

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

Казахский национальный технический университет
имени К.И. Сатпаева

А.П. Кругликов

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
Учебное пособие для рабочих профессий

Рекомендовано Научно-методическим советом университета
в качестве учебного пособия

Алматы 2012

УДК 621. 31(075.8)
К 84

К 84 Кругликов А.П. Электроэнергетика для рабочих профессий: Учебное пособие. – Алматы: КазНТУ, 2012. – 165 с.
Ил. 79. Табл. 15. Библиогр. – 12 назв.

ISBN 978-601-228-369-3

В учебном пособии дается систематизированное изложение вопросов, отражающих современные тенденции в подготовке рабочих профессий по электроэнергетике. Учебное пособие состоит из шести разделов. В первом разделе кратко рассмотрены основные элементы электротехники: основные понятия, определения и законы электротехники, свойства электротехнических материалов, справочные данные по диэлектрическим и проводниковым материалам, практические примеры поясняют использование справочных данных для расчета и выбора электротехнических материалов.

Второй раздел посвящен измерительным приборам и методам измерения электрических величин. Здесь дана классификация различных приборов, рассмотрены устройство и принцип их действия, приведены схемы их включения, примеры их практического использования и методы восстановления неисправных приборов.

Третий раздел посвящен электрическим машинам постоянного и переменного тока. Рассмотрены вероятные неисправности электрических машин, методы их обследования и ремонта. Методы расчета и выбора мощности двигателей при работе с различным характером нагрузки рассмотрены на практических примерах.

В последующих разделах рассмотрены силовые трансформаторы, устройства коммутации и защиты. Отдельно рассмотрено низковольтное и высоковольтное коммутационное оборудование. На примерах графического изображения различных аппаратов показаны их устройство, принцип действия, достоинства и недостатки, вероятные неисправности и методы их устранения.

Предназначено для бакалавров, обучающихся по специальностям 050718 “Электроэнергетика”, а также может быть полезно для подготовки рабочих профессий в учебных центрах

УДК 621. 31(075.8)

Рецензенты:

Столповских И.Н., д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Транспортные и горные машины»

Шевцова Е.Я., директор Учебного центра по подготовке рабочих профессий АлауМунайгаз.

Ваганов Р.В., канд. техн. наук, вед. науч. сотр. Института горного дела

Печатается по плану издания Министерства образования и науки
Республики Казахстан на 2012 год

ISBN 978-601-228-369-3

© Кругликов А.П., 2012
© КазНТУ, 2012

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время обучение студентов рабочим профессиям проводится во многих высших учебных заведениях. Получение студентами практических знаний, умений, навыков и опыта работы по избранной специальности в начальный период обучения в вузе дает возможность:

- на производственных практиках работать по избранной специальности;
- более эффективно проводить лабораторные занятия.

Предлагаемое учебное пособие состоит из шести разделов.

В первом разделе кратко рассмотрены основные элементы электротехники: приведены основные понятия, определения и законы электротехники, рассмотрены свойства электротехнических материалов, приведены справочные данные по диэлектрическим и проводниковым материалам, практические примеры поясняют использование справочных данных для расчета и выбора электротехнических материалов.

Второй раздел посвящен измерительным приборам и методам измерения электрических величин. Здесь дана классификация различных приборов, рассмотрены устройство и принцип их действия, приведены схемы их включения, примеры их практического использования и методы восстановления неисправных приборов.

Третий раздел посвящен электрическим машинам постоянного и переменного тока. Основное внимание уделено устройству, принципам действия, электромеханическим и регулировочным свойствам электрических двигателей и генераторов. Рассмотрены вероятные неисправности электрических машин, методы их обследования и ремонта; методы расчета и выбора мощности двигателей при работе с различным характером нагрузки рассмотрены на практических примерах.

В последующих разделах рассмотрены силовые трансформаторы, устройства коммутации и защиты. Отдельно рассмотрено низковольтное и высоковольтное коммутационное оборудование. На примерах графического изображения различных аппаратов показаны их: устройство, принцип действия, достоинства и недостатки, вероятные неисправности и методы их устранения.

В учебном пособии рассмотрены наряду с действующим оборудованием, и новые перспективные разработки, еще не получившие широкого распространения.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ИЗ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

1.1. Основные понятия и определения [1,2]

Электрический ток. Электрическим током называется движение электрических зарядов в веществе или в вакууме под воздействием электрического поля. Для количественной оценки электрического тока служит понятие **силы тока** – количество электричества q , протекающее через поперечное сечение проводника в единицу времени. Ток в проводнике равен 1 А, если через его поперечное сечение протекает за 1 с электрический заряд, равный одному кулону (Кл). Более мелкими единицами тока являются миллиампер ($1 \text{ мА} = 10^{-3} \text{ А}$) и микроампер ($1 \text{ мкА} = 10^{-6} \text{ А}$).

Различают два вида токов: 1) *постоянный*; 2) *переменный*. Постоянным называется ток, который может изменяться по величине, но течет в одном направлении. Переменным называется ток, который периодически изменяется как по величине, так и по направлению.

Переменный ток подразделяется на синусоидальный и несинусоидальный. Синусоидальным называется ток, изменяющийся по закону

$$I = I_m \sin \omega t, \quad (1.1)$$

где I_m – амплитуда (наибольшее значение тока),

ω – угловая частота, $\omega = 2 \pi f$.

Скорость изменения переменного тока характеризуется его частотой, определяемой числом колебаний в секунду. Частота обозначается буквой f и измеряется в герцах (Гц). При частоте 50 Гц происходит 50 колебаний в секунду.

Плотность тока. Плотностью электрического тока j называют величину, равную отношению силы тока I к площади поперечного сечения проводника S , при условии, что ток равномерно распределяется по сечению проводника $j = I/S$. Единицей плотности тока является ампер на квадратный миллиметр (А/мм^2).

Электродвижущая сила (ЭДС). В процессе преобразования одного из видов энергии в электрическую в преобразователе возникает ЭДС, которая способна производить работу по перемещению электрических зарядов. ЭДС измеряется в вольтах (В) и обозначается бу-

квой E или e . Электрическая цепь, подключенная к источнику ЭДС, оказывается под воздействием электрического поля.

Электрическое напряжение – это величина, численно равная работе по перенесению электрических зарядов между двумя точками. Напряжение, как и ЭДС, измеряется в вольтах (В).

Сопротивление. Сопротивление – способность элемента (резистора проводника и др.) препятствовать прохождению электрического тока.

Сопротивление в общем случае, зависит от материала элемента, его размеров, температуры, частоты тока и измеряется в омах (Ом). Различают *активное* (омическое), *реактивное* и *полное* сопротивления. Они обозначаются, соответственно r , x , z . Применяются и прописные буквы R , X , Z .

Активное сопротивление проводника определяется по формуле

$$R = \rho L/S, \quad (1.2)$$

где L – длина проводника;

S – сечение проводника;

ρ – удельное сопротивление материала проводника, Ом · м.

Сопротивление определяют при температуре 20 °С. Единицами сопротивления являются: Ом, кОм (1 кОм = 1000 Ом), мОм (1000 кОм).

Индуктивное сопротивление. Это сопротивление возникает в элементах при создании в них переменного или изменяющего магнитного поля. Величина этого сопротивления зависит от частоты тока, магнитных свойств, конфигурации и размеров. Индуктивное сопротивление обозначается X_L

$$X_L = 2\pi fL = \omega L,$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с; f – частота, Гц. Единицей измерения индуктивности является (Генри).

Резистор – элемент, обладающий определенным сопротивлением.

Электрической цепью называется в общем случае совокупность устройств (элементов), предназначенных для прохождения электрического тока. Электрические цепи могут быть неразветвленными и сложными (разветвленными). Различные варианты соединения элементов приведены на рис 1.1.

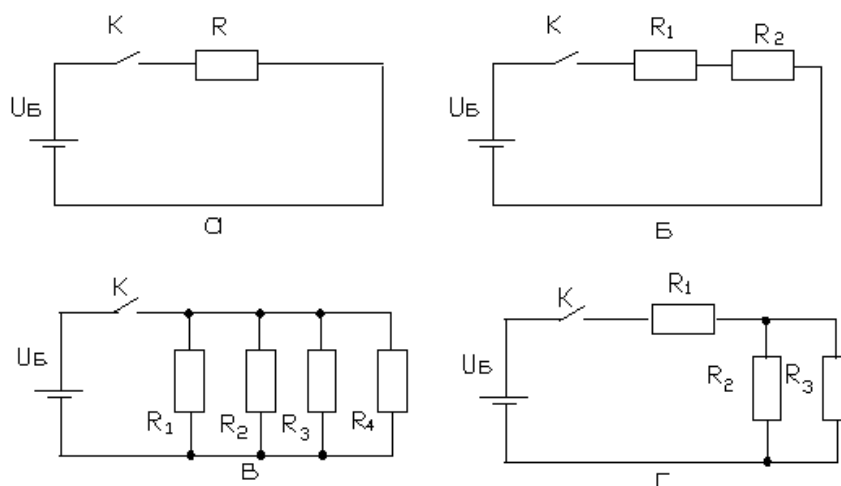


Рис. 1.1. Схемы соединения элементов:
а – простейшая; б – последовательное; в – параллельное; г – смешанное

Элементом электрической цепи является каждое устройство, включенное в электрическую цепь. Обязательными элементами электрической цепи являются: источник электрической энергии (батарея и др.), приемник (электрическая лампа и др.) и соединительные провода. Кроме обязательных элементов в электрическую цепь могут входить резисторы, коммутационная, защитная и измерительная аппаратура.

Электрической схемой называется графическое изображение электрической цепи, показывающее порядок и характер соединения ее элементов, и отражающее свойство электрической цепи. Простейшая электрическая схема приведена на рис. 1.1, а. Она состоит из источника (батарея), выключателя К, приемника R и соединительных проводов.

1.2. Мощность электрического тока

Мощность – это работа источника электроэнергии по перемещению заряда, совершаемая в единицу времени: $P = A/t$; $P = dA/dt$. Для постоянного тока мощность источника $P_H = EI$, потребителя $P = I^2 R = U^2/R$. Единица мощности – ватт (Вт). $P = 1\text{В} \cdot 1\text{А} = 1\text{Вт}$.

Для количественной оценки электроэнергетических процессов, происходящих в цепях переменного тока, используют такие понятия, как активная, реактивная и полная мощность.

P – активная мощность используется в виде преобразованной электрической энергии в другие виды: световую (осветительные лам-

пы), тепловую (нагревательные приборы), механическую (электрические двигатели и др.)

Активная мощность измеряется в ваттах (Вт). В однофазных цепях переменного тока $P = UI \cos \varphi$, в трехфазных – $P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$.

Q – реактивная мощность. Реактивная мощность не определяет совершаемой работы, ни передаваемой энергии за единицу времени, т. е. является условным понятием. И в то же время реактивная мощность или реактивная энергия оказывает большое влияние на энергетические показатели энергосистемы. Реактивная мощность возникает при наличии в электрической цепи таких потребителей, которые могут накапливать и возвращать электрическую энергию. Основными потребителями такой энергии являются устройства, содержащие обмотки с сердечниками из электротехнической стали (электродвигатели переменного тока, электрические аппараты и др.). Реактивная мощность измеряется в реактивных вольт-амперах (вар). В однофазных цепях переменного тока $Q = UI \sin \varphi$, в трехфазных – $Q = 3U_{\phi} I_{\phi} \sin \varphi$, $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ – полная мощность.

1.3. Электромагнетизм

При протекании электрического тока по проводнику возникает магнитное поле. Магнитное поле – один из видов материи, обладающей определенной энергией. Оно может превращаться в другие виды энергии, подчиняясь основному закону природы – закону сохранения энергии. Для обозначения направления действия магнитного поля пользуются так называемыми магнитными силовыми линиями.

Магнитный поток (Φ) характеризуется количеством силовых линий, проходящих через данную площадку S . Магнитный поток зависит от среды, в которой он действует, тока в проводнике (катушке) и формы проводника. Единицей магнитного потока является вебер (Вб).

Магнитная индукция характеризует плотность (интенсивность) магнитного поля в данной точке и определяется числом силовых линий, проходящих через единицу площади поверхности, расположенной нормально к полю: $B = \Phi/S$. Единица магнитной индукции – тесла (Тл).

Напряженность магнитного поля (H) характеризует интенсивность поля без учета влияния среды, т. е. учитывает лишь ток и фор-

му проводника. Измеряется в амперах на метр (А/м). Между магнитной индукцией и напряженностью существует зависимость $B = \mu_a H$, где μ_a – абсолютная магнитная проницаемость.

Электромагнитной индукцией называют явление наведения ЭДС в проводнике, пересекающем магнитные линии поля. Это объясняется тем, что при движении проводника на каждую заряженную частицу действует электромагнитная сила поля. Под действием этих сил происходит перемещение зарядов, возникает ЭДС электромагнитной индукции.

Явление электромагнетизма используется в технике: в генераторах, двигателях, трансформаторах и других устройствах. Широко применяют также электромагниты, конструктивно представляющие собой катушку с сердечником, по которой проходит ток. Под действием электромагнитного поля якорь притягивается. Электромагниты применяют в измерительных приборах, реле, магнитных пускателях и других устройствах. Особый вид электромагнитов используют для подъема грузов (грузоподъемные электромагниты). Такие электромагниты характеризуются подъемной силой $F = 4 \cdot 10^5 B^2 S$. За счет изменения силы тока электромагнита можно регулировать значение индукции, следовательно, подъемную силу электромагнита.

1.4. Диэлектрические материалы

Электроизоляционные материалы применяются для изоляции токоведущих частей электрооборудования, изоляции их от земли и заземлителей. Эти материалы подразделяются на пять групп:

- волокнистые (картон, бумага, ткани, лакоткани и др.);
- слоистые и слюдяные (текстолит, гетинакс, миканит, слюдинит, стеклотекстолит);
- керамические (электрофарфор, термokonды, тикониды, стеалит);
- жидкие диэлектрики (минеральные и растительные масла, синтетические жидкости);
- электроизоляционные лаки и эмали (лаки и краски масляные, кремний-органические, глифталево-масляные и др.).

В таблицах 1.1–1.3 приведены характеристики некоторых материалов, широко используемых при производстве, эксплуатации и ремонте электрических изделий и установок.

Таблица 1.1
Технические данные электроизоляционных материалов

Материал	Плотность, мГ/м ³	Удельное объемное сопротивление, Ом·м.	Электрическая проницаемость МВ/м	Диэлектрическая проницаемость	Тангенс угла диэлектрических потерь	Предельная допустимая темп., °С
Азбест	2,3–2,6	10 ⁶ –10 ¹⁰	1,5–3	–	–	450
Бакелитовая смола	1,1–1,3	10 ⁸ –10 ¹⁰	10–40	4–4,5	0,03	150
Гетинакс	1,25–1,4	10 ⁸ –10 ¹⁹	20–30	5–8	0,07–0,2	150
Лакоткань	0,9–1,2	10 ⁶ –10 ¹⁰	12–60	4–6	0,03–0,19	105
Масло транс Форматор.	0,84–0,92	10 ¹¹ –10 ¹³	15–20	2.1–2.4	0,002–0,01	95
Эпоксидная смола	1,1–1,25	10 ¹¹ –10 ¹³	16–20	3–4	0,001–0,08	110–120
Картон изоляционный	0,95–1,25	10 ⁷	8–30	1,8–2,5	–	90
Текстолит	1,3–1,8	10 ⁶ –10 ⁸	2–12	5–8	0,07	–
Фарфор	2,3–2,5	10 ¹⁰ –10 ¹²	12–28	6–10	0,02–0,2	1200
Эбонит	1,1–1,4	10 ¹⁴	12–24	2,7–3,5	0,01–0,02	50
Стекло	2,08–8,1	10 ⁶ –10 ¹⁵	10–40	3,8–16,2	10 ⁻² –10 ⁻⁴	500
Воздух	0,0012	10 ¹⁶	3–4	1	4·10 ⁻⁷	–
Мрамор	2,4–2,5	10 ⁶ –10 ¹⁰	2–5	8–10	0,005–0,01	110–200

1.5. Проводниковые материалы

Основным электрическим свойством проводниковых материалов является электропроводность. Проводники содержат большое количество свободных носителей зарядов и делятся на твердые, жидкие и газообразные. Носителями зарядов в твердых проводниках являются свободные электроны, а в жидких и газообразных ионы (положительные – катионы и отрицательные – анионы).

Технические данные проводниковых материалов из металла приведены в табл.1.2.

Таблица 1.2

Технические данные проводниковых материалов из металлов

Материал	Плотность, г/см ³	Температура плавления, °С	Удельное электрическое сопротивление, Ом·м	Температурный коэффициент, α , 1/°С	Область применения
Алюминий	2,7	660	0,028	$4 \cdot 10^{-2}$	Провода, кабели, шины
Бронза	8,3–8,9	885–1050	0,021–0,052	$4 \cdot 10^{-3}$	Контакты (кадмиевая бронза) Пружины (фосфористая бронза)
Латунь	8,4–8,7	960	0,03–0,08	$2 \cdot 10^{-3}$	Контакты, выводы
Медь	8,9	1080	0,0175–0,082	$4 \cdot 10^{-2}$	Провода, кабели, шины
Никель	8,8	1452	0,09	$6,8 \cdot 10^{-2}$	Покрытия
Олово	7,3	232	0,114–0,120	$4,4 \cdot 10^{-3}$	Припой
Свинец	11,34	327	0,217–0,222	$3,8 \cdot 10^{-3}$	Припой, плавкие вставки, предохранители, аккумуляторы, защитные оболочки кабелей
Серебро	10,8	960	0,016	$3,6 \cdot 10^{-3}$	Контакты аппаратов и приборов
Сталь	7,85	1400–1500	0,103–0,145	$62 \cdot 10^{-3}$	Шины, элементы заземления
Цинк	7,1	419	0,06	$3,9 \cdot 10^{-3}$	Покрытия
Чугун	7,2	1200	0,5	$0,9 \cdot 10^{-3}$	Резисторы в электропривод

Пример 1.1. Алюминиевый провод имеет сечение $s = 2,5 \text{ мм}^2$ и длину $L = 200 \text{ м}$. Определить электрическое сопротивление провода при его нагреве до температуры 60°С .

Решение: В табл. 1.2 находим удельное сопротивление $\rho = 0,028 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Сопротивление провода при температуре 20°С

$$r_{20} = \rho L/s = 0,028 \cdot 200 / 2,5 = 2,24 \text{ Ом.}$$

Сопротивление провода при температуре 60° С

$$r_{60} = r_{20} [1 + \alpha(t_1 - t_2)] = 2,24 [1 + 4 \cdot 10^{-2} (60 - 20)] = 2,6 \text{ Ом,}$$

где $\alpha = 4 \cdot 10^{-2}$ – температурный коэффициент (таб. 1.2).

Пример 1.2. При протекании тока по обмотке якоря после подключения двигателя к источнику питания происходит ее нагрев и повышение температуры до 75° С. До подключения двигателя к источнику питания температура обмотки составляла 22° С., сопротивление $r_{22} = 0,22$ Ом. Найти сопротивление обмотки якоря при температуре 75° С.

По таб.1.3 определяем поправочные коэффициенты для перерасчета сопротивления медных проводов.

$$r_{75} = 0,22(1 + 1,240 - 1,028) = 0,27 \text{ Ом.}$$

Таблица 1.3

Поправочные коэффициенты для пересчета сопротивления медных проводников при нагревании от 15° С

Температура, °С	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	0,940	0,944	0,948	0,952	0,956	0,960	0,964	0,908	0,972	0,976
10	0,980	0,984	0,988	0,992	0,996	1,000	1,004	1,008	1,012	1,016
20	1,020	1,024	1,028	1,032	1,036	1,040	1,044	1,048	1,052	1,056
30	1,060	1,064	1,068	1,072	1,076	1,080	1,084	1,088	1,092	1,096
40	1,100	1,104	1,108	1,112	1,116	1,120	1,124	1,128	1,132	1,136
50	1,140	1,144	1,148	1,152	1,156	1,160	1,164	1,168	1,172	1,176
60	1,180	1,184	1,188	1,192	1,196	1,200	1,204	1,208	1,212	1,216
70	1,220	1,224	1,228	1,232	1,236	1,240	1,244	1,248	1,252	1,256
80	1,260	1,264	1,268	1,272	1,276	1,280	1,284	1,288	1,292	1,296
90	1,300	1,304	1,308	1,312	1,306	1,320	1,324	1,328	1,332	1,336
100	1,340	1,344	1,348	1,352	1,356	1,360	1,364	1,368	1,372	1,376

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

2.1. Общие сведения об измерительных приборах [3]

Измерительными приборами в общем случае называются механизмы и устройства, имеющие подвижные части или элементы, расположение, форма или состояние которых изменяются в соответствии с изменением измеряемой величины, образуя при этом визуально наблюдаемое число.

Различают два метода измерения: метод непосредственной оценки (отсчета), получивший наибольшее применение, и метод сравнения. Метод непосредственной оценки заключается в непосредственном определении значения физической величины по отсчетному устройству измерительного прибора, ранее градуированного в единицах измеряемой величины (амперметры, вольтметры, счетчики и др.).

