Триод (135). Ламповый усилитель (137). Транзистор (139). Полупроводниковый усилитель (140).	
§ 36. Электрические реле	141
Назначение реле (141). Электромагнитное реле с поворотным якорем (142). Электронное реле (143). Поляризованное реле (144). Упражнения и задачи (146).	
<i>Глава XI. Автоматический контроль</i>	<i>146</i>
§ 37. Системы устройств автоматического контроля	146
Назначение и классификация автоматов контроля (146). Три вида контроля (147).	
§ 38. Электроизмерительные системы автоматики	148
Электрические измерения неэлектрических величин (148). Дистанционная передача показаний приборов (149).	

§ 39. Автоматический контроль размеров изделий	151
Контрольно-сортировочные автоматы (151). Электроконтактный сортировщик (152).	
§ 40. Автоматический контроль количества изделий	153
Счетные автоматы (153). Фотоэлектронный счетчик (154).	
Глава XII. Автоматическое управление	154
§ 41. Способы управления машинами	154
Назначение устройств управления (154). Неавтоматическое управление (155). Полуавтоматическое управление (155). Автоматическое управление (156).	
§ 42. Аппаратура управления электроприводами	156
Определение понятия «электропривод» (156). Электромеханическое реле времени (157). Тепловое реле (158). Реле максимального тока (159). Контакттор (160).	
§ 43. Релейно-контакторное управление электродвигателями	161
Управление пуском двигателя постоянного тока (161). Магнитный пускатель (162). Дистанционное управление асинхронным двигателем (163). Упражнения (165).	
Глава XIII. Автоматическое регулирование	167
§ 44. Объекты и параметры регулирования	167
§ 45. Общие принципы регулирования	167
Неавтоматическое регулирование (167). Системы автоматического регулирования (168).	
§ 46. Автоматические регуляторы	170
Стабилизирующий регулятор (170). Программный регулятор (171). Следящий регулятор (173).	

РАЗДЕЛ ЧЕТВЕРТЫЙ

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ И ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Глава XIV. Техника безопасности при работе с электрическими установками	174
§ 47. Опасность поражения электрическим током	174
Действие электрического тока на человека (174). Величина поражающего тока (174).	
§ 48. Источники опасности поражения электрическим током	175
Особенности эксплуатации электрических установок (175). Опасность прикосновения к токоведущим частям (175). Замыкание на землю (178). Напряжение относительно земли (179). Шаговое напряжение (179). Замыкание на корпус (180). Напряжение прикосновения (181). Опасность остающегося заряда (181).	
§ 49. Защита от поражения электрическим током	182
Защита от прикосновения к токоведущим частям (182). Заземление и зануление (182). Защитные средства (183).	
§ 50. Оказание первой помощи при поражении электрическим током	184
Освобождение пострадавшего от действия тока (184). Искусственное дыхание (186).	
§ 51. Правила техники безопасности при работах в электротехнической лаборатории школы	187
Глава XV. Лабораторные работы	188
Тема «Основы электроизмерительной техники»	188
Работа № 1, а. Проверка вольтметра методом сравнения	188
Работа № 1, б. Проверка амперметра методом сравнения	190
Работа № 2. Измерение мощности ваттметром	192
Работа № 3. Измерение сопротивлений омметром	193
Работа № 4. Проверка однофазного счетчика	195

Тема «Электрооборудование и электроснабжение предприятий»	198
Работа № 5. Определение коэффициента мощности	198
Работа № 6. Испытание генератора постоянного тока параллельного возбуждения	200
Работа № 7, а. Испытание двигателя постоянного тока параллельного возбуждения	203
Работа № 7, б. Испытание двигателя постоянного тока последовательного возбуждения	208
Работа № 8. Испытание однофазного трансформатора под нагрузкой	210
Работа № 9. Ознакомление с трехпроводной и четырехпроводной трехфазными цепями	212
Работа № 10, а. Пусковые свойства трехфазного асинхронного двигателя	215
Работа № 10, б. Испытание асинхронного короткозамкнутого двигателя	216
Работа № 11. Ознакомление с полупроводниковым выпрямителем	219
Тема «Основы автоматики»	222
Работа № 12. Сборка и испытание однокаскадного электронного усилителя	222
Работа № 13. Сборка и испытание электронного реле	224
Работа № 14. Испытание токовой защиты с выдержкой времени	227
Работа № 15. Ознакомление с магнитным пускателем	229
Приложение I. Международная система единиц «СИ»	231
Приложение II. Условные обозначения проводов отдельных элементов машин и аппаратов на электрических схемах	232
Приложение III. Схемы соединения электродов ламп со штырьками	233
Приложение IV. Условные обозначения, наносимые на электроизмерительные приборы	234
Приложение V. Условные обозначения приемно-усилительных ламп, электровакуумных приборов и кенотронов	235

*Моя Юрьевич Анвельт, Юрий Харлампиевич Пухляков,
Михаил Алексеевич Ушаков*

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Редактор Л. А. Лисов. Обложка художника В. К. Петрова
Художественный редактор Б. Л. Николаев. Технический редактор М. Д. Козловская
Корректоры В. А. Глебова и Р. К. Куркина

Подписано к печати с матриц 25/І 1964 г. 60×90¹/₁₆. Печ. л. 15.
Уч.-изд. л. 14,33. Тираж 166 тыс. экз. Заказ № 6666.

Издательство «Просвещение» Государственного Комитета Совета Министров РСФСР
по печати. Москва И-18, 3-й проезд Марьиной рощи, 41.

Отпечатано с матриц типографии № 2 им. Евг. Соколовой в типографии изд-ва
«Горьковская правда», г. Горький, ул. Фигнер, 32.

Цена без переплета 19 к., переплет бум. 7 к., коленкор. 15 к.

Цена 26 коп.