Электрические приборы классифицируются по нескольким признакам: 1) по роду измеряемой величины; 2) по физическим явлениям, лежащим в основе принципа действия измерительных приборов; 3) по классу точности измерений.

Классификация измерительных приборов по роду измеряемой величины приведена в таб. 2.1.

Таблица 2.1

Классификация измерительных приборов

Наименование прибора	Обозначение	Измеряемая величина
Амперметр	A	Ток (постоянный и переменный)
Вольтметр	V	Напряжение, ЭДС
Ваттметр	W	Мощность электрич. энергии (активная)
Варметр	var	Мощность электрич. энергии (реактивная)
Омметр	Ω	Активное сопротивление
Частотометр	Hz	Частота переменного напряжения (тока)
Фазометр	φ	Угол сдвига фаз
Счетчик электрической энергии	$\cos \varphi$	Коэффициент мощности
	Wh	Электрическая энергия

Условное обозначение рода измеряемой величины приводится на лицевой стороне прибора.

По роду тока приборы подразделяются на приборы переменного тока и приборы постоянного тока. Род тока обозначается на шкале: $\sim$ или $-$. у приборов, предназначенных для измерения в трехфазных системах, на шкале приводится $\approx$. у универсальных измерительных приборов, предназначенных для измерения переменных и постоянных напряжений и токов на шкале приводится. По принципу действия, т. е. способу преобразования электрической энергии, подводимой к прибору, в энергию механического перемещения показывающего прибора, измерительные приборы подразделяются на системы: магнитоэлектрические, электромагнитные, электродинамические, ферродинамические и др.

В соответствии с допустимыми погрешностями мерительным приборам присваивается класс точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0.

При выборе электрических приборов необходимо учитывать следующие факторы:

- условия эксплуатации должны соответствовать техническим условиям прибора; (род тока, частота, положение при установке прибора, условия окружающей среды и др.);
- измеряемая величина должна перекрываться пределами измерения прибора. Необходимо также учитывать, что приборы с неравномерной шкалой обеспечивают необходимую точность измерений в пределах от 30 до 100 % делений шкалы;
- класс точности приборов с учетом класса точности вспомогательных устройств не должен превышать допустимой погрешности измерений.

2.2. Устройство и работа приборов

Устройство прибора электромагнитной системы показано на рис. 2.1, а. Неподвижную часть прибора составляет катушка из изолированной проволоки. Подвижная часть прибора состоит из стального сердечника (лепестка), укрепленного на оси. На этой же оси крепятся стрелка-указатель и противодействующая вращению спиральная пружина.

Прибор с магнитоэлектрической системой (рис. 2.1, б) состоит из постоянного подковообразного магнита, полюсных наставок и стального цилиндра, помещенного между наставками. Воздушный зазор между полюсными наставками и стальным цилиндром делается небольшим. Магнитное поле в зазоре получается очень сильным (магнитное сопротивление цепи мало), направленным по радиусам цилиндра и практически равномерным.

Подвижная часть прибора состоит из легкой алюминиевой рамки, на которую намотана тонкая изолированная проволока. Рамка (катушка) укреплена на двух металлических полуосях и может вращаться. К передней полуоси прикреплена стрелка-указатель. Один конец стрелки перемещается вдоль шкалы прибора, а другой имеет противовесы для уравнивания подвижной системы прибора. Две спиральные пружины, прикрепленные к полуосям, предназначены для противодействия вращению рамки, возврата стрелки в исходное положение и подведения тока к обмотке рамки. Для установки стрелки на нуль имеется специальное приспособление, называемое корректором.

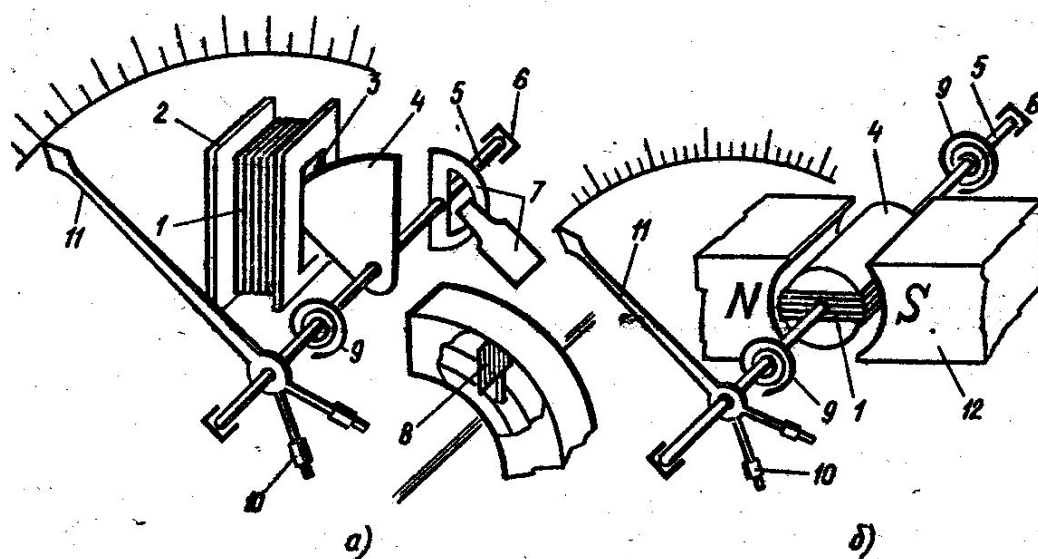


Рис. 2.1. Схемы измерительных приборов:

а – электромагнитного; б – магнитоэлектрического; 1 – катушка; 2 – каркас; 3 – окно в катушке; 4 – сердечник; 5 – керн; 6 – подпятник; 7 – магнитный успокоитель; 8 – успокоитель; 9 – моментная пружина; 10 – уравнивающие грузики; 11 – стрелки; 12 – постоянный магнит.

2.3. Основные неисправности и методы их устранения [4]

При эксплуатации измерительных приборов встречаются следующие повреждения: износ кернов при длительной эксплуатации; механические повреждения прибора и его частей, возникающие от постоянной вибрации, износ подпятников и кернов, возникающий при частых включениях, нарушение уравниваемости, поломка стрелок и др.

Перед ремонтом необходимо снять корпус, отсоединить пружины от пружинодержателя, разобрать успокоитель. Проверяют подвижную систему прибора и под микроскопом просматривают керны и подпятники. При необходимости керна вынимают из оправки.

Замена кернов. КERN представляет собой деталь, цилиндрическая часть которой переходит в коническую, оканчивающуюся сферическим закруглением - рабочей поверхностью. Поврежденный кERN извлекают из буксы следующими способами: выступающий конец керна зажимают часовыми тисками, оставив зазор 0,5–0,6 мм между губками тисков и буксой. В зазор с противоположных сторон вставляют конусные клинья. Нижний клин опирают на твердое основание, удерживая при этом в левой руке тиски. По верхнему клину ударяют молотком, и кERN выходит из буксы. Поврежденный кERN заменяют новым. Устанавливают его в буксу с помощью оправки с внутренним диаметром, немного меньшим, чем диаметр керна, легкими ударами молотка.

Ремонт и установка подпятников. Подпятник является опорной частью, на которую опирается (удерживается) кERN. Его изготавливают из искусственного агата или других твердых камней и заменяют, если он имеет трещины или шероховатости. Ударами молотка по выколотке выкрашивают поврежденный подпятник и на его место после развальцовки кромки посадочного гнезда устанавливают новый. После установки подпятника кромки углубления завальцовывают вручную или на часовом станке.

Замена стальных пружин. Пружины со временем теряют свои упругие свойства и не возвращают стрелку в нулевое положение. Старую пружину удаляют и заменяют аналогичной новой. Внутренний конец пружины зачищают, удерживая его в пинцете, и облущивают. Пружину 4 припаивают к неподвижному пружинодержателю 6, паяльником пружину устанавливают в паз шаблона, отстоящего от

основания приспособления на толщину пружинодержателя, обеспечивая надежное зацепление. Конец керн 2 защищен колпачком 3. Уравновешивание подвижной части достигается передвиганием грузиков, установленных на усиках стрелки.

Одними из основных элементов, используемых при измерениях, являются трансформаторы тока и напряжения.

Для обеспечения правильности измерений все измерительные трансформаторы перед вводом их в эксплуатацию должны поверяться. Поверка измерительного трансформатора заключается в контроле правильности разметки зажимов и определении погрешностей.

Поверка разметки зажимов. Ток во вторичной обмотке трансформаторов тока или трансформатора напряжения, согласно правилу Ленца, имеет направление, обратное направлению тока в первичной обмотке. На рис. 2.2. это показано условно стрелками около обмоток. Направление тока в приборах, включенных во вторичную цепь, может быть, как это видно на рис. 2.2. различным в зависимости от порядка присоединения концов вторичной обмотки к зажимам внутри самого трансформатора и от порядка присоединения проводов к зажимам прибора. Это обстоятельство не имеет значения при измерении тока и напряжения, т. к. показания амперметров и вольтметров переменного тока не зависят от направления тока.

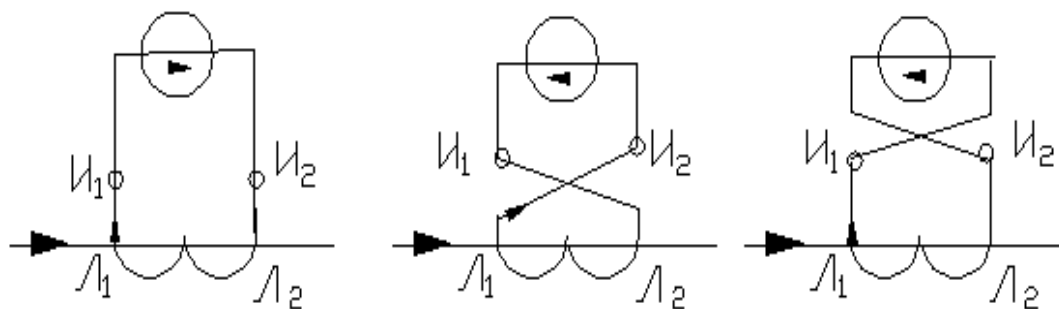


Рис.2.2. Возможные направления токов в приборе, включенном через трансформатор тока

Иначе обстоит дело при включении через измерительные трансформаторы ваттметров и счетчиков, т. к. изменение направления тока в последовательной или параллельной обмотке этих приборов равносильно повороту вектора тока или напряжения на 180° и приводит к изменению знака показания. Если при одном направлении тока показания прибора положительны, то при перемене направления тока показания будут отрицательными – стрелка ваттметра отклонится влево

от нуля, а диск счетчика будет вращаться в сторону, обратную нормальной. Чтобы избежать неправильных включений, зажимы измерительных трансформаторов имеют обозначения, поставленные так, чтобы направление тока в приборе, включенном через трансформатор, сохранялось таким же, как и при включении его непосредственно в сеть.

Зажимы первичной обмотки однофазных трансформаторов напряжения обозначаются буквами А и Х, соответствующие зажимы вторичной обмотки – буквами а и х. У трехфазных трансформаторов напряжения зажимы обозначаются буквами А, В, С на стороне высокого напряжения и буквами а, в, с – на стороне низкого напряжения. Зажимы первичной обмотки трансформаторов тока обозначаются буквами Л₁ и Л₂ (линия), а зажимы вторичной обмотки – буквами И₁ и И₂ (измерительный прибор).

У каждого измерительного трансформатора, предназначенного для измерения мощности или учета энергии, необходимо проверять правильность имеющейся на нем разметки зажимов; наиболее просто это осуществляется при помощи переносного аккумулятора и вольтметра магнитоэлектрической системы. Аккумулятор в большинстве случаев можно заменить батареей от карманного фонаря. Вольтметр может быть взят самый грубый, т. к. правильность его показаний при данном испытании не имеет никакого значения; верхний предел измерения его должен быть небольшим.

Схема включения для проверки разметки зажимов трансформаторов тока изображена на рис.2.3.

К зажимам вторичной обмотки присоединяют вольтметр так, чтобы зажим прибора, имеющий пометку «+», был соединен с зажимом И₁. Положительный полюс аккумулятора соединяют с зажимом Л₁. После этого проводом, идущим от отрицательного полюса аккумулятора, касаются зажима Л₂. Если разметка зажимов правильна, то в момент включения тока стрелка вольтметра дает отброс в нормальную сторону, т. е. так же, как при непосредственном подключении вольтметра к зажимам аккумулятора. При размыкании тока в первичной цепи стрелка прибора дает отброс в обратную сторону – влево от нуля.

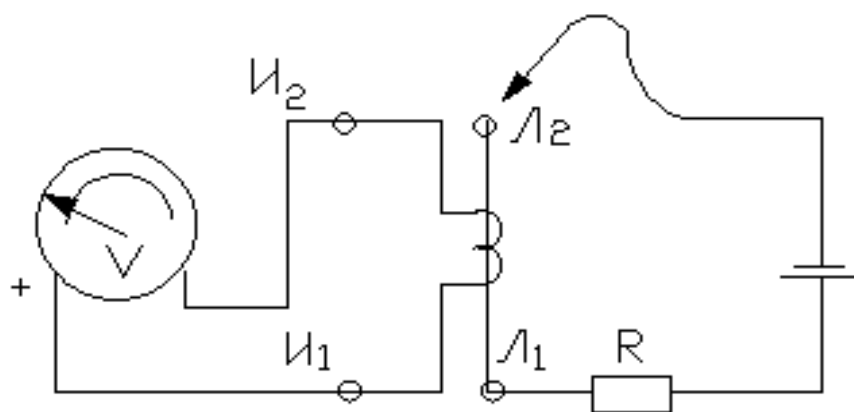


Рис. 2.3. Схема для проверки разметок зажимов трансформатора тока

При пользовании аккумулятором по схеме, изображенной на рис. 2.3. следует дополнительно включить в его цепь резистор R , (1–2 Ом), для предохранения аккумулятора от короткого замыкания. При работе с сухим элементом эта предосторожность не требуется.

Разметка зажимов трансформаторов напряжения проверяется тоже описанным способом, только вольтметр и аккумулятор меняются местами: вольтметр подключается к обмотке высокого напряжения, а аккумулятор – к обмотке низкого напряжения. Необходимость в ограничительном сопротивлении в этом случае отпадает, т. к. сопротивление обмоток трансформатора напряжения достаточно велико.

Определение погрешностей измерительных трансформаторов может осуществляться различными методами, из числа которых в настоящее время наиболее широко применяют метод непосредственного измерения токов (напряжений) и дифференциальный метод; реже используется компенсационный метод.

Метод непосредственного измерения является наиболее простым, но он позволяет определять только погрешности тока или погрешности напряжения, не давая возможности узнать угловые погрешности поверяемых трансформаторов. По этой причине метод непосредственного измерения используется лишь для поверки трансформаторов тока классов 3 и 10 и трансформаторов напряжения класса 3, угловые погрешности которых не нормированы.

Дифференциальный и компенсационный методы дают возможность определять как погрешности тока и напряжения, так и угловые погрешности измерительных трансформаторов.

При использовании метода непосредственного измерения с помощью показывающих амперметров проводится непосредственное измерение токов в первичной и вторичной обмотках поверяемого трансформатора тока. Или при помощи вольтметров измеряются напряжения на первичных и вторичных зажимах поверяемого трансформатора напряжения. По полученным результатам измерения токов или напряжений проверяется коэффициент трансформации. Измерение первичного или вторичного напряжения и тока может проводиться амперметром, вольтметром не непосредственно, а через соответствующий образцовый трансформатор тока или образцовый трансформатор напряжения.

Поверка измерительных трансформаторов дифференциальным методом заключается в сравнении поверяемого трансформатора с образцовым. Однако в этом случае в противоположность непосредственного измерения не производится измерение первичных и вторичных токов (напряжений), а определяется только отношение разности вторичных токов (напряжений) поверяемого и образцового трансформаторов к вторичному току (напряжению) образцового трансформатора. Зная это отношение и погрешности образцового трансформатора, можно подсчитать погрешности поверяемого трансформатора. Поверка этим методом осуществляется при помощи специальных приборов, к числу которых относятся приборы типов АТТ и АИТ. Дифференциальный метод обеспечивает наиболее высокую точность определения погрешности измерительных трансформаторов.

При дифференциальном методе, а также в большинстве случаев и при методе непосредственного измерения для определения погрешностей поверяемого трансформатора требуется другой образцовый, уже поверенный трансформатор, и, следовательно, эти методы не дают возможности определять погрешности исходных образцовых трансформаторов. При компенсационном методе поверка трансформаторов проводится с применением шунтов и делителей напряжения, и образцовый трансформатор не нужен. Этот метод является единственным путем для определения погрешностей образцовых трансформаторов напряжения. В применении к трансформаторам тока этот метод менее точен и трудно осуществим при токах свыше 200 А. В настоящее время задача поверки исходных образцовых трансформаторов тока решается иными способами.

2.4. Измерение тока и напряжения

Постоянный ток измеряют приборами с магнитоэлектрической системой.

Непосредственно по обмотке, размещенной на рамке прибора, может протекать ток очень небольшой величины. Для расширения пределов измерения применяются резисторы (шунты), включаемые параллельно обмотке прибора. Для измерения постоянного тока до 29 А применяются приборы с встроенными шунтами. Для измерения больших токов применяют наружные шунты. Наружные шунты присоединяют к прибору калиброванными проводами с общим сопротивлением 0,035 Ом.

Для измерения переменного тока используют приборы электромагнитной, электродинамической и ферродинамической систем. Они имеют неравномерную шкалу и обеспечивают необходимую точность измерения в пределах от 20 до 100 % всей шкалы. Амперметр включают непосредственно в цепь (при токе нагрузке до 20 А). Для расширения пределов измерения используют трансформатор тока. Первичная обмотка трансформатора включается непосредственно в цепь нагрузки, вторичная – к измерительному прибору.

Схемы включения приборов для измерения постоянного и переменного тока приведены на рис.2.4.

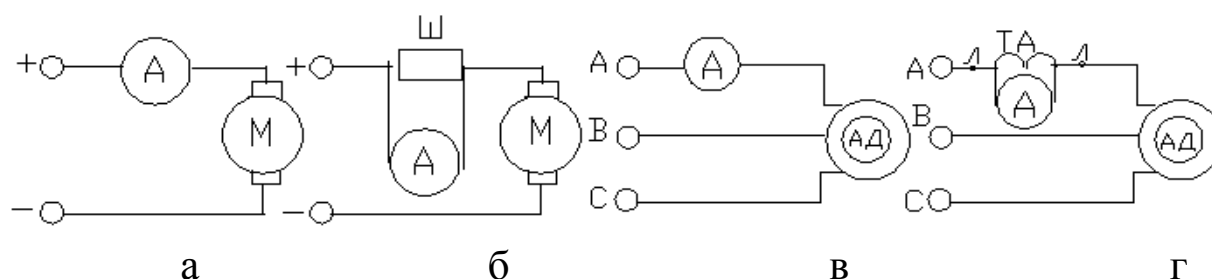


Рис. 2.4. Схемы включения амперметров:

а, б – измерение постоянного тока;

в, г – измерения переменного тока

Напряжение измеряют вольтметром, милливольтметром, киловольтметром. При этом вольтметр подключают к двум точкам, между которыми хотят определить значение напряжения. Схемы включения вольтметров приведены на рис.2.5.

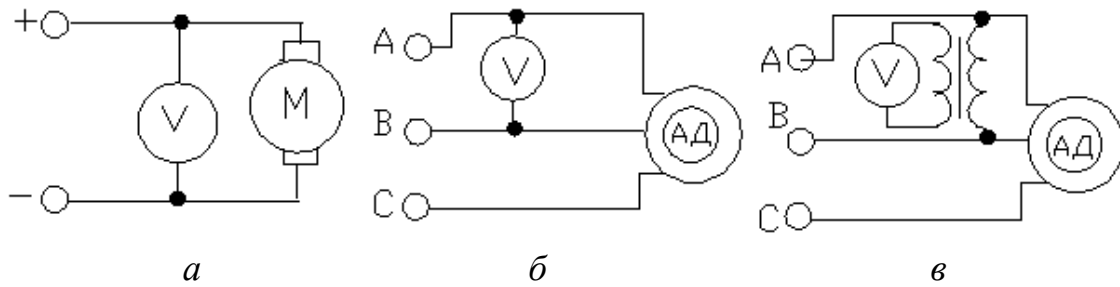


Рис. 2.5. Схемы подключения вольтметров:

*а, б – прямое включение вольтметров постоянного и переменного тока;
в – включение вольтметра через трансформатор напряжения*

Таким образом, вольтметр оказывается подключенным параллельно измеряемому объекту (двигателю) (рис. 2.5, а, б). Предел измерения вольтметров в цепях постоянного тока расширяют с помощью добавочных резисторов R , которые включают последовательно с вольтметром. Номинальные токи добавочных резисторов стандартизованы: 3; 5; 7,5 мА, что позволяет применять стандартные приборы и обеспечивать их взаимозаменяемость. Отношение измеряемого напряжения U_H к напряжению на измерительном элементе вольтметра называется множителем добавочного резистора K_U по напряжению. Выбор проводится из условий измерения $K_U = U/U_H$.

При измерении ЭДС источников с большим внутренним сопротивлением или напряжений в действующих высокоомных цепях с помощью магнитоэлектрических или электронных приборов может возникнуть большая погрешность, т. к. сопротивления вольтметров могут быть соизмеримы с сопротивлениями исследуемых цепей. В этих случаях целесообразно применять компенсационный или дифференциальный метод.

Для расширения пределов измерения напряжения на переменном токе применяют измерительные трансформаторы напряжения T_V (T_V представляет собой трансформатор, работающий в режиме холостого хода). Первичное напряжение $U_1 = K_U U_2$, где K_U – коэффициент трансформации трансформатора напряжения (дается в паспорте). Выводы первичной обмотки T_V обозначаются $A - X$ (начало – конец), выводы вторичной – $(a - x)$ и служат для подключения вольтметра. По условиям техники безопасности один конец вторичной обмотки T_V и его стальной корпус должны быть заземлены.

Если измерения проводятся с помощью измерительных трансформаторов тока и напряжения, то при определении цены деления прибора необходимо учитывать и коэффициенты трансформации. Поясним это на примерах.

Пример 2.1. Вольтметр, имеющий шкалу с $n = 150$ делений, с помощью многопредельного переключателя может быть использован для измерения напряжений 7,5; 15; 75; 150 и 300 В. Определить цену деления прибора для каждого положения переключателя. Какими должны быть в каждом отдельном случае показания стрелки прибора, если измеряемое напряжение $U_{\text{изм}} = 10$ В?

Решение: 1. Определим цену деления прибора при установке многопредельного переключателя на напряжение $U_1 = 7,5$ В:

$$D = U_1/n = 7,5/150 = 0,05 \text{ В/дел.}$$

Для других положений переключателя цена деления прибора определяется аналогично: $D_2 = 0,1$ В/дел. $D_3 = 0,5$ В/дел. $D_4 = 1,0$ В/дел и $D_5 = 2,0$ В/дел.

2. При установке переключателя на напряжение $U_1 = 15$ В и указанном в условии напряжении измеряемого участка цепи показания стрелки прибора будут

$$n = U_{\text{изм}}/D_2 = 10/0,1 = 100 \text{ дел.}$$

При других положениях переключателя показания стрелки прибора будут следующими: $n_3 = 20$ дел. $n_4 = 10$ дел. и $n_5 = 5$ дел.

Пример 2.2. Амперметр имеет шкалу с $n = 150$ дел. и включается, через шунт на максимальный ток $I_m = 30$ А. В момент измерения стрелка прибора показала отсчет $n = 112$ дел. Определить величину измеренного тока.

Решение: 1. Определим цену деления прибора:

$$D = I_m/D = 30/150 = 0,2 \text{ А/дел.}$$

2. Измеренный ток равен: $I = nD = 112 \cdot 0,2 = 22,4$ А.

Пример 2.3. Вольтметр на номинальное напряжение $U = 150$ В, имеющий шкалу с $D = 100$ дел. включен через трансформатор напряжения 380/127 В на шины распределительного устройства. Стрелка прибора показывает отсчет $n = 84$ дел. Определить напряжение на шинах распределительного устройства.

Решение: 1. Определим цену деления вольтметра:

$$D = k_u C_U = \frac{U_1}{U_2} \frac{U}{D} = \frac{380}{127} \frac{150}{100} = 4,5 \text{ В / дел...}$$

где k_u – коэффициент трансформации, C_U – постоянная прибора.

2. Напряжение на шинах равно

$$U_{\text{изм}} = nD = 84 \cdot 4,5 = 378 \text{ В.}$$

Пример 2.4. Амперметр, имеющий шкалу с $D = 150$ дел. рассчитан на измерение тока до $I = 2,5$ А. В схеме он включается через измерительный трансформатор тока с номинальным первичным током $I_1 = 600$ А и вторичным $I_2 = 5$ А. Отсчет по прибору составляет $n = 104$ дел. Определить измеренный ток.

Решение: 1. Определим цену деления амперметра:

$$D = k_I C_I = \frac{I_1}{I_2} \frac{I}{D} = \frac{600}{5} \cdot \frac{2,5}{150} = 2 \text{ А / дел.}$$

2. Измеренный ток равен

$$I_{\text{изм}} = nD = 104 \cdot 2 = 208 \text{ А.}$$

2.5. Измерение активной мощности

Измерить активную мощность в цепях трехфазного тока можно следующими методами:

- методом одного ваттметра.
- методом двух ваттметров.
- методом трех ваттметров.

Метод одного ваттметра применяют для измерения мощности трехфазной системы при симметричной нагрузке. В этом случае мощность всей системы

$$P = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi. \quad (2.1)$$

Метод трех ваттметров может быть применен для измерения мощности в четырехпроводной несимметричной системе. В этом случае каждый из ваттметров учтет мощность P_{ϕ} одной фазы. Полная

мощность P системы определится как сумма показаний трех ваттметров, т. е.

$$P = P_A + P_B + P_C. \quad (2.2)$$

Здесь рассматривается метод двух ваттметров как получивший наибольшее распространение при измерении мощности в трехпроводных цепях трехфазного тока независимо от характера нагрузки (индуктивного или емкостного) и от степени симметрии системы. Мощность P трехфазной системы будет определяться алгебраической суммой показаний двух ваттметров, т. е.

$$P = P_1 + P_{11}. \quad (2.3)$$

Согласно теории этого метода, независимо от схемы соединения нагрузки звездой или треугольником при различных схемах включения двух ваттметров в цепь, полная активная мощность определяется по одному из следующих уравнений:

$$P = U_{AC} I_A \cos \beta_1 + U_{BC} I_B \cos \beta_2 ; \quad (2.4)$$

$$P = U_{AB} I_A \cos \beta_3 + U_{CB} I_C \cos \beta_4 ;$$

$$P = U_{BA} I_B \cos \beta_5 + U_{CA} I_C \cos \beta_6 ,$$

где U_{AC} , U_{BC} и т. д. — линейные напряжения;

I_A , I_B , I_C — линейные токи; $\beta_1 - \beta_6$ — углы сдвига между этими токами и напряжениями.

При этом токовые обмотки обоих ваттметров включаются в две фазы из трех. Обмотки напряжения включаются на линейные напряжения соответственно между фазами, в которые включены токовые обмотки, и фазой, которая осталась свободной от включения в нее токовых обмоток ваттметров. Важно обратить внимание на правильность подключения генераторных зажимов.

При включении ваттметров по схеме, изображенной на рис. 2.6, векторная диаграмма (рис. 2.6, б) соответствует симметричной системе с индуктивным характером нагрузки ($\varphi > 0$), что в основном действительно имеет место для промышленной нагрузки.

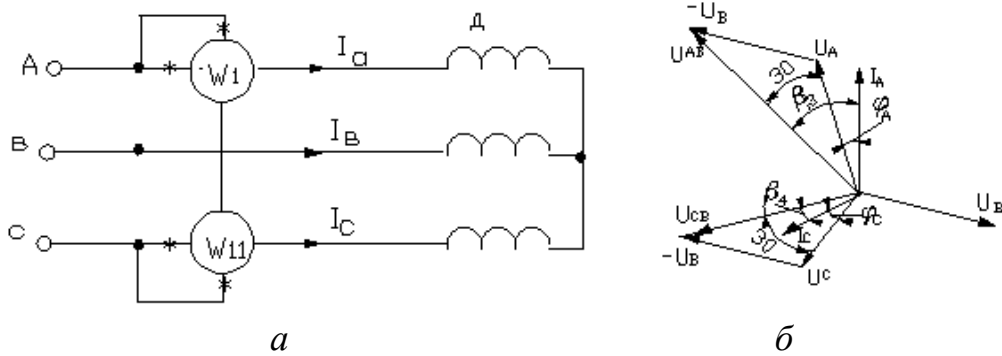


Рис. 2.6. Измерение активной мощности методом двух ваттметров:
а – схема; б – векторная диаграмма

Из диаграммы следует, что $\beta_3 = 30 + \varphi$ и $\beta_4 = 30 - \varphi$. После подстановки значений β_3 и β_4 в уравнение (2.4)

$$P = U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos (30 + \varphi) + U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos (30 - \varphi). \quad (2.5)$$

Преобразуя это уравнение

$$P = U_{\text{л}} I_{\text{л}} [\cos(30 + \varphi) + \cos(30 - \varphi)] = U_{\text{л}} I_{\text{л}} 2 \cos 30 \cos \varphi = \sqrt{3} U_{\text{л}} I_{\text{л}} \cos \varphi,$$

убеждаемся, что два ваттметра, включенные по схеме рис. 2.6, а, действительно измеряют мощность трехфазной цепи.

Из уравнения (2.5) следует, что показания каждого ваттметра могут быть как положительными, так и отрицательными. Это зависит от величины и знака угла φ (при индуктивном характере нагрузки ($\varphi > 0$), при емкости $\varphi < 0$). Следовательно, мощность P трехфазной системы будет определяться алгебраической суммой показаний двух ваттметров.

Определяя из уравнения (2.5) зависимость показаний двух ваттметров, можно, например, для индуктивного характера нагрузки установить следующее:

- при $\varphi = 0$ ($\cos \varphi = 1$) показания обоих ваттметров одинаковы:

$$P_1 - P_{11} = \frac{\sqrt{3}}{2} U_{\text{л}} I_{\text{л}}, \quad (2.6)$$

- при $\varphi < 60^\circ$ ($\cos \varphi > 0,5$) оба ваттметра показывают положительное значение мощности. Это наблюдается, например, при работе

асинхронных двигателей или трансформаторов в режиме номинальной нагрузки, когда $\cos \varphi = 0,6 - 0,8$.

- при $\varphi = 60^\circ$ ($\cos \varphi = 0,5$) показание одного ваттметра (в нашем случае W_1) будет равно нулю, а показание другого ваттметра W_{11} – некоторой положительной величине.

- при $\varphi > 60^\circ$ ($\cos \varphi < 0,5$) один из ваттметров (W_{11}) показывает положительное значение по шкале, а другой – отрицательное (стрелка ваттметра W_1 отклоняется влево). Это соответствует режиму холостого хода асинхронного двигателя или трансформатора, когда $\cos \varphi = 0,2 - 0,3$. В данном случае для отсчета надо изменить направление тока в одной из обмоток этого ваттметра и его показание считать отрицательным.

При изменении индуктивного характера нагрузки ($\varphi > 0$) на емкостной ($\varphi < 0$) направление отклонения подвижных систем ваттметров, а следовательно, и их показания изменятся на обратные (см. уравнение 48). Мощность трехфазного тока методом двух ваттметров в производственных условиях измеряют специальным трехфазным (двухэлементным) ваттметром. На рис. 2.6, а, использованы два однофазных ваттметра, имеющих одни и те же номинальные данные $U_{ном} = 150$ В, $I_{ном} = 5$ А и общее число делений шкалы $N = 100$ дел. Номинальные токи трансформаторов тока: первичный $I_1 = 600$ А и вторичный $I_2 = 5$ А. Номинальные напряжения измерительного трансформатора напряжения: высшее $U_1 = 380$ В и низшее $U_2 = 127$ В. При измерении $\cos \varphi > 0,5$, показания ваттметров равны $n_1 = 100$ дел. и $n_2 = 70$ дел. Определить измеренную мощность.

Решение: 1. Определим постоянную каждого ваттметра:

$$C_w = \frac{U_n I_n}{N} = \frac{150 \cdot 5}{100} = 7,5 \text{ Вт} / \text{дел.}$$

2. Определим цену деления каждого ваттметра по заданной схеме:

$$D = C_w k_I k_u = 7,5 \cdot \frac{600}{5} \cdot \frac{380}{127} = 2700 \text{ Вт} / \text{дел} = 2,7 \text{ кВт} / \text{дел.}$$

3. Измеренная мощность

$$P_{изм} = D(n_1 + n_2) = 2,7(100 + 70) = 450 \text{ Вт.}$$

Пример 2.6. Шкала трехфазного ваттметра, включаемого в сеть согласно схеме, приведенной на рис. 2.8, отградуирована из расчета включения с трансформатором тока 200/5 А и измерительным трансформатором напряжения 380/127 В. Фактически же прибор включен через трансформатор тока 1000/5 А и трансформатор напряжения 380/100 В. Определить поправку, необходимую для работы.

Решение: 1. Определим коэффициенты измерительных трансформаторов

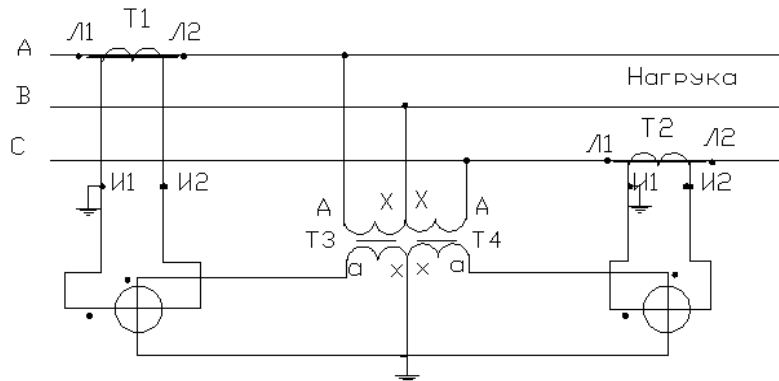


Рис. 2.7. Схема включения двух-, однообмоточных ваттметров через измерительные трансформаторы (для измерения активной мощности)

$$K_{I1} = 200/5 = 40;$$

$$K_{U1} = 380/127 = 3;$$

$$K_{I2} = 1000/5 = 200;$$

$$K_{U2} = 380/100 = 3,8;$$

1. Определим коэффициент, на который следует умножать все показания ваттметра:

$$= \frac{k_{I2} k_{U2}}{k_{I1} k_{U1}} = \frac{200 \cdot 3,8}{40 \cdot 3} = 6,3$$

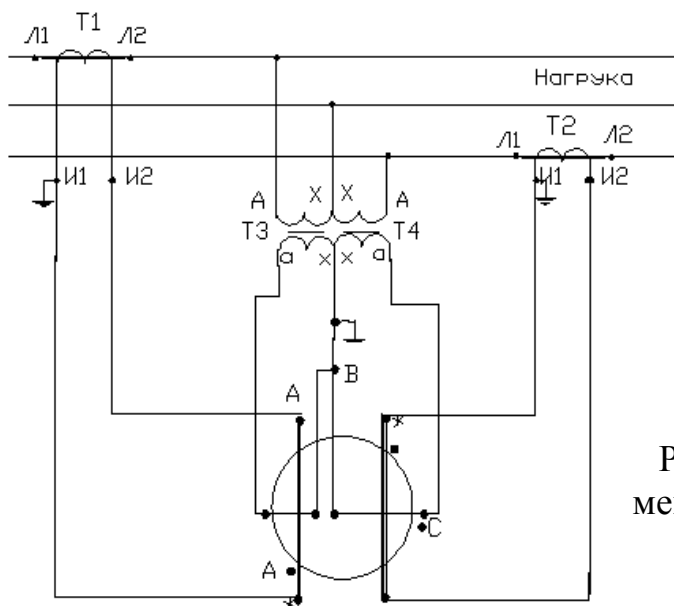


Рис.2.8. Схема включения двухэлементного ваттметра через измерительные трансформаторы

2.6. Измерение реактивной мощности

Реактивная мощность не определяет совершаемой работы, ни передаваемой энергии за единицу времени, т.е. является условным понятием. И в то же время реактивная мощность или реактивная энергия оказывают большое влияние на энергетические показатели энергосистемы.

В цепях трехфазного тока реактивная мощность определяется выражением

$$Q = 3Q_{\phi} = 3U_{\phi}I_{\phi} \sin \varphi = \sqrt{3} U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi. \quad (2.7)$$

Измерить реактивную мощность в цепях трехфазного тока можно тремя методами; одного ваттметра; двух ватметров; трех ватметров.

Метод одного ваттметра

Этот метод применяют для измерения мощности при трехфазной симметричной нагрузке.

В случае применения активного ваттметра обмотку напряжения его следует включать на другие фазы по отношению к фазе, в которую включена токовая обмотка этого ваттметра. Действительно, при такой схеме включения (рис.2.9) вектор линейного напряжения U_{BC} , приложенного к обмотке напряжения ваттметра, оказывается сдвинутым на угол $\pi/2$ к вектору фазного напряжения U_{A} , в фазу которого включена токовая обмотка этого же ваттметра. В результате между током I_{A} и напряжением U_{BC} получается сдвиг по фазе $\beta = 90^\circ - \varphi_{\text{A}}$. Поскольку показания активного ваттметра определяются произведением тока, протекающего по его токовой обмотке, на напряжение, приложенное к его обмотке напряжения, и на косинус угла между их векторами, то, применяя это положение для приведенной схемы (рис. 2.9) включения ваттметра, получим

$$Q = 3U_{\text{Л}} I_{\text{Л}} \sin \varphi_{\text{A}}. \quad (2,8)$$

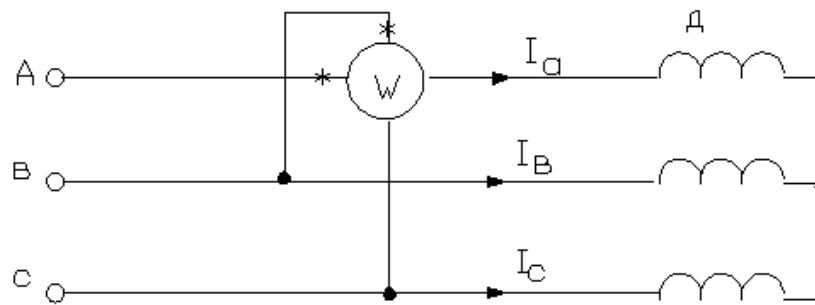


Рис. 2.9. Схема подключения ваттметра

Приведенные на рис. 2.7 и 2.8 схемы позволяют проводить измерения при неравномерной нагрузке трехфазной системы. Они также позволяют определять реактивную мощность нагрузки, но для этого необходимо провести дополнительно измерение тока и напряжения в сети, а затем воспользоваться соотношениями $P = UI \cos \varphi$. Получив значение полной мощности $S = IU$, можно рассчитать реактивную мощность. Однако на практике измерение реактивной мощности гораздо удобнее проводить, непосредственно изменив схему включения ваттметра, (рис. 2.8).

2.7. Погрешности измерений

Точность измерения характеризуется его возможными погрешностями. Эти погрешности при каждом конкретном измерении не должны превышать некоторого определенного значения. В зависимости от способа числового выражения различают погрешности абсолютные и относительные, а применительно к показывающим приборам – еще и приведенные.

Абсолютная погрешность ΔA – это разность между измеренным $A_{из}$ и действительным A значениями измеряемой величины:

$$\Delta A = A_{из} - A.$$

Например, амперметр показывает $A_{из} = 9$ А, а действительное значение тока $A = 8,9$ А, следовательно, $\Delta A = 0,1$ А.

Чтобы определить действительное значение величины, нужно к измеренному значению прибавить поправку – абсолютную погрешность, взятую с обратным знаком.

Точность измерения оценивается обычно не абсолютной, а относительной погрешностью, выраженной в процентном отношении абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины:

$$\gamma_0 = (\Delta A / A_{\text{изм}}) \cdot 100 \, \%.$$

Так как разница между A и $A_{\text{изм}}$ обычно относительно мала, то практически в большинстве случаев можно считать, что $\gamma_0 = (\Delta A / A) \cdot 100 \, \%$. Для приведенного примера измерения тока относительная погрешность

$$\gamma_0 = (0,1/9) \cdot 100 \, \% = 1,11 \, \%.$$

Однако оценивать по относительной погрешности точность показывающих приборов со стрелочным указателем неудобно. Дело в том, что абсолютная погрешность ΔA у них имеет обычно один и тот же порядок вдоль всей шкалы. При постоянной абсолютной погрешности ΔA с уменьшением измеряемой величины $A_{\text{изм}}$ быстро растет относительная погрешность. Поэтому рекомендуется выбирать пределы измерения показывающих приборов так, чтобы отсчитывать показания приборов в пределах второй половины шкалы ближе к ее концу.

Вопросы для самопроверки

1. Какие признаки находятся в основе классификации измерительных приборов?
2. Поясните принцип действия магнитоэлектрических приборов.
3. Устройство и принцип действия электромагнитных приборов.
4. К какой системе относятся приборы с неравномерной шкалой?
5. У приборов с магнитоэлектрической системой через чувствительный элемент (обмотка на рамке) может проходить очень маленький ток. Как удастся измерять с помощью этих приборов токи до 1000 А и напряжение до 1000 В?
6. Приведите схемы для измерения активной и реактивной мощности.
7. Какие неисправности возникают в измерительных приборах процессе эксплуатации?

3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ

В настоящее время преобразователи, применяемые в электроприводах и других областях техники, реализуются на элементах силовой преобразовательной техники: диодах, тиристорах, полевых или биполярных транзисторах. Наиболее известными преобразователями являются неуправляемые и управляемые выпрямители, регуляторы переменного напряжения, импульсные регуляторы постоянного тока и преобразователи частоты (с непосредственной связью и с промежуточным звеном постоянного тока),

3.1. Полупроводниковые диоды

Широкое применение полупроводниковых устройств в различных областях науки и техники началось с полупроводниковых диодов. Простота их устройства, высокая надежность, высокий КПД преобразователей, реализуемых на их базе, предопределяют их возрастающее востребование.

Полупроводниковый диод – прибор с двумя электродами, с одним или двумя р-п переходами. Силовые полупроводниковые диоды подразделяются на выпрямительные и быстродействующие. Быстродействующие диоды используются для создания обратных цепей, необходимых для возврата энергии, накопленной в индуктивных элементах нагрузки.

На рис. 3.1. приведено условное графическое обозначение, структура и вольт-амперная характеристика диода.

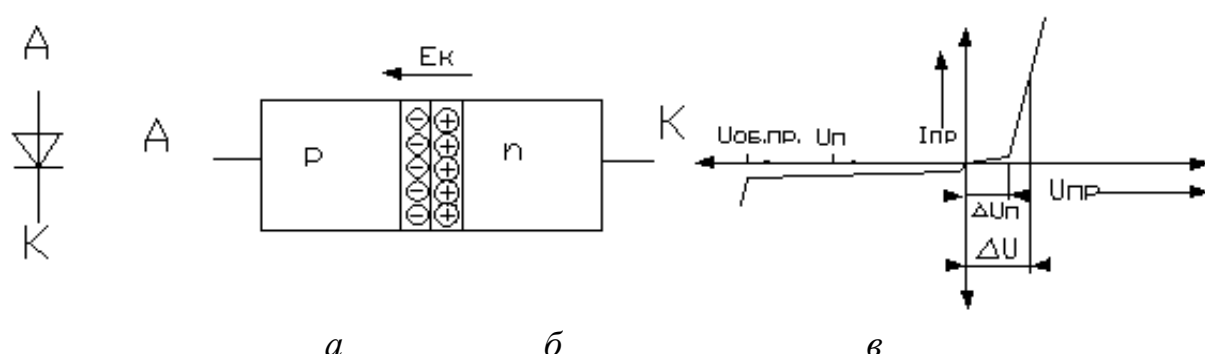


Рис. 3.1. Графическое обозначение (а), структура (б) и вольт-амперная характеристика диода (в)

Диод имеет два вывода от областей с различной проводимостью. Вывод от области с р-проводимостью называется анодом. Вывод от области с n-проводимостью – катодом. При прохождении прямого и обратного тока происходит нагрев р-n перехода. Для отвода тепла от диода применяются охладители.

На прямой ветви вольт – амперной характеристики два линейных участка (рис. 3.1, в) по которым определяются статические характеристики: пороговое напряжение $\Delta U_{\text{п}}$, прямое падение напряжения на открытом тиристоре ΔU и динамическое сопротивление. По линейному участку обратной ветви характеристики, ограниченному величиной пробивного напряжения $U_{\text{об.пр.}}$, устанавливается допустимое обратное напряжение $U_{\text{п}}$. Разность $U_{\text{об.пр.}} - U_{\text{п}}$ имеет большой разброс даже у диодов одного типа и с одинаковыми параметрами, указанными в справочной литературе.

На рис. 3.2 приведена конструкция диода средней мощности и внешний вид его охладителя. Конструкция диода включает следующие элементы: 1 – основание; 2 – вольфрамовые диски; 3 – вентильный элемент; 4 – чашечку; 5 – корпус; 6 – гибкий контакт; 7 – изолятор; 8,9 – втулки; 10 – гибкий вывод.

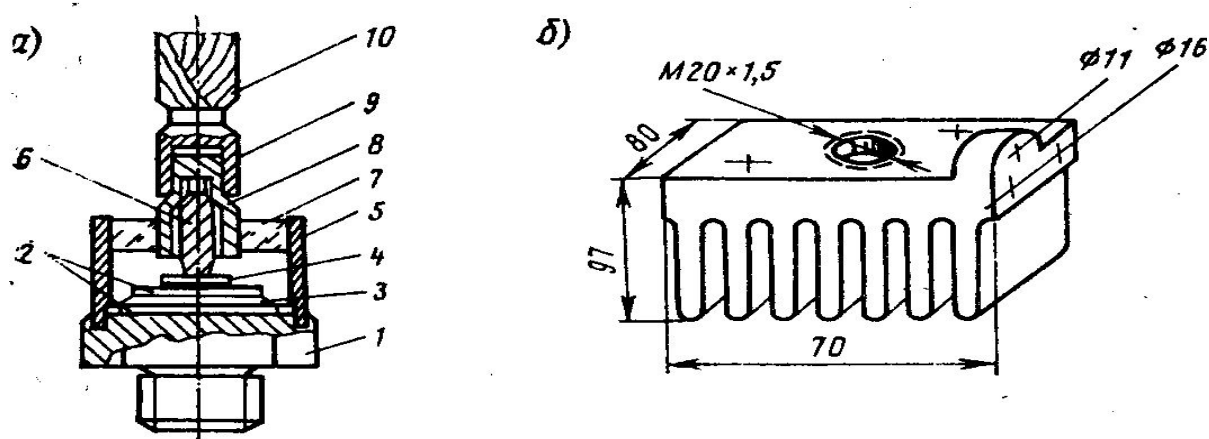


Рис. 3.2. Силовой диод средней мощности:
а – конструкция; б – общий вид охладителя

Более мощные диоды имеют таблеточную форму. Общий вид охладителя диода и конструкция таблетки приведены на рис. 3.3.

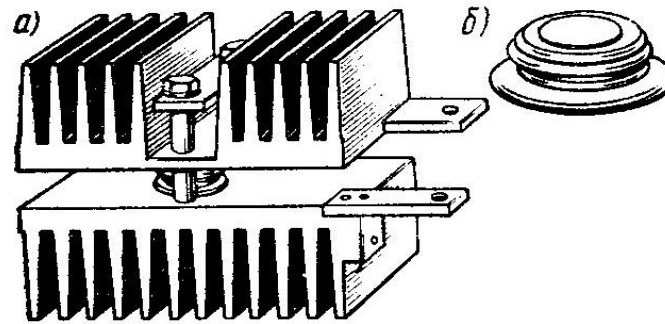


Рис. 3.3. Общий вид охладителя диода (а) и конструкция таблетки (б)

К основным техническим параметрам диодов относятся:

$I_{пр. max}$ — прямой максимальный ток, А;

$I_{пр. и max}$ — максимально допустимый импульсный ток ;

$I_{обр.}$ — обратный ток (ток утечки);

$U_{обр.}$ — максимальное допустимое обратное напряжение, В;

$U_{пр.}$ — прямое падение напряжения на открытом диоде.

*Приведенные параметры диодов используются при проектировании
неуправляемых выпрямителей*

3.2. Тиристоры

Тиристор это полупроводниковый прибор, обладающий свойствами преобразования и регулирования напряжений и токов.

В силовых преобразователях энергии в основном применяются три типа тиристоров: не запираемые тиристоры (SCR), запираемые тиристоры (GTO), запираемые тиристоры с интегрированным управлением (IGCT). Есть и другие разновидности тиристоров. На этих тиристорах выполняются наиболее мощные преобразователи электрической энергии.

Не полностью управляемые тиристоры (SCR) широко используются в приводах постоянного тока, в регулируемых приводах переменного тока, мощных статических компенсаторах реактивной энергии, в преобразователях технологических установок: электролизных, гальванических, плавильных и др.

Запираемые тиристоры (GTO) используются для создания мощных преобразователей (до МВ-А), применяемых в приводах компрессоров, насосов, агрегатах бесперебойного питания и статических компенсаторах реактивной энергии.

Тиристоры с интегрированным управлением (IGCT) являются последним достижением в области силовой преобразовательной техники. По многим показателям эти приборы значительно превосходят тиристоры GTO. Они имеют более высокое быстродействие, меньшее прямое падение напряжения, значительно меньше мощность управления, высокую надежность работы и возможность создания мощных преобразователей путем последовательного и параллельного соединения элементов.

Условное графическое изображение, структура и характеристики тиристора SCR приведены на рис. 3.4.

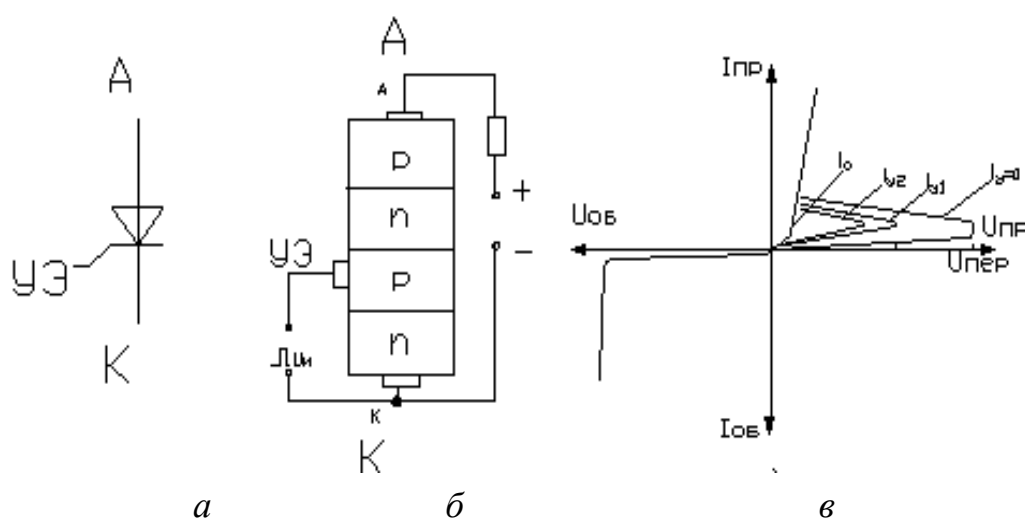


Рис. 3.4. Незапираемые тиристоры:
а – обозначение; б – структура;
в – вольт-амперные характеристики

В структурной схеме не запираемого тиристора (рис. 3.4, б) три перехода. При положительной полярности на аноде тиристора и отрицательной – на катоде, к двум из них - $p_1 - n_1$ и $p_2 - n_2$ подводится прямое напряжение, переход $n_1 - p_2$ смещен в обратном направлении. При отсутствии тока управления в цепи управляющий электрод – катод тиристор закрыт как при прямом, так и обратном напряжениях на электродах анод – катод. По мере увеличения прямого напряжения незначительно возрастает прямой ток, называемый током утечки (рис. 3.4 в). При некоторой величине прямого напряжения $U_{вк}$, называемого напряжением включения, тиристор открывается и наступает лавинный процесс встречного перемещения «дырок» и электронов через переход $n_1 - p_2$. Наличие тока в цепи управления приводит к снижению напряжения включения. При токе I_c , называе-

мым током спрямления, характеристика тиристора такая же, как у диода.

Ток управления, открывающий тиристоры при любой величине прямого напряжения, имеет большой разброс даже у тиристоров с одинаковыми техническими данными, указанными в справочной литературе. Поэтому система управления тиристорами должна формировать управляющие импульсы, надежно открывающие все тиристоры с одинаковыми техническими данными. Обратная ветвь вольт-амперной характеристики тиристора такая же, как у диода. По мере увеличения обратного напряжения возрастает обратный ток. После превышения обратного напряжения допустимой величины наступает пробой и выход из строя тиристора.

Конструкция силовых тиристоров имеет два вида: штыревой и таблеточный [5]. Конструкция штыревого тиристора (рис. 3.5, а) состоит из основания из меди 1; трубки.

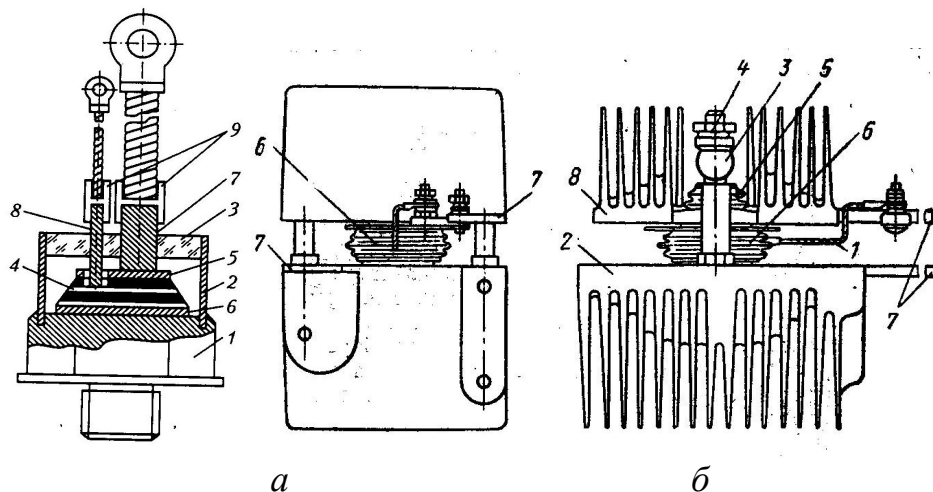


Рис. 3.5. Конструкция штыревого (а) и таблеточного (б) тиристора с охладителем: 2 из стали со стекло изолятором; 3 четырехслойной структуры $p-n-p-n$; 4 с припаянными к ней вольфрамовыми дисками; 5 и 6 стержневые выводы катода; 7 и управляющего электрода; 8 присоединенные через переходные втулки; 9 к гибкому кабелю

В основании имеется кольцевая выточка, в которую непосредственно перед установкой корпуса 10 закладывается кольцевая фторопластовая прокладка. Все это вместе с завальцовкой стыка крышки и основания обеспечивает необходимую степень герметизации. Выводы катодного и управляющего электродов осуществляются через металlostеклянную крышку 11. Основание корпуса изготавливается совместно с нарезным болтом 12.

Управляющее свойство незапираемых тиристоров заключается в возможности их открывания путем подачи к цепи управления управляющий электрод – катод постоянного напряжения или импульса при любой величине прямого напряжения.

3.3. Транзисторы

В настоящее время существует несколько разновидностей транзисторов: биполярные, биполярные транзисторы с изолированным затвором, полевые транзисторы с управляющим полем, полевые транзисторы с изолированным затвором. В зависимости от использования технологии изготовления транзисторы с изолированным затвором подразделяются на транзисторы с индуцированным каналом и транзисторы с встроенным каналом.

В силовой преобразовательной технике полупроводниковые приборы работают в так называемом ключевом режиме. В этом режиме полупроводниковый прибор периодически переходит из одного устойчивого состояния (например, полностью закрытого) в другое (полностью открытое состояние). Эффективность работы в этом режиме различных приборов определяется множеством параметров: частотой переключения, потерями энергии в открытом и закрытом состояниях, потерями энергии при переходе от одного состояния в другое, сложностью и надежностью устройства, осуществляющего управление прибором, работающим в ключевом режиме. При рассмотрении различных полупроводниковых приборов учитываются перечисленные параметры.

В силовой преобразовательной технике в основном применяются два вида транзисторов – полевые и биполярные с изолированным затвором. Эти два вида транзисторов оказали значительное влияние на технологический прогресс в системах электроснабжения, электропривода и других областях.

В настоящее время на этих элементах реализуется наиболее совершенный электропривод ТПЧ-АД.

Полевые транзисторы. Полевыми транзисторами называются приборы, в которых используются подвижные носители зарядов лишь одного типа – электроны или дырки. Отличительной особенностью полевых транзисторов является большое входное сопротивление. Это обусловлено тем, что управляющее напряжение является об-

ратным напряжением относительно р-п перехода. Существуют два типа полевых транзисторов: с управляющим р-п переходом и с изолированным затвором. Транзисторы с изолированным затвором подразделяются на МДП (металл – диэлектрик – полупроводник) и МОП. В последнем транзисторе в качестве диэлектрика используется оксид кремния.

В зависимости от технологии изготовления канала МДП транзисторы подразделяются на транзисторы с индуцированным каналом и транзисторы с встроенным каналом. Графическое изображение различных типов полевых транзисторов приведено на рис. 3.6.

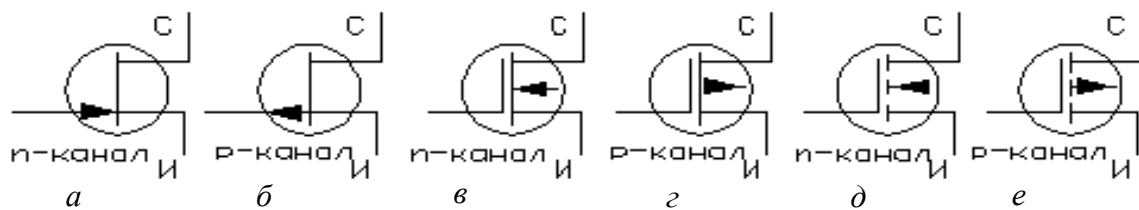


Рис. 3.6. Графическое изображение полевых транзисторов:
а – б – с управляемым переходом; в – г – с встроенным каналом;
д – е – с индуцированным каналом

Структура и характеристики полевого транзистора с управляющим переходом приведены на рис. 3.7.

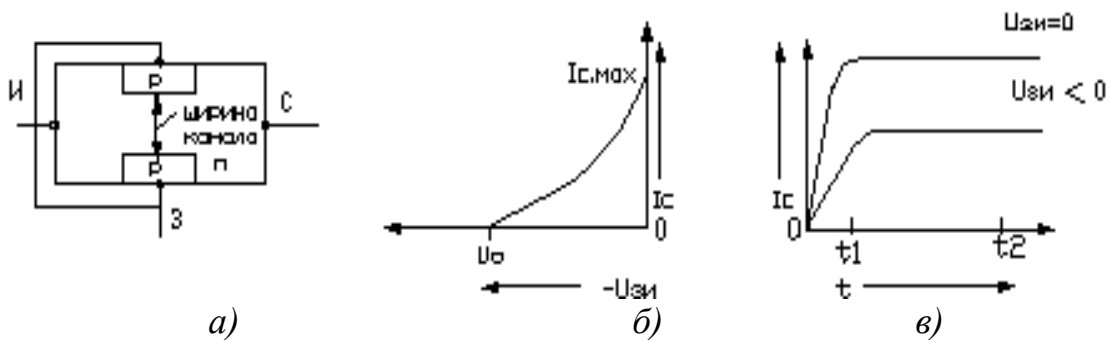


Рис. 3.7. Полевой транзистор:
а – структура; б – стоко-затворная характеристика;
в – вольт-амперные характеристики

Работа полевого транзистора с управляемым р-п переходом основана на изменении ширины (сопротивления) канала путем регулирования обратного напряжения, подводимого к цепи затвор – исток. Подключение выводов транзистора показано на рис. 3.7: 3 – затвор; И – исток и С – сток. При отсутствии напряжения на входе транзи-

стора канал полностью открыт, и ток в цепи исток – сток, будет определяться величиной $U_{си}$ и сопротивлением нагрузки. Максимальное значение $I_{с.мах.}$ называется током отсечки (рис. 3.7, б). Как следует из этого рисунка, по мере увеличения обратного напряжения величина тока I_c снижается до нуля. Величина напряжения U_o , при которой $I_c = 0$, называется напряжением отсечки. В полевом транзисторе так же, как и биполярном, на вольт-амперной характеристике сток – исток два характерных участка: линейно нарастающий $0 - t_1$ и горизонтальный $0 - t_2$.

На втором интервале величина тока I_c с увеличением напряжения $U_{си}$ практически не изменяется, т. е. имеет место известный режим насыщения транзистора. На рис. 3.7, в приведены вольт-амперные характеристики полевого транзистора при двух значениях обратного напряжения на затворе ($U_{зи} = 0$ и $U_{зи} < 0$). При уменьшении обратного напряжения на затворе интервал насыщения смещается в сторону увеличения I_c .

При использовании в канале материала другого типа необходимо изменить полярность напряжений $U_{зи}$ и $U_{си}$.

3.4. Выпрямители

Выпрямителями называются устройства, преобразующие переменное напряжение (ток) в постоянное напряжение (ток). С появлением тиристоров возникла необходимость их разделения на неуправляемые и управляемые.

Неуправляемые выпрямители. Эти выпрямители выполняют только одну функцию – преобразование переменного напряжения в постоянное с жесткой связью между переменными входными и постоянными выходными величинами.

Типовые схемы выпрямителей приведены на рис. 3.8.

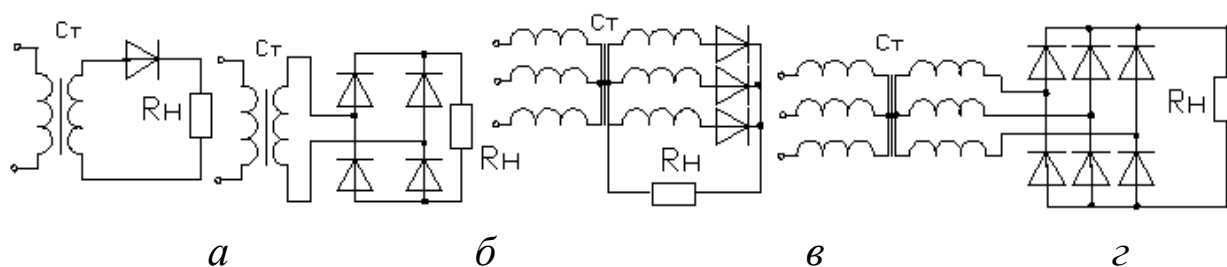


Рис. 3.8. Схемы выпрямителей:

*а – однополупериодная; б – однофазная мостовая;
в – трехфазная нулевая; г – трехфазная мостовая*

Выпрямители подразделяются:

- в зависимости от количества фаз источника питания – на однофазные (рис. 3.8, а, б,) и трехфазные (рис. 3.8, в,г);
- в зависимости от схемы включения вентиля и обмоток трансформатора – на однополупериодные, однофазные мостовые, трехфазные нулевые и трехфазные мостовые;
- по степени управляемости – неуправляемые и управляемые;
- по типу вентиля, установленных в выпрямителях, – диодные, транзисторные, тиристорные и диодно-транзисторные.

Существенное влияние на работу выпрямителя оказывает и характер нагрузки: активная, активно-индуктивная, наличие источника ЭДС в нагрузке.

Рассмотренные схемы выпрямителей различаются параметрами и характеристиками, приведенными в табл. 3.1.

В табл. 3.1 приняты обозначения: I , I_d , U , U_d – действующие и средние значения напряжений и токов нагрузки; I_b , $I_{cp.b}$ – действующее и среднее значение тока вентиля; $U_{обр}$ – максимальное обратное напряжение на вентиле; P_d , P – среднее значение мощности и мощность постоянного тока нагрузки; S_T – расчетная мощность трансформатора.

Приведенные в табл. 3.1 параметры схем выпрямления показывают:

- из однофазных схем лучшие параметры имеет однофазная мостовая;
- из трехфазных схем – трехфазная мостовая.

Управляемые выпрямители. Тиристоры в управляемых выпрямителях включаются по тем же схемам, что и диоды в неуправляемых. Схемы (рис. 3.8.) с тиристорами могут работать в двух режимах: выпрямительном и инверторном. В выпрямительном режиме переменное напряжение, поступающее из сети, преобразовывается в постоянное напряжение и регулируется по величине (средней). В инверторном режиме энергия постоянного тока преобразуется в силовой части в энергию переменного тока и передается в сеть. Поток передаваемой энергии может плавно регулироваться от нуля до некоторой максимальной величины.

Таблица 3.1

Параметры и характеристики выпрямителей

Схема выпрямителя	Характеристики схем выпрямителей						
	$K_{\phi} = \frac{I}{I_d} = \frac{U}{U_d}$	U_d/U_2 $U_d/U_{2\phi}$	U_{o6}/U_d	$\eta = P_d/P$	S_t/P_d	I_B/I_{cp}	$K_{\pi} = \sqrt{k_{\phi}^2} - 1$
Однофазная однополупериодная	1,57	0,45	3,14	,405	3,1	1,57	1,21
Однофазная двухполупериодная	1,11	0,9	3,14	0,81	1,48	1,57	0,482
Однофазная мостовая	1,11	0,9	1,57	0,81	1,21	1,57	0,482
Трехфазная нулевая	1,04	0,67	2,09	0,97	1,345	1,76	0,286
Трехфазная мостовая	1,001	1,35	1,045	0,998	1,05	1,73	0,045

Оба режима широко используются в приводах постоянного и переменного тока. При работе электрической машины в двигательном режиме схема работает в выпрямительном режиме, где с помощью системы управления тиристорами регулируются частота вращения двигателя и скорость движения рабочего механизма. Возможность работы схемы в инверторном режиме позволяет реализовать наиболее экономичный режим торможения с передачей энергии в сеть.

В схеме, приведенной на рис. 3.9, к тиристорному периодическому подводится прямое (в интервале $0 - t_2$) и обратное (в интервале $t_2 - t_3$) напряжение. В отличие от диода, тиристор закрыт как при прямом, так и при обратном напряжении. Если подать импульс напряжения на управляющий электрод тиристора, то он откроется и в таком состоянии будет находиться до прерывания тока в цепи анод-катод или снижения его до некоторой небольшой величины, называемой током удержания.

В схеме, приведенной на рис. 3.9, управляющий импульс подан при прямом напряжении на аноде тиристора (момент t_1). Тиристор

откроется и останется в открытом состоянии, и после исчезновения импульса при условии, что ток в цепи анод – катод будет больше тока удержания. В конце положительного полупериода после снижения тока нагрузки до величины тока удержания тиристор закрывается, и в таком состоянии он будет находиться до поступления очередного управляющего импульса. С момента t_3 процесс повторяется. Очевидно, что с изменением момента подачи управляющего импульса будет изменяться часть положительной полусинусоиды, пропускаемой к нагрузке, и среднее значение выпрямленного напряжения U_d . Интервал времени от начала положительной полусинусоиды до фронта импульса, выраженный через угол α , называется углом регулирования управляющих импульсов.

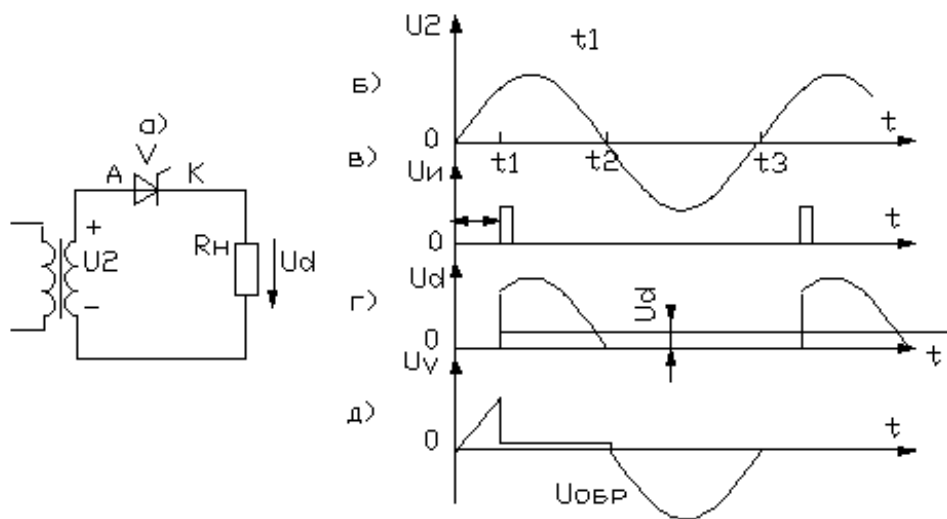


Рис. 3.9 Схема (а) и диаграммы напряжений (б, в, г, д), поясняющие работу схемы

В однофазных схемах выпрямления зависимость выпрямленного напряжения от угла регулирования α , определяется уравнением

$$U_d = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2},$$

где U_{d0} – максимальное выходное напряжение выпрямителя (В однополупериодной схеме $U_{d0} = 0,45E_2$, в однофазной мостовой – $U_{d0} = 0,9E_2$).

Инверторы, ведомые сетью или зависимые инверторы. Работа однополупериодной схемы в инверторном режиме поясняется диаграммами напряжений и токов, приведенными на рис. 3.10. Схема

может работать в инверторном режиме при наличии источника постоянного тока в цепи нагрузки и если полярность напряжения этого источника имеет прямое направление относительно тиристора.

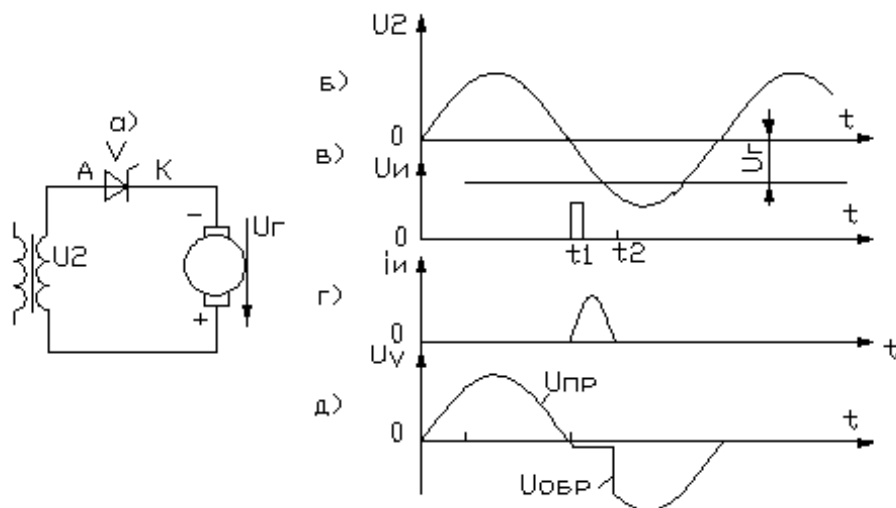


Рис. 3.10. Схема (а), диаграммы напряжений и токов (б, в, г, д), поясняющие работу однополупериодной схемы в инверторном режиме.

Вентили выбираются по допустимому повторяющемуся обратному напряжению $U_{\text{п}}$ и длительно допустимому току нагрузки $I_{\text{п}}$. Максимальная величина обратного напряжения на вентильях зависит от схемы выпрямителя и величины выпрямленного напряжения $U_{\text{д}}$:

- в однополупериодной схеме $U_{\text{о.мах.}} = 3,14 U_{\text{д}}$;
- в однофазной мостовой $U_{\text{о.мах.}} = 1,57 U_{\text{д}}$;
- в трехфазной нулевой $U_{\text{о.мах.}} = 2,09 U_{\text{д}}$;
- в трехфазной мостовой $U_{\text{о.мах.}} = 1,045 U_{\text{д}}$.

Пример 3.1. Для электропривода тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока (ТП-Д) рассчитать и выбрать элементы силовой части преобразователя: согласующий трансформатор и тиристоры.

Основные технические данные двигателя: $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$; $I_{\text{в}} = 745 \text{ А}$; $I_{\text{мах}} = 2,5 I_{\text{н}}$.

Основные соотношения и параметры трехфазной мостовой схемы: $K_{\text{У}} = 0,427$; $K_{\text{С}} = 1,045$; $K_{\text{Л}} = 0,817$; $K_{\text{а}} = 3$.

Расчетная схема преобразователя приведена на рис. 3.11.

ЭДС $E_{2\text{ф}}$ на вторичной обмотке трансформатора

$$E_{2\phi} = K_u \cdot K_c \cdot K_\alpha \cdot K_R \cdot U_n, \quad (3.1)$$

где K_c – коэффициент, учитывающий возможность снижения напряжения в питающей сети (при снижении напряжения на 5–10 % $K_c = 1,05$ –1,1); K_R – коэффициент, учитывающий падение напряжения внутри преобразователя ($K_R = 1,05$ –1,1); K_α – коэффициент, учитывающий неполное открывание тиристоров при минимальном угле регулирования ($K_\alpha = 1$ –1,15).

После подстановки коэффициентов получаем

$$E_{2\phi} = 0,427 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 220 = 125 \text{ В.}$$

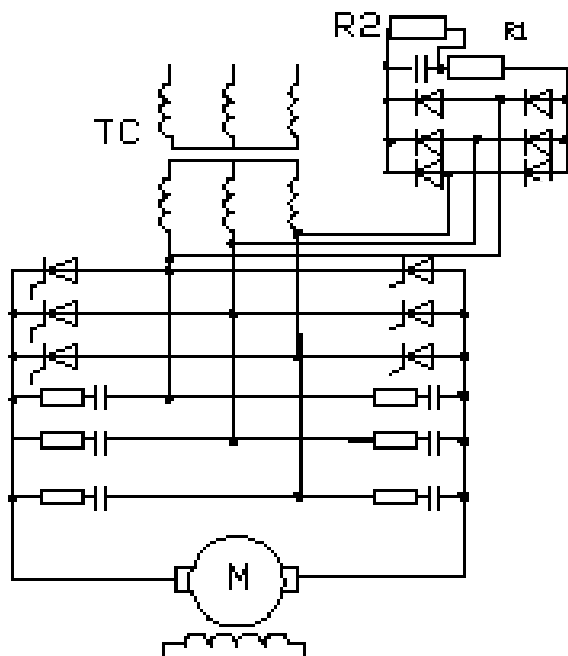


Рис. 3.11. Расчетная схема одного комплекта тиристорного преобразователя

Действующее значение фазного тока вторичной обмотки трансформатора

$$I_{2\phi} = K_i \cdot K_{I2} \cdot I_n, \quad (3.2)$$

где K_i – коэффициент, учитывающий отклонение формы тока от прямоугольной ($K_i = 1,05$ – 1,1). Принимаем $K_i = 1,1$, тогда

$$I_{2\phi} = 1,1 \cdot 0,817 \cdot 745 = 669 \text{ А.}$$

Действующее значение тока в первичной обмотке трансформатора

$$I_{1\phi} = 1,1 \cdot 0,817 \cdot 745 / 34 = 19,7 \text{ А},$$

$$\text{где } K_{\text{тр}} = 0,95 \cdot U_{1\phi} / E_{2\phi} = 0,95 \cdot 4468 / 125 = 34.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_{\text{T}} = 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,1 \cdot 1,045 \cdot 220 \cdot 745 = 250 \text{ кВА}.$$

К установке принимаем трансформатор ТЗСП-250 с техническими данными

$$U_1 = 6000 \text{ В}; \quad U_{\text{к}} = 5,4\%; \quad \Delta p_{\text{к}} = 3 \text{ кВт};$$

Ток холостого хода трансформатора обычно составляет 3% номинального тока.

По техническим данным трансформатора определяем по формуле

$$R_{\text{тр}} = \Delta p_{\text{к}} / 3 \cdot I_1^2 \cdot K_{\text{тр}} \quad (3.3)$$

$$R_{\text{тр}} = 3000 / 3 \cdot 19,7^2 \cdot 34 = 0,015 \text{ Ом},$$

$$\begin{aligned} X_{\text{тр}} &= \sqrt{(U_{\text{к}}\% \cdot U_{1\phi} / 100 \cdot I_{1\phi} \cdot K_{\text{тр}}^2)^2 - R_{\text{тр}}^2} \\ &= \sqrt{5,4 \cdot 4468 / 100 \cdot 19,7 \cdot 34^2} - 0,03^2 = 0,03 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

$$L_{\text{тр}} = 0,5 \cdot X_{\text{тр}} / \omega = 0,5 \cdot 0,03 / 314 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}.$$

Полученные величины параметров трансформатора необходимы для построения статических характеристик и при проектировании системы регулирования

Расчет и выбор тиристоров [7]. Длительно допустимый ток тиристоров в трехфазной мостовой схеме определяем по формуле

$$I_{\text{п}} = K_{\text{зи}} \cdot K_{\text{сх}} \cdot K_{\text{ох}} \cdot I_{\text{ср}}, \quad (3.4)$$

где $K_{\text{зи}}$ – коэффициент запаса по току (принимают в пределах 1,3–1,4);

$K_{\text{ох}}$ – коэффициент, учитывающий условия охлаждения ($K_{\text{ох}} = 2,5$ – при естественном охлаждении, $K_{\text{ох}} = 1$ при принудительном охлаждении).

Величину среднего тока определяем с учетом максимально допустимой перегрузки двигателя

$$I_{cp} = I_{max} / K_a = 2,5 \cdot 745 / 3 = 680 \text{ A.}$$

Принимаем принудительное охлаждение.

$$I_{п} = 1,4 \cdot 1,1 \cdot 680 = 1047 \text{ A.}$$

Амплитуда обратного повторяющегося напряжения

$$U_{п} = K_{zu} \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} E_{2ф}, \quad (3.5)$$

где K_{zu} – коэффициент запаса по напряжению ($K_{zu} = 1,3 - 1,4$).

$$U_{п} = 1,4 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{3} \cdot 125 = 469 \text{ В.}$$

К установке принимаем тиристоры Т171 – 1250, кл. 5 с техническими данными $I_{п} = 1250 \text{ A}$, $U_{п} = 500 \text{ В}$.

4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

4.1. Машины постоянного тока

4.1.1. Устройство и принцип действия машин постоянного тока

Машины постоянного тока (рис. 4.1) [8] как генераторы, так и двигатели, устроены одинаково. Их основными частями являются статор (станина с главными 5 и добавочными полюсами) и якорь. На главных полюсах расположена обмотка возбуждения 6. Чтобы уменьшить потери от вихревых токов, главные полюсы изготавливают из листовой электротехнической стали. На сердечниках главных полюсов размещена обмотка возбуждения, представляющая собой катушки с медными изолированными проводами круглой или прямоугольной формы.

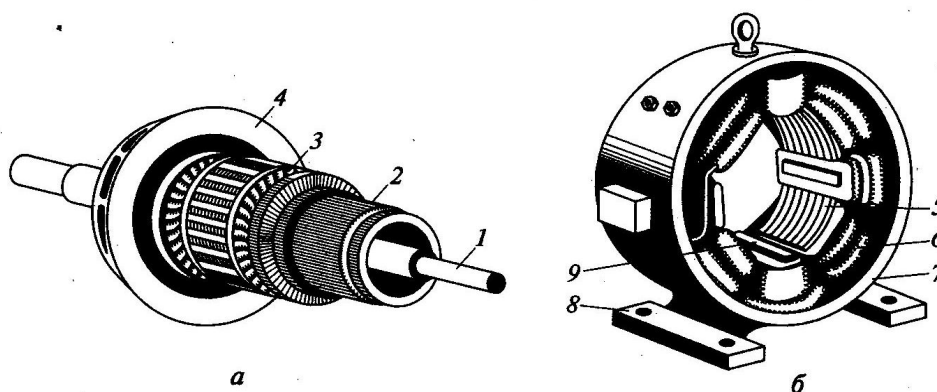


Рис. 4.1. Машина постоянного тока:

1 – вал; 2 – коллектор; 3 – якорь; 4 – передний подшипниковый щит;
5 – главные полюсы; 6 – обмотка возбуждения; 7 – станина; 8 – лапа;
9 – дополнительный полюс

Якорь 3 представляет собой цилиндр, вращающийся в пространстве между полюсами. Он состоит из зубчатого сердечника, уложенной на нем обмотки якоря, коллектора 2 и щеточного аппарата (на схеме не показан). Выводы секций обмотки якоря соединены с коллекторными пластинами. Подключение якорной цепи двигателя постоянного тока к источнику питания осуществляется посредством щеток, расположенных в щеткодержателях, способных перемещать щетки по окружности

Коллектор (рис. 4.2) собирают из отдельных медных пластин 8 трапецеидального сечения (ламелей), изолированных друг от друга

прокладками из твердого миканита. После сборки с помощью нажимного фланца 6, «ласточкина хвоста» 7 и шпильки 5 пластины коллектора закрепляются на стальной втулке 3, от которой они изолируются специальными манжетами 2 из формовочного миканита. Стальная втулка насаживается на вал 4. Чтобы не вызывать вибрацию щеток, коллектор должен иметь строго цилиндрическую форму, а миканитовые прокладки, устанавливаемые между пластинами, не должны выступать. Поэтому прокладки между пластинами коллектора профрезеровывают на 0,8 – 1,5 мм ниже поверхности коллектора. Секции обмотки якоря впаиваются в прорези, имеющиеся в выступающей части коллекторных пластин 1. Эти части пластин называются «петушками». Щетки изготовляют в виде прямоугольных брусков 4 (рис. 4.3), помещенных в обойму 3 щеткодержателя. Для улучшения контакта коллектора с внешней цепью, щетки прижимаются к поверхности коллектора пружинами 2, имеющими щеточные канатники 1.

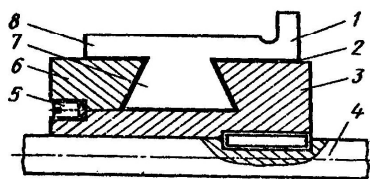


Рис. 4.2

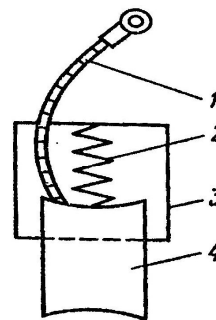
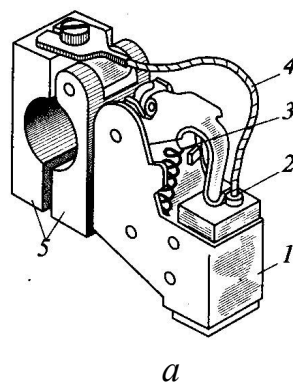
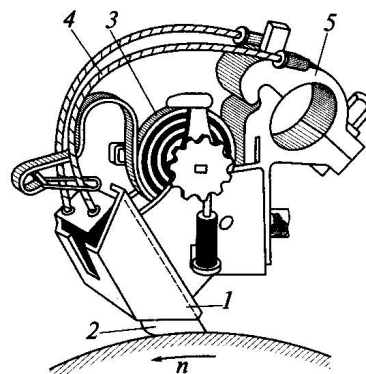


Рис. 4.3

Наибольшее распространение получили два типа щеткодержателей (рис. 4.4): с вертикальным (а) и горизонтальным (б) расположением щеток.



а



б

Рис. 4.4. Расположение щеток в щеткодержателях:

а – радиальное; б – наклонное

Траверсу можно поворачивать и, следовательно, изменять положение щеток по отношению к полюсам машины. Коллектор можно рассматривать в качестве преобразователя частоты, связывающего сеть постоянного тока с обмоткой якоря, через которую проходит переменный ток.

На главных полюсах размещаются обмотки возбуждения. В зависимости от способа включения обмотки возбуждения относительно обмотки якоря машины постоянного тока могут иметь независимое, параллельное, последовательное и смешанное возбуждение.

Графическое изображение машин постоянного тока с различным способом включения обмоток возбуждения показано на рис. 4.5.

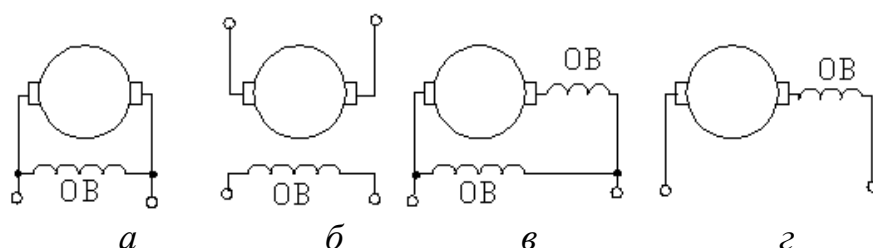


Рис. 4.5. Способы включения обмоток возбуждения:
а – параллельное; б – независимое; в – смешанное,
г – последовательное

Машина постоянного тока обратима. При наличии тока в обмотке возбуждения и вращении якоря она преобразует механическую энергию в электрическую, т. е. работает генератором. При подведении напряжения к якорной цепи взаимодействие тока якоря с магнитным потоком, создаваемым потоком возбуждения, образует вращающий момент, и электрическая машина преобразует электрическую энергию в механическую, т. е. работает двигателем. Для оценки электромеханических свойств двигателей при работе в двигательном и тормозном режимах используют механические и электромеханические характеристики.

4.1.2. Электромеханические свойства двигателей постоянного тока

Аналитические выражения характеристик машины постоянного тока при ее работе в двигательном режиме могут быть получены из уравнения равновесия напряжений в якорной цепи.

$$U_d - I_a R - E = 0, \quad (4.1)$$

где I_a – ток в якорной цепи;

$R = R_a + R_{ко} + R_{дп}$ – суммарное сопротивление якорной цепи;

$E = c\Phi\omega$ – ЭДС двигателя.

Подставляя значение E в уравнение (4.1) и решая его относительно угловой скорости ω , получим аналитическое выражение зависимости угловой скорости от тока нагрузки (электромеханическая характеристика)

$$\omega = \frac{U_d}{k\Phi} - \frac{R}{k\Phi} I. \quad (4.2)$$

Для получения аналитического выражения зависимости угловой скорости ω , от момента нагрузки (механическая характеристика) воспользуемся зависимостью момента от тока I и магнитного потока Φ

$$M = k\Phi I. \quad (4.3)$$

Подставляя значение тока из уравнения (4.3) в уравнение (4.2), получим уравнение механической характеристики

$$\omega = \frac{U_d}{k\Phi} - \frac{R}{k^2 \Phi^2} M. \quad (4.4)$$

Электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока могут быть построены по его каталожным данным, в которых приводятся: U_n , I_n , n_n , η_n и R_a , $R_{дп}$, $R_{ко}$.

Необходимые дополнительные параметры, отсутствующие в справочной литературе на двигатели, определяют из выражений

$$R_a = 0,5 (1 - \eta_n) \frac{U_n}{I_n} \cdot \text{Ом}; \quad (4.5)$$

$$\omega_n = \pi n_n / 30, \text{ рад/с}; \quad (4.6)$$

$$M_n = 9550 P_n / n_n \cdot \text{Н} \cdot \text{м}. \quad (4.7)$$

Характеристики (4.2) и (4.4) линейны и для их построения достаточно определить, две точки. При построении электромеханической характеристики в качестве этих точек обычно принимают

$$1. \omega = \omega_0; I = 0. \quad 2. \omega = \omega_n; I = I_n.$$

Величина ω_n определяется по формуле (4.6). При идеальном холостом ходе ($I = 0$) угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = U / k\Phi_n.$$

Аналогичными координатами механической характеристики являются

$$1. \omega = \omega_0; M = 0. \quad 2. \omega = \omega_n; M = M_n.$$

Пример 4.1. Для двигателя постоянного тока независимого возбуждения рассчитать и построить естественные электро-механическую и механическую характеристики. Паспортные данные двигателя: $P_n = 35$ кВт; $U_n = 220$ В; $I_n = 185$ А; $n_n = 575$ об/мин. (60,1 p/c)

$$\eta_n = 1000 P_n / U_n I_n = 1000 \cdot 35 / 220 \cdot 185 = 0,86;$$

$$R_a = 0,5(1 - 0,86)U_n / I_n = 0,0835 \text{ Ом};$$

$$M_n = 9550 \cdot P_n / n_n = 9550 \cdot 35 / 575 = 585 \text{ Н} \cdot \text{м} (59,63 \text{ кг} \cdot \text{м});$$

$$K\Phi_n = \frac{U_n - I_n R_a}{n_n} = \frac{220 - 185 \cdot 0,0835}{575} = 0,36$$

$$n_0 = U_n / K\Phi_n = 220 / 0,36 = 611 \text{ об/мин. (64 p/c)}.$$

В качестве координаты второй точки могут быть $n_n (\omega_n)$, I_n – (для электро-механической характеристики) и $n_n (\omega_n)$, M_n – (для механической характеристики).

Характеристики, построенные по данным расчетов, приведены на рис. 4.6.

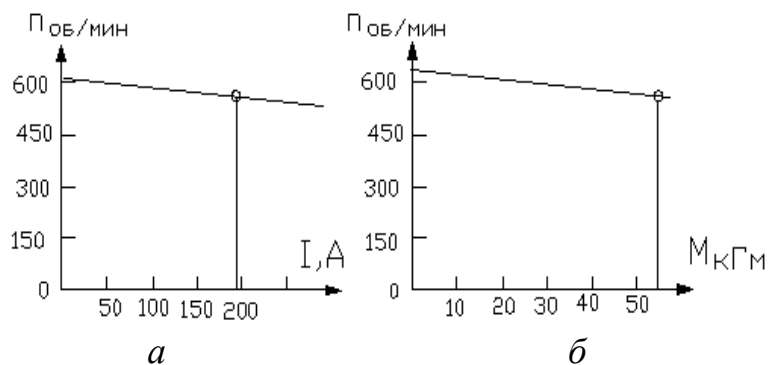


Рис. 4.6. Характеристики:
а - электро-механическая; б - механическая

Эти характеристики можно построить, используя величины падения частоты вращения двигателя при изменении нагрузки от 0 до I_n или M_n .

$$\Delta\omega_n = R I_n / k\Phi_n \text{ и } \Delta\omega_n = R M_n / k^2 \Phi_n$$

Электрический привод, основным элементом которого является электродвигатель, используется для приведения в действие машин и рабочих механизмов. В большинстве случаев наилучшее их использование достигается при высоких регулировочных свойствах электропривода. Эти свойства в основном достигаются посредством регулирования частоты вращения двигателей.

Характеристики двигателей подразделяются на естественные и искусственные. Характеристики, полученные при номинальном напряжении на обмотке якоря ($U = U_n$), номинальном магнитном потоке ($\Phi = \Phi_n$) и при отсутствии дополнительных резисторов в якорной цепи, называются естественными. При изменении любого из параметров в уравнении (4.2) или (4.4) характеристики двигателя будут отличаться от естественной характеристики. Это свойство двигателей постоянного тока используют для искусственного получения требуемых характеристик и регулирования частоты их вращения.

В зависимости от параметра, изменением которого осуществляют регулирование частоты вращения, различают три способа регулирования:

- изменением напряжения, подводимого к якорной цепи (основной способ);
- изменением магнитного потока основных полюсов;
- введением в цепь якоря дополнительного резистора (реостатный способ).

Для оценки эффективности различных способов регулирования частоты вращения всех типов электрических двигателей используют несколько общих показателей: диапазон, плавность, направление и экономичность регулирования.

Диапазон регулирования. Отношение максимальной скорости к минимальной ($D = \omega_{\max} / \omega_{\min}$) при номинальном значении момента статической нагрузки и заданной перегрузочной способности принято называть диапазоном регулирования. Определение диапазона регулирования поясняется механическими характеристиками, приведенными на рис. 4.7 а.

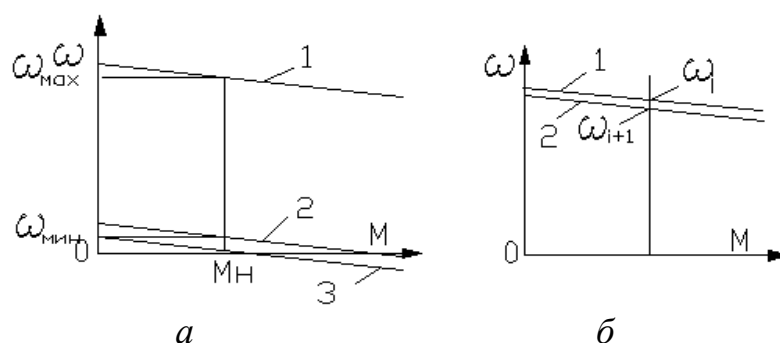


Рис. 4.7. Иллюстрация показателей регулирования частоты вращения:
а – диапазона регулирования, б – плавности регулирования

Максимальная частота вращения двигателя $\omega_{\max}$ принимается на характеристике 1, ограничивающей сверху диапазон регулирования, при $M = M_n$. Диапазон регулирования снизу ограничивает характеристика, на которой обеспечивается заданная перегрузочная способность ($K_m = M_{\max}/M_n$). При заданной величине $M_{\max} = 2M_n$ минимальная частота вращения $\omega_{\min}$ находится на характеристике 2. Все характеристики, расположенные ниже этой, не обеспечивают заданной перегрузочной способности двигателя.

Принято диапазон регулирования частоты вращения выражать в виде отношения, например 5:1, 80:1 и др.

Плавность регулирования. Плавность регулирования частоты вращения двигателей оценивается коэффициентом плавности $K_{пл} = \omega_{i+1}/\omega_i$, представляющим собой отношение угловых скоростей на двух соседних искусственных механических характеристиках (рис. 4.7, б), где

$\Delta\omega = (\omega_i - \omega_{i+1})$ – минимальная ступень частоты вращения двигателя, в пределах которой скорость не регулируется. Чем ближе $K_{пл}$ к 1, тем выше плавность регулирования и качество системы электропривода.

Направление регулирования. Различают направление регулирования «Вверх» и «Вниз» от основной характеристики. Регулирование только «Вверх» или «Вниз» называется однозонным регулированием. При двухзонном регулировании частота вращения двигателя регулируется как «Вверх», так и «Вниз» от номинальной.

Экономичность регулирования. Этот показатель определяется затратами на создание системы электропривода и поддержание ее в работоспособном состоянии в течении всего периода эксплуатации.

Основными составляющими эксплуатационных расходов являются стоимость потерь электроэнергии при регулировании и дополнительные затраты на приобретение оборудования. Перечисленные показатели в основном используются при сравнительной оценке различных способов регулирования частоты вращения всех типов электрических двигателей.

4.1.3. Способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока

Из уравнений (4.2) и (4.4) следует, что искусственные характеристики двигателя постоянного тока можно получать путем изменения трех параметров: напряжения, подводимого к якорю, магнитного потока и сопротивления якорной цепи (путем введения в якорную цепь дополнительного резистора).

Примем, что при регулировании скорости изменением одного из параметров другие параметры остаются неизменными.

Регулирование частоты вращения двигателя изменением напряжения на якоре. $\Phi = \Phi_n$, $R_{доп} = 0$.

Из $\omega_0 = U / k\Phi_n$ следует что при изменении напряжения на якоре от максимальной величины до нуля частота вращения вала двигателя будет изменяться в пределах $\omega_0 - 0$. Известно, что с увеличением нагрузки двигателя его частота вращения будет снижаться. Темп снижения при принятых условиях будет определяться величинами $\Delta\omega_n = R I_n / k\Phi_n$ и $\Delta\omega_n = R M_n / k^2 \Phi^2$, т. е жесткость механических характеристик не зависит от величины напряжения на якоре. Электромеханическая и механическая характеристики двигателя постоянного тока с независимым возбуждением при различных величинах напряжения на якоре показаны на рис.4.8.

Регулирование частоты вращения двигателя изменением магнитного потока. Для оценки этого способа регулирования снова обратимся к уравнениям (4.2) и (4.4), т. е. и при этом способе регулирования характеристики двигателя также линейны и для их построения достаточно иметь две определенные координаты: 1. $\omega_0 = U / k\Phi$; $I = 0$; 2. $\omega = 0$; $I = I_k$. (для электромеханической характеристики) и 1. $\omega_0 = U / k\Phi$; $M = 0$; 2. $\omega = 0$; $M = M_k$. (для механической характеристики).

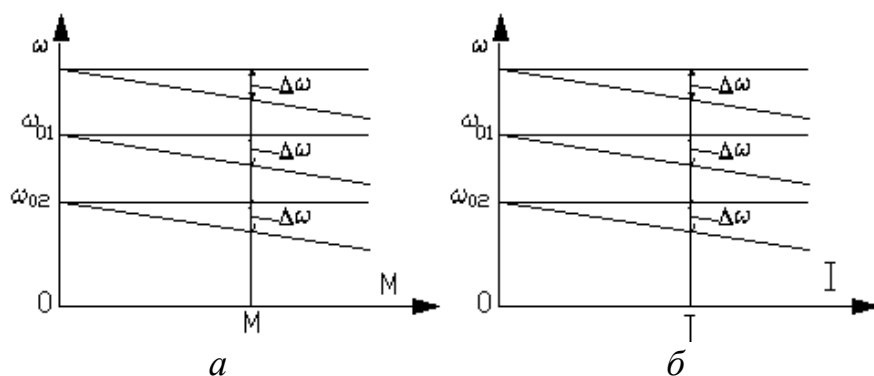


Рис. 4.8. Характеристики двигателя при регулировании напряжением на якоре:

а – механические; б – электромеханические

Из $\omega_0 = U/k\Phi$ очевидно, что при $U = \text{const}$ изменением магнитного потока можно реализовать двухзонное регулирование: при $\Phi > \Phi_n$ частота вращения будет регулироваться «Вниз» и наоборот. Однако частоту вращения двигателя «Вниз» не регулируют по двум причинам: 1) при номинальном токе возбуждения магнитный поток находится на кривой намагничивания в области насыщения; 2) обмотка возбуждения рассчитывается на номинальный ток возбуждения. Даже при кратковременной перегрузке по току перегрев обмотки возбуждения может привести к повреждению ее изоляции. Поэтому частоту вращения двигателя регулируют только ослаблением магнитного потока, т. е. «Вверх» от номинальной. В тех случаях, когда необходимо двухзонное регулирование, используют еще и основной способ – изменением напряжения на якоре.

Характеристики двигателя, полученные при ослаблении магнитного потока, приведены на рис. 4.9.

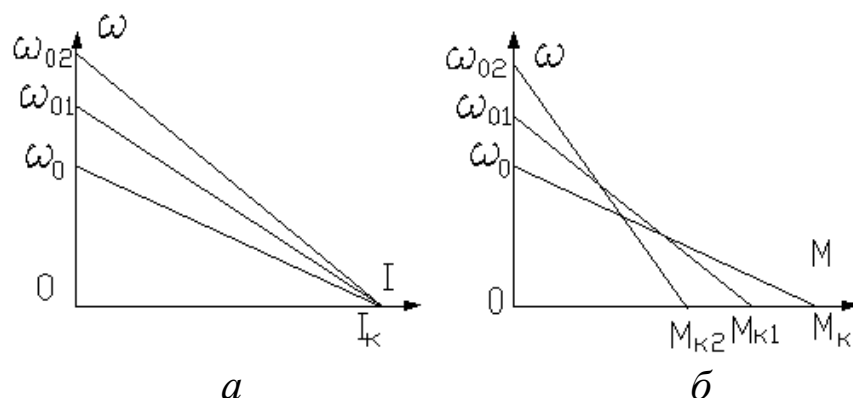


Рис. 4.9. Характеристики двигателя:

а – электромеханическая; б – механическая

Из характеристик следует, что величина тока короткого замыкания I_k зависит только от величины напряжения на якоре и сопротивления якорной цепи. Анализ механических характеристик показывает, что существенное повышение частоты вращения при ослаблении магнитного тока происходит только на холостом ходу и при малых нагрузках (до 15 %). Достоинством этого способа является простота реализации и возможность организовывать двухзонное регулирование частоты вращения. Широкое применение этот способ находит в электроприводе механизмов с повторно кратковременным режимом работы (основные механизмы мостовых кранов). Здесь имеется большое количество интервалов работы двигателя на холостом ходу и при малых нагрузках.

В приводе спускоподъемных агрегатов буровых установок ослаблением магнитного потока достигается работа двигателя с постоянной мощностью, т. е. более полное использование мощности двигателя.

Реостатное регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока с независимым возбуждением ввиду его множества недостатков не находит широкого практического применения.

4.1.4. Способы торможения двигателей постоянного тока

Электродвигатели постоянного тока независимого возбуждения имеют три способа электрического торможения: рекуперативное, динамическое, противовключением.

При любом из перечисленных способов торможения электрическая машина работает в генераторном режиме. Переключение машины постоянного тока из двигательного режима в режим динамического торможения поясняется схемой и характеристиками, приведенными на рис. 4.10.

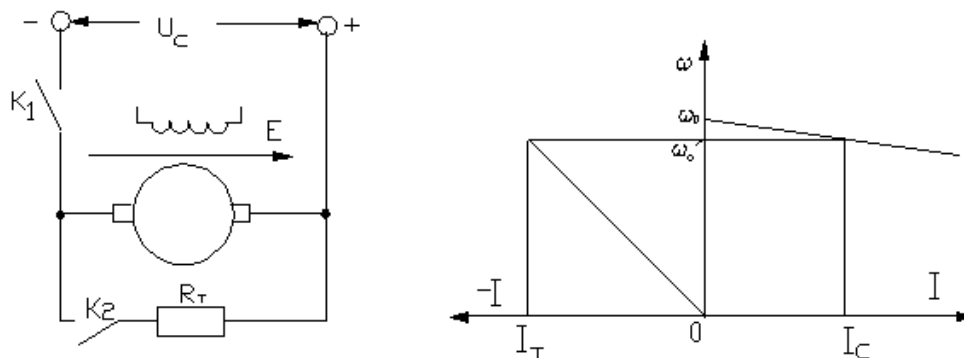


Рис. 4.10. Динамическое торможение:
а – электрическая схема, б – характеристики

Исходное состояние схемы: ключ K_1 замкнут, ключ K_2 разомкнут. Машина работает в двигательном режиме с током нагрузки I_c и частотой вращения ω_c . До переключения ток нагрузки определяется выражением

$$I_c = \frac{U - E}{R + R_t} \quad (4.8)$$

После перевода двигателя в режим динамического торможения (размыканием ключа K_1 и замыканием ключа K_2) ток в якорной цепи изменяет направление

$$I_T = \frac{-E}{R + R_T} \quad (4.9)$$

где $E = k\Phi\omega_c$, R_T – сопротивление дополнительного резистора, подключенного к двигателю. Подставив значение E в уравнение (4.9) и решив его относительно ω , получим

$$\omega = - \frac{R + R_T}{k\Phi} I \quad (4.10)$$

Зависимость частоты вращения ω от тока якоря I , представленная выражением (4.10), является электромеханической характеристикой двигателя в режиме динамического торможения. Характеристику $\omega = f(M)$ получим, подставив значение тока $I = M / k\Phi$ в уравнение (4.10).

$$\omega = - \frac{R + R_T}{k^2\Phi^2} M \quad (4.11)$$

Уменьшение тормозного момента по мере снижения частоты вращения является основным недостатком этого способа.

Существует множество механизмов, основная работа которых связана с подъемом и опусканием грузов. Регулирование скорости опускания грузов осуществляется переводом двигателя в тормозной режим.

Для создания тормозного момента в период опускания груза могут быть использованы все три способа торможения.

Схемы, обеспечивающие электрическое торможение при работе на опускание груза (колонны труб и др.) приведены на рис. 4.11.

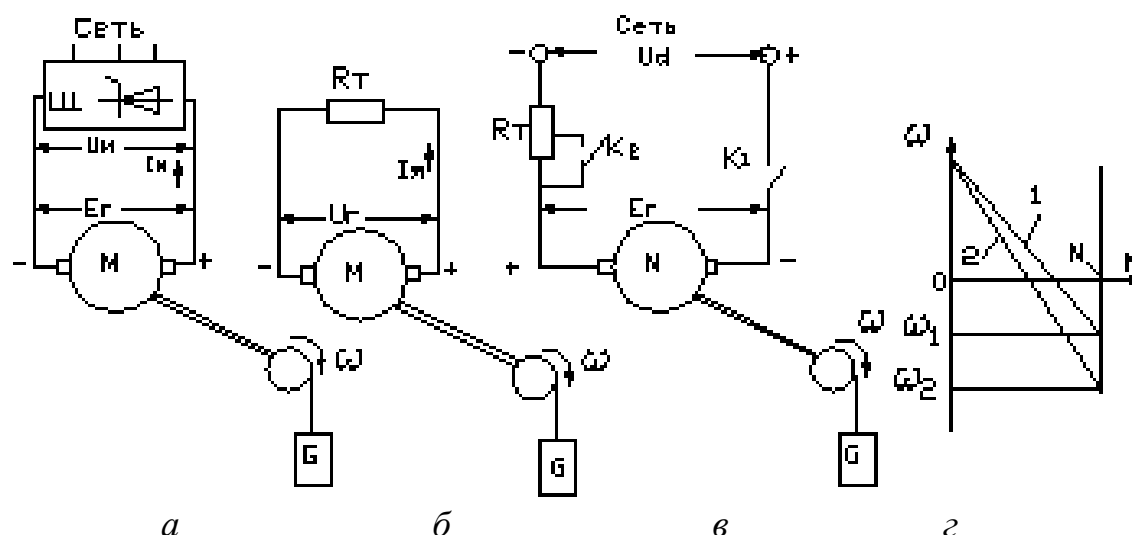


Рис. 4.11. К пояснению режимов торможения:

а – рекуперативного, б – динамического; в – противовключением, г – характеристики двигателя при торможении противовключением

В схеме на рис. 4.11, *а* тиристорный преобразователь (ТП) работает в инверторном режиме, и ток в цепи якоря, создающий тормозной момент, определяется выражением

$$I_{и} = (U_{Г} - U_{и})/R_{э}, \quad (4.12)$$

где $U_{и}$ – выходное напряжение ТП, работающего в инверторном режиме; $R_{э} = R_{Т} + R_{я}$ – сопротивление силовой цепи.

Создаваемый ток инвертора $I_{и}$ тормозной момент $M_{Т}$ можно изменять регулированием напряжения инвертора в широких пределах и плавно регулировать скорость опускания груза. Из рассмотренного следует, что применение регулируемого источника питания, способного работать в инверторном, ведомым сетью, позволяет реализовать торможение с передачей энергии в сеть в широком диапазоне частоты вращения двигателя.

В схеме, приведенной на рис. 4.11, *б*, после растормаживания механизма генератор под действием груза будет вращаться в сторону его опускания с нарастающей частотой. С таким же темпом будет возрастать ток генератора $I_{Г} = U_{Г}/R$, и тормозной момент $M_{Т} = k\Phi I_{Г}$. После достижения $M_{Т}$ величины момента, $M_{Г} = r_{б} G$ груз будет опускаться с постоянной скоростью. Очевидно, что с увеличением сопротивления резистора $R_{Т}$ тормозной момент будет уменьшаться,

равенство $M_G = r_6 G$ будет наступать при большей скорости, т.е. возрастет скорость опускания груза. В настоящее время существуют устройства на полупроводниковых приборах, обеспечивающие плавное регулирование величины сопротивления якорной цепи генератора. Соответственно будет изменяться и скорость опускания груза. Рассмотренный способ относится к динамическому торможению, при котором энергия, вырабатываемая генератором, расходуется в тормозном резисторе и в обмотках якоря.

Процесс торможения против включением реализуется в схеме на рисунке 4.11,в. В тех случаях, когда двигатель получает питание от нерегулируемого источника постоянного тока, то на период пуска и при необходимости регулировать частоту вращения под нагрузкой в якорную цепь включают реостаты (реостатный способ регулирования). При этом способе жесткость (наклон) характеристик и величина пускового момента зависят от величины сопротивления дополнительного резистора, включенного в якорную цепь. На рисунке 4.11.г показаны две характеристики: 1- при замкнутом ключе K_2 и 2 – при разомкнутом ключе.

Если включить электрическую машину на подъем тяжелого груза, создаваемый момент которого будет превышать пусковой момент двигателя, то под его действием двигатель будет вращаться с возрастающей скоростью в противоположную сторону до установления равновесия $M = M_r$. В этом случае величина тока якоря будут определяться выражением

$$I = (U_r + U_n) / (R_r + R_T) \quad (4.13)$$

При работе на характеристике 1 в установившемся режиме вращение двигателя, работающего в генераторном режиме, будет происходить с частотой вращения ω_1 . Очевидно что, если перевести двигатель на характеристику 2 размыканием ключа K_2 , то равенство моментов $M = M_r$ наступит при частоте вращения двигателя ω_2 и опускание груза будет происходить с большей скоростью, чем при работе на характеристике 1. Плавность регулирования скорости опускания груза будет зависеть от плавности регулирования величины сопротивления резистора R_T .

Недостатком этого способа торможения является большой расход электроэнергии. В процессе торможения на дополнительном

резисторе R_T , имеющим значительно большую величину сопротивления, чем при динамическом торможении, также увеличиться и расход энергии.

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте принцип действия двигателей постоянного тока.
2. Какие зависимости определяют электромеханические свойства двигателей постоянного тока?
3. Перечислите способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока.
3. В чем различие между естественными и искусственными характеристиками двигателей постоянного тока?
4. Укажите способы изменения направления вращения двигателей.
5. Каким способом можно обеспечить двухзонное регулирование частоты вращения вала двигателя?
6. Причины искрения в двигателях постоянного тока.
7. Дополнительные полюсы, устройство, назначение.
Укажите наиболее экономичный способ торможения двигателей.
8. Дайте сравнительную оценку трем способам регулирования частоты вращения.
9. Допустимый ток у двигателя постоянного тока $I_n = 2,5 I_n$. Чем вызвано такое ограничение?
10. Укажите допустимый осевой сдвиг вала двигателя.

4.2. Асинхронные двигатели

4.2.1. Устройство и принцип действия

Асинхронные двигатели так же, как и двигатели постоянного тока, состоят из неподвижной части, называемой статором, и вращающейся части, называемой ротором.

Асинхронные двигатели выпускаются двух типов, отличающихся конструкцией ротора [8]. На рис. 4.12 показана конструктивная схема поперечного разреза асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Его статор состоит из станины 1, сердечника 2 и обмотки статора 3. Сердечник ротора 4 запрессован на вал 5. На выходные концы вала насажены подшипники 6, установленные в подшипниковом щите 7.

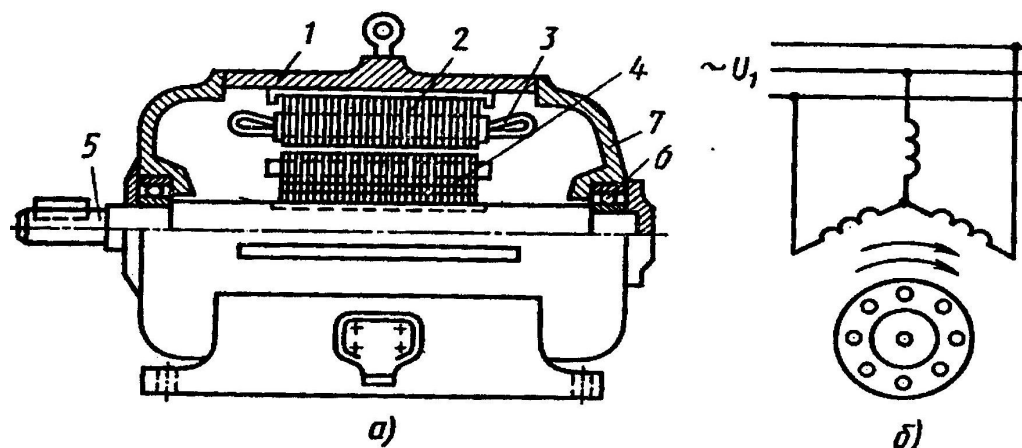


Рис. 4.12. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором:
а – поперечный разрез; б – схема включения

Сердечник статора представляет собой полый цилиндр с пазами на внутренней поверхности. В пазы уложены три фазные обмотки 2 (рис. 4.13, а), сдвинутые друг относительно друга на 120° .

Обмотка ротора бывает двух типов: короткозамкнутая типа беличьей клетки (рис. 4.13, а) и фазная (рис. 4.14, б), состоящая из медных изолированных проводов. Обмотка короткозамкнутого ротора из сплава алюминия заливается в пазы одновременно с замыкающими кольцами с вентиляционными лопатками на их торцах.

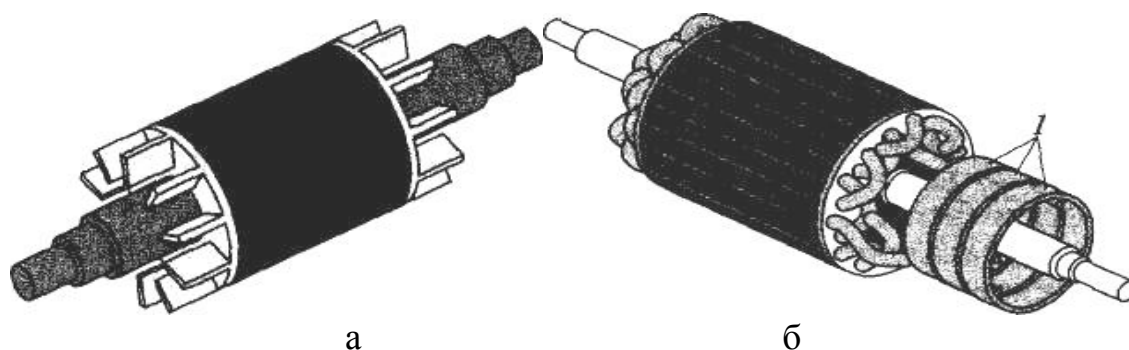


Рис. 4.13. Устройство ротора:
а – короткозамкнутого; б – фазного

Обмотка фазного ротора состоит из трех фазных (отдельных) обмоток, расположенных в пазах сердечника ротора и смещенных на 120° . Одни выводы этих обмоток соединяются в звезду, другие – подключены к изолированным друг от друга контактными кольцам.

Вместе с неподвижными щетками эти кольца образуют скользящие контакты, позволяющий соединять фазную обмотку с внешней

цепью: пусковыми реостатами, полупроводниковыми выпрямителями или другими устройствами (рис. 4.14).

Принцип действия асинхронного двигателя. Трехфазный ток в обмотках статора создает вращающееся магнитное поле, которое пересекает замкнутые проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Под действием этой ЭДС в обмотках ротора протекает ток.

Взаимодействие тока ротора с вращающимся полем статора создает действующие на проводники электромагнитные силы F . Эти силы стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Совокупность сил F , приложенных к отдельным проводникам, создает на роторе электромагнитный момент M , приводящий его в движение с частотой вращения, меньшей частоты вращения поля статора.

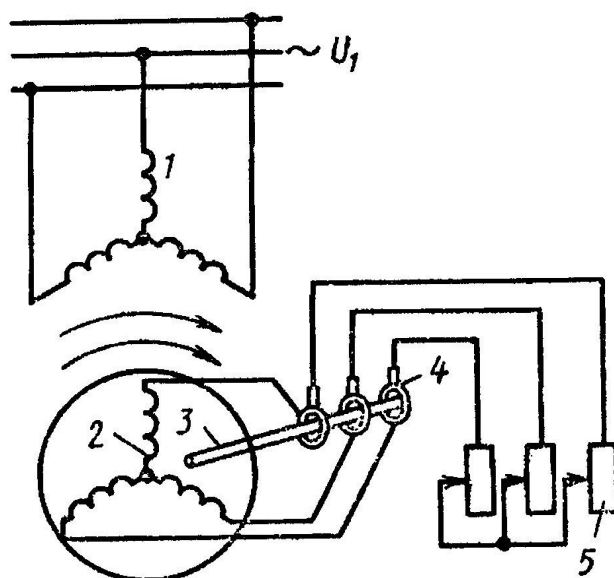


Рис. 4.14. Схема асинхронного двигателя с фазным ротором:

1 – обмотка статора; 2 – обмотка ротора; 3 – вал;

4 – контактные кольца; 5 – пусковые реостаты.

Асинхронные двигатели широко применяются в электроприводе благодаря своей простоте конструкции, надежности и относительно низкой стоимости. Основным недостатком асинхронных двигателей является их низкая регулировочная способность, что затрудняет их повсеместное использование. Отношение к этому двигателю изменилось после создания высоконадежных и столь же регулируемых полупроводниковых преобразователей частоты.

4.2.2. Электромеханические свойства асинхронных двигателей

Электромеханические свойства асинхронного двигателя в основном определяются уравнением механической характеристики $\omega = f(M)$.

Для его вывода обычно используют упрощенную схему замещения, приведенную на рис. 4.15 [8,9].

На схеме замещения (рис. 4.15) приняты следующие обозначения:

R_μ , X_μ – активное и индуктивное сопротивления контура намагничивания, Ом;

X_1 , X_2' – индуктивные фазные сопротивления, обусловленные полями рассеяния обмоток статора и ротора, последнее приведено к обмотке статора, Ом;

R_1 , $R_{2\Sigma}'$ – активное сопротивление обмоток статора и суммарное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора, Ом;

U_1 – действующее значение фазного напряжения сети, В;

I_μ , I_1 , I_2' – соответственно фазный ток намагничивания, статора и приведенный ток ротора, А;

S – скольжение двигателя, равное

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}, \quad (4.14)$$

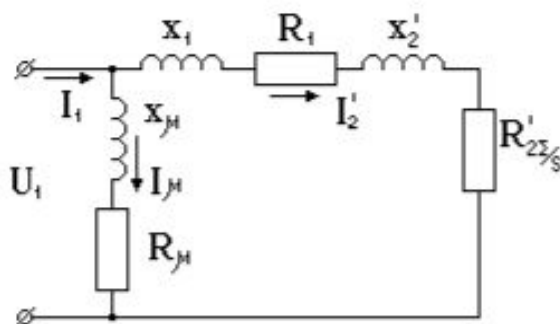


Рис. 4.15. Упрощенная схема замещения асинхронного двигателя

В соответствии с приведенной схемой замещения можно получить выражение для вторичного тока

$$I_2' = \frac{U_\phi}{Z} = \frac{U_\phi}{\sqrt{(R_1 + R_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2}}, \quad (4.15)$$

ω – угловая скорость поля статора, рад/с;

$$\omega_0 = 2\pi f/p$$

где f – частота напряжения питающей сети, Гц, p – число пар полюсов двигателя.

Мощность, потребляемая из сети

$$P_1 = \Delta P_0 + \Delta P M_1 + P_{\text{ЭМ}} = 3(I_{\mu}^2 R_{\mu} + I_2'^2 R_1 + I_2'^2 R_{2\Sigma}' / S), \quad (4.16)$$

С учетом баланса мощностей и схемы замещения можно определить электромагнитную мощность двигателя

$$P_{\text{ЭМ}} = \frac{3I_2'^2 R_{2\Sigma}'}{S} = \frac{3U_1^2 R_{2\Sigma}' / S}{(R_1 + R_{2\Sigma}' / S)^2 + X_K^2}, \quad (4.17)$$

где $X_K = X_1 + X_2'$ – индуктивное фазное сопротивление короткого замыкания,

С учетом $P_{\text{ЭМ}} = M_{\text{ЭМ}} \cdot \omega_0$ находим

$$M_{\text{ЭМ}} = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega} = \frac{3U_1^2 \cdot R_{2\Sigma}'}{\omega_0 S \left[\left(R_1 + \frac{R_{2\Sigma}'}{S} \right)^2 + X_K^2 \right]} \quad (4.18)$$

Из уравнения механической характеристики (4.18) следует, что $M = f(s)$ имеет максимум. Максимальное значение момента M_K , развиваемого двигателем, называют критическим. Так же называют и скольжение S_K – критическим.

Приняв $dM/dS = 0$ в уравнении (4.18), получим

$$S_K = \pm \frac{R_{2\Sigma}'}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}; \quad (4.19)$$

Подставив значение (4.19) в (4.18), получим

$$M_K = \frac{3U_{\Phi}^2}{2\omega_0 (R_1 \pm \sqrt{R_1^2 + X_K^2})}, \quad (4.20)$$

где знак “+” соответствует двигательному режиму работы АД ($\omega < \omega_0$), знак – генераторному ($\omega > \omega_0$).

Из (4.18) и (4.20) с учетом (4.19) можно получить выражение механической характеристики в виде

$$M = \frac{2M_K(1 + aS_K)}{S/S_K + S_K/S + 2aS_K} \quad (4.21)$$

где $a = R_1/R_2\Sigma'$.

Если в уравнении (4.21) пренебречь активным сопротивлением статора, получается формула, более удобная для расчетов и построения механической характеристики

$$M = \frac{2M_K}{S/S_K + S_K/S} \quad (4.22)$$

Механическая характеристика, полученная при номинальных значениях частоты и напряжения на статоре и отсутствии дополнительных элементов с активным или реактивным сопротивлением в обмотках АД, называется естественной. Все остальные характеристики, полученные при отклонении параметров U , f и другие от их номинальных значений, называются искусственными. Примерный вид этих характеристик показан на рис. 4.16.

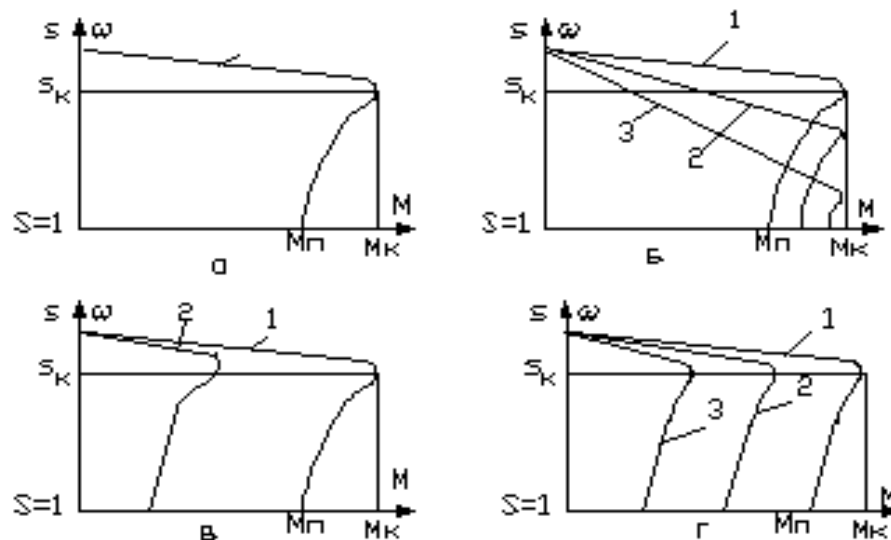


Рис. 4.16 Механические характеристики асинхронного двигателя:
 а – естественная; б – 1 естественная; 2, 3 при введении в роторную цепь дополнительных резисторов; в 1 естественная; 2 – при введении в статорную цепь дополнительного резистора; г – 1 – естественная; 2, 3 – при пониженных напряжениях, подводимых к статору

Перечисленные свойства характеристик используются для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей и формирования более жестких механических характеристик.

У асинхронных двигателей так же, как и у двигателей постоянного тока, три способа торможения с аналогичными названиями: торможение с передачей энергии в сеть, динамическое и противобключением.

Рекуперативное торможение. В асинхронном двигателе рекуперативное торможение может быть реализовано при опускании тяжелых грузов.

Под действием момента, создаваемого грузом, скорость опускания груза будет возрастать до тех пор, пока $M_{гр.}$ больше тормозного момента двигателя $M_{тр.}$ При $M_{гр.} = M_{тр.}$ опускание груза будет происходить с постоянной установившейся скоростью. Двигатель будет работать в генераторном режиме, передавая энергию в сеть с одновременным потреблением энергии из сети для создания вращающегося магнитного поля.

Динамическое торможение. Асинхронный двигатель из двигательного режима в режим динамического торможения переводится (рис. 4.17) отключением обмотки статора от сети контактами КМ и подключением двух его фаз к источнику постоянного тока контактами КМД.

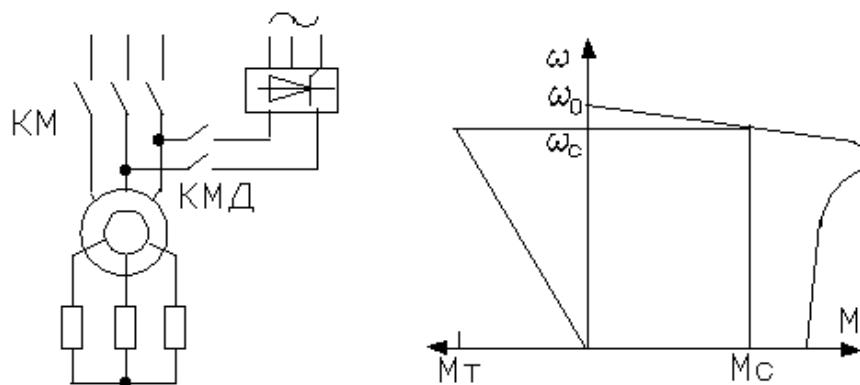


Рис. 4.17. Схема перевода двигателя в режим динамического торможения и характеристики двигателя в этом режиме

Постоянный ток, протекающий в обмотке статора, создает неподвижный в пространстве магнитный поток. В обмотках вращающегося по инерции ротора наводится ЭДС, которая вызывает появление тока в роторной цепи.

Взаимодействие тока ротора с неподвижным магнитным потоком статора создает тормозной момент, значение которого определяется выражением

$$M' = \frac{3I_{\text{ЭКВ}}^2 X_{\mu} R'_{2\Sigma} S'}{\omega_0 [R_{2\Sigma}'^2 + (X_{\mu} + X_2')^2 S'^2]}, \quad (4.23)$$

где $I_{\text{ЭКВ}}$ – эквивалентный ток обмотки статора, равный для данной схемы включения обмоток $I_{\text{ЭКВ}} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d = 0,427 I_d$;

I_d – постоянный ток, потребляемый обмоткой статора;

$S^1 = \omega / \omega_0$ – текущее значение скольжения при динамическом торможении.

Из уравнения (4.23) видно, что момент при динамическом торможении зависит от $I_{\text{ЭКВ}}$, протекающего по обмотке статора, и является функцией относительной скорости вращения ротора $S' = \omega^*$.

Исследуя (4.23) на экстремум, найдем, что $M_{\text{К ДТ}}$ будет иметь место при

$$S_{\text{К}}^1 = \frac{R'_{2\Sigma}}{X_{\mu} + X_2'}, \quad (4.24)$$

а значение критического момента

$$M_{\text{К ДТ}} = \frac{3I_{\text{ЭКВ}}^2 X_{\mu}^2}{2\omega_0 (X_{\mu} + X_2')}. \quad (4.25)$$

Используя уравнения (4.23) и (1.25) с учетом (4.22), можно получить уравнение механической характеристики в режиме динамического торможения

$$M = \frac{2M_{\text{К ДТ}}}{S / S'_{\text{К}} + S_{\text{К}} / S'}.$$

На рис. 4.18 изображены механические характеристики в режиме динамического торможения при трех добавочных резистора с различными сопротивлениями в роторе и для двух значений постоянного тока в цепи статора.

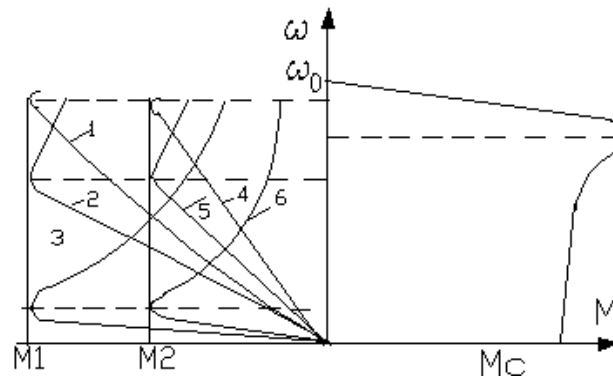


Рис. 4.18. Характеристики двигателя в режиме динамического торможения:

1, 2, 3 – характеристики при одном значении тока в обмотках статора и различных сопротивлениях в роторной цепи: характеристики 4, 5, 6 получены при тех же величинах сопротивления резисторов, но при меньшем токе в цепи статора

Из рис. 4.18 следует, что при изменении величины сопротивления добавочного резистора, установленного в роторной цепи, изменяется среднее значение тормозного момента. Имеется и оптимальное значение сопротивления, при котором имеет место максимальный тормозной момент при заданном значении постоянного тока, и минимальное время торможения. Чем больше значение постоянного тока в обмотках статора, тем больше средний тормозной момент и эффективнее торможение двигателя.

Торможение противовключением. Торможение противовключением называется режим, при котором двигатель включен на одно направление вращения, а под действием каких-либо сил (инерции или опускающегося груза) он вращается в противоположном направлении. Для ограничения тока в период торможения в роторную цепь включают дополнительные резисторы. Процесс торможения иллюстрируется рис. 4.19. Груз G при опускании создает момент $M_c = GR$. В интервале $\omega_c - (-\omega_c)$ у двигателя, включенного на подъем груза, $M < M_c$ и груз будет опускаться вниз, вращая его вал в противоположном направлении.

Установившееся движение наступает при $M = M_c$. Изменение скорости опускания груза (увеличение или уменьшение), возможно увеличением или уменьшением сопротивления резисторов в роторной цепи.

Недостатки этого способа – большие потери энергии на резисторах в роторной цепи и низкая плавность регулирования скорости движения.

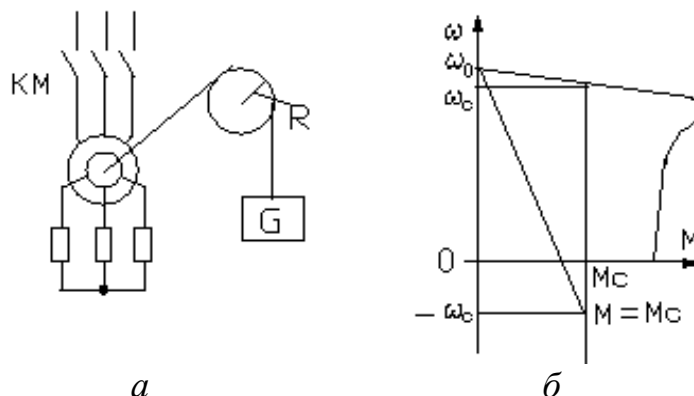


Рис. 4.19 Торможение противовключением:
а – схема; б – характеристики: 1 – естественная;
2 – при дополнительных резисторах в роторной цепи

Пример 1.2. Для асинхронного двигателя 4А2 рассчитать и построить: 1) естественную механическую характеристику для двигательного режима; 2) при пониженном напряжении на статоре ($U=0,8 U_H$); при пониженной частоте напряжения ($f=(45 \text{ Гц})$).

Паспортные данные двигателя: $U_H = 380 \text{ В}$; $P_H = 13 \text{ кВт}$;

$S_H = 7 \% (0,07)$;

$K_M = 3$;

$E_{2H} = 205 \text{ В}$; $I_{2H} = 42 \text{ А}$; $\eta \% = 83,5$, $\cos \varphi = 0,81$; $n_0 = 1000 \text{ об/мин}$.

Номинальный момент двигателя:

$$M_H = 975 P_H / n_H = 975 \cdot 13 / 930 = 13,63 \text{ кГ} \cdot \text{м} (133,7 \text{ Н} \cdot \text{м}).$$

В паспортных данных двигателей нет значения номинальной частоты вращения. Ее величину можно определить по уравнению

$$n_H = n_0(1 - S_H) = 1000(1 - 0,07) = 930 \text{ об/мин}.$$

Максимальный (критический) момент:

$$M_K = K_M \cdot M_H = 3 \cdot 13,63 = 40,88 \text{ кГ} \cdot \text{м} (401 \text{ Н} \cdot \text{м}).$$

Критическое скольжение:

$$S_k = S_n(K_M + \sqrt{K^2 M - 1}) = 0,07(3 + \sqrt{3^2 - 1}) = 0,4.$$

После подстановки значений S_k и M_e в уравнение (4.22) получим

$$M = 2M_k / (S / S_k + S_k / S) = 2 \cdot 40,88 / (S/0,4 + 0,4/S).$$

Задавая значения S в пределах от 0 до 1 и подставляя их в уравнение естественной характеристики, находим для каждого значения скольжения S величину момента нагрузки M . Расчет сведен в табл. 4.1

Момент, развиваемый асинхронным двигателем, находится в квадратичной зависимости от величины напряжения в сети.

$$M_n = (U/U_n)^2 M_e, \quad (4.26)$$

где M_n , M_e – соответственно моменты на искусственной (при пониженном напряжении) и естественной характеристике при одной величине скольжения.

Получить данные для построения механической характеристики асинхронного двигателя возможно путем пересчета моментов согласно уравнению (4.26). Например, при снижении напряжения на статоре двигателя на 20 % величина критического момента снизится на 36 %.

$$M_{кр.пони} = (0,8U_n/U_n)^2 \cdot M_{кр} = 0,64 M_{кр}.$$

Величина критического скольжения находится в обратно пропорциональной зависимости от частоты напряжения в сети

$$S_{кр}' = S_{кр} f/f', \quad (4.27)$$

где f – частота напряжения в сети (50 Гц); f' – частота напряжения, отличная от стандартной (50 Гц) частоты напряжения в сети.

Критический момент двигателя находится в такой же, но квадратичной зависимости

$$M_{кр}' = M_{кр}(f/f')^2, \quad (4.28)$$

т. е. с изменением частоты питающего напряжения момент $M_{кр}$ резко падает (при увеличении частоты) или резко возрастает (при умень-

шении частоты).

Для того чтобы перегрузочная способность асинхронного двигателя оставалась постоянной, необходимо одновременно с увеличением (уменьшением) частоты увеличивать (уменьшать) и напряжение в сети. Расчет сведен в табл. 4.1. Механические характеристики двигателя, построенные по расчетным данным, приведены на рис. 4.22.

Таблица 4.1

Расчетные данные

S	0,07	0,12	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	1
$M, кГм$	13,63	22,5	32,7	39,3	40,88	39,88	37,8	32	32
M/M_H	1,0	1,65	2,4	2,88	3,0	2,92	2,77	2,35	2,35
$M_{0,8U_H}$	8,72	14,4	20,9	25,15	26,16	25,5	24,19	20,5	18
$M_{0,8U_H} / M_H$	0,64	1,06	1,53	1,85	1,92	1,87	1,83	1,5	1,32

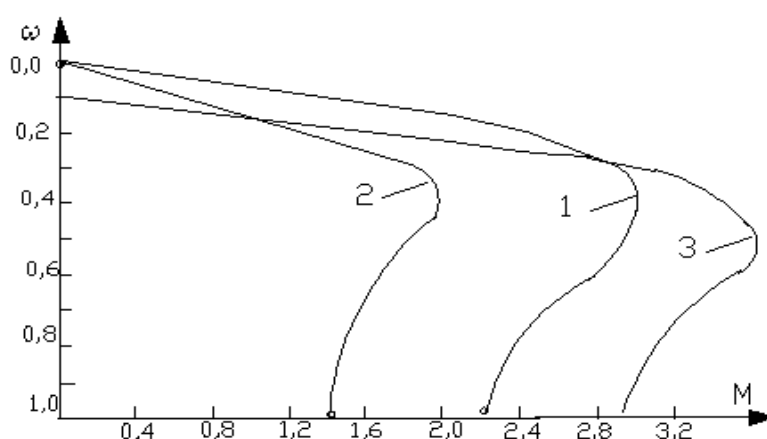


Рис. 4.20. Характеристики двигателя:
1 – естественная; 2 – при $U = 0,8U_H$; 3 – при $f = 45$ Гц.

4.2.3. Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей

Влияние различных параметров на характеристики, показанное в уравнениях (4.17) – (4.24) и на рис. 4.18, позволяет использовать их для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей. В зависимости от того, изменением какого параметра регулируется частота вращения асинхронного двигателя, различают следующие способы регулирования:

- изменением величины сопротивления роторной цепи;
- изменением напряжения, подводимого к обмоткам статора;
- изменением частоты напряжения на статоре;
- введением в цепь ротора дополнительных источников питания (каскадные схемы);
- регулированием по цепи ротора с помощью импульсных регуляторов.

Регулирование частоты вращения изменением сопротивления роторной цепи. Этот способ более известен как «реостатный». Регулирование частоты вращения и пускового тока осуществляется введением и выводением ступеней резисторов из роторной цепи с помощью контактов КМ магнитных пускателей. Возможности этого способа рассмотрим на примере электрической схемы и ее характеристик (рис. 4.21). Как видно из рисунка, с увеличением сопротивления резисторов уменьшается жесткость механических характеристик, диапазон регулирования частоты вращения не превышает 3:1, при холостом ходе частота вращения практически не регулируется, регулирование возможно только «Вниз» от основной частоты, плавность регулирования зависит от числа ступеней реостата.

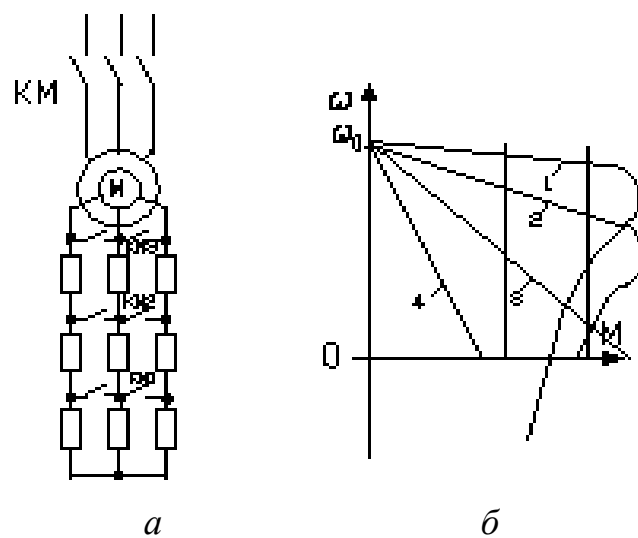


Рис. 4.21:

а – электрическая схема; б – реостатные характеристики

В настоящее время существует множество схемных решений, реализованных на базе силовой полупроводниковой техники, позволяющих плавно регулировать величину сопротивления роторной цепи. Существенным недостатком реостатного способа регулирования

являются большие потери энергии в пусковых реостатах. Основным достоинством этого способа является простота схемы и обслуживания. В настоящее время основной областью применения реостатного способа является электропривод крановых механизмов. Целесообразно применение реостатного способа в нерегулируемых приводах, где пусковые реостаты ограничивают пусковой ток и обеспечивают плавность процесса разгона механизмов.

Регулирование частоты вращения двигателей изменением величины напряжения на статоре. Из уравнения (4.20) следует, что величина критического момента M_k находится в квадратичной зависимости от величины напряжения на статоре. Величина критического скольжения зависит только от активно-индуктивных сопротивлений обмоток двигателя (4.21). Поэтому при различных величинах напряжения на статоре механические характеристики будут иметь вид, приведенный на рис. 4.23, а, где $U_4 < U_3 < U_2 < U_1$. $U_1 = U_n$. Как видно, характеристики при пониженном напряжении существенно отличаются от естественной.

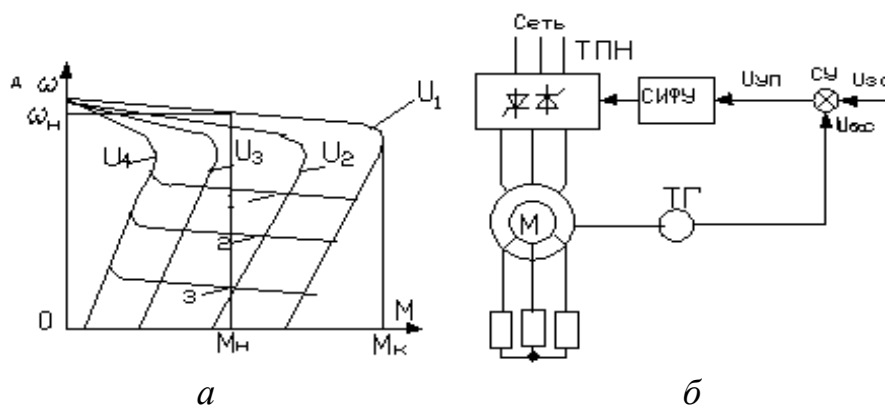


Рис. 4.22:

а – характеристики, б – электрическая схема

Синхронная частота вращения ω_0 от величины напряжения не зависит.

Поэтому характеристики, полученные при напряжении сети, отличном от номинального значения, пересекают ось ординат в одной точке $\omega = \omega_0$. Максимум момента на естественной и всех искусственных характеристиках будет при одном и том же значении S_k .

Для построения искусственных характеристик, полученных при напряжении сети, отличном от номинального, необходимо, прежде всего, построить естественную характеристику, а затем значения мо-

ментов естественной характеристики пересчитать для искусственных: $M' = M(U/U_H)^2$.

Кратности максимального и пускового моментов двигателя также изменяются прямо пропорционально квадрату напряжения сети.

Квадратичная зависимость момента двигателя от величины напряжения сети дает возможность формировать относительно жесткие характеристики при работе с пониженной частотой вращения. Если при работе двигателя с M_H на естественной характеристике снизить напряжение, например, до величины U_3 , то критический момент двигателя станет меньше момента нагрузки, и частота его вращения будет снижаться. При повышении напряжения с любого значения сниженной частоты вращения двигатель будет переходить на характеристики с большим значением M_K . Если при $M = M_H$ прекратить повышение на статоре, то двигатель будет работать устойчиво с пониженной частотой вращения. Таким образом, можно получать относительно стабильную частоту вращения в широком диапазоне.

Принцип работы схем, обеспечивающих формирование жестких характеристик, поясняется рис. 4.22, б. Схема содержит преобразователь (регулятор) переменного напряжения и цепь обратной связи по частоте вращения. Выходной сигнал датчика частоты вращения (тахогенератора ТГ), пропорциональный частоте вращения двигателя, подается на вход суммирующего устройства СУ. На другой вход этого устройства подается сигнал задания $U_{зад}$. Разность этих сигналов $U_{зад} - U_{ос} = U_{уп}$ является управляющим напряжением, от величины которого зависит угол открывания тиристоров α и величина напряжения на статоре. Величина частоты вращения двигателя, при которой вступает в действие обратная связь, устанавливается напряжением задания $U_{зад}$. Например, двигатель работал с номинальной нагрузкой при напряжении на статоре, равном U_2 . При снижении напряжения на статоре до величины U_3 (изменением величины $U_{зад}$), двигатель перейдет на характеристику с критическим моментом $M_K^! < M_H$. Частота вращения двигателя начнет снижаться. Одновременно будет снижаться и сигнал обратной связи $U_{ос}$. С момента появления разности $U_{зад} - U_{ос} = U_{уп}$ напряжение на входе СИФУ будет возрастать, а управляющие импульсы будут сдвигаться в сторону увеличения напряжения на статоре. По мере увеличения этого напряжения двигатель будет плавно переходить с одной характеристики на другую до тех пор, когда наступит $M_L = M_H$. Если нагрузка будет постоянной, то

двигатель будет устойчиво работать на пониженной частоте вращения. Недостатками этого способа регулирования частоты вращения являются:

- невозможность регулирования при работе без нагрузки;
- зависимость диапазона регулирования от величины пускового момента на естественной характеристике.

Наиболее благоприятной областью применения электропривода с рассмотренным способом частоты вращения являются крановые механизмы.

Регулирование частоты вращения АД изменением частоты напряжения на якоре

Возможность регулирования частоты вращения Ω ротора АД изменением частоты питающего напряжения f_1 вытекает из выражения синхронной частоты вращения

$$\Omega_1 = \frac{2\pi}{p} f_1,$$

где p – число пар полюсов АД.

Для реализации частотного регулирования угловой скорости вращения используются полупроводниковые (тиристорные или транзисторные) преобразователи, выходные напряжения и частота, которых изменяются независимо или по какому-либо закону.

Преобразователи частоты (ПЧ) бывают двух типов:

- с непосредственной связью нагрузки и питающей сети (ПЧН);
- с промежуточным звеном постоянного тока.

ПЧН используются в тех случаях, когда частота напряжения питающей сети гораздо выше частоты напряжения питания нагрузки. ПЧН позволяют регулировать выходную частоту только вниз от частоты питающей сети f_c , причем $f_{\text{вых.мах}} = (0.3 \dots 0.5) f_c$.

ПЧ с промежуточным звеном постоянного тока позволяют изменять выходную частоту как вверх, так и вниз от частоты питающей сети и могут применяться в электроприводах различных промышленных механизмов.

Полупроводниковые ПЧ имеют высокие: КПД (0.92 – 0.98) и надежность, высокое быстродействие. Кроме этого они имеют относительно малые габариты и массу.

В зависимости от требований, предъявляемых к системам частотного управления, применяются разомкнутые и замкнутые системы управления частотно-регулируемыми приводами.

Разомкнутые системы частотного управления обычно имеют жесткую связь между регуляторами частоты и напряжения, которая реализуется посредством функционального преобразователя, обеспечивающего требуемый закон изменения напряжения на статоре АД в функции частоты. Разомкнутые системы позволяют обеспечить требование постоянства перегрузочной способности двигателя в ограниченном диапазоне регулирования, зависящего от характера нагрузки (при $M_C = \text{const}$ от $(0.2 \dots 0.3) \Omega_H$ до номинальной скорости Ω_H).

В замкнутых системах регулирования скорости перегрузочная способность АД поддерживается постоянной выбором соответствующего закона изменения питающего напряжения в функции частоты, а жесткость механической характеристики – обратной связью по ЭДС частоте вращения и т.д.

В разомкнутых системах реализуются следующие законы регулирования:

- для механизмов с постоянным моментом сопротивления $M_C = \text{const}$, закон изменения напряжения от частоты имеет вид $U/f_1 = \text{const}$, либо $E / f_1 = \text{const}$ с IR - компенсацией;
- для вентиляторной нагрузки при диапазоне регулирования скорости $D = 2 : 1$ закон изменения напряжения от частоты имеет вид $U / f_1^2 = \text{const}$;
- для механизмов с постоянной мощностью $P_C = \text{const}$ закон изменения напряжения будет $U / \sqrt{f_1} = \text{const}$.

Механические характеристики асинхронных двигателей при различных законах регулирования напряжением и частотой приведены на рис. 4.23.

Частотное регулирование скорости является экономичным, т. к. управление производится при малых скольжениях.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей введением в цепь якоря дополнительной ЭДС.

Регулирование частоты вращения двигателя указанным способом поясняется схемой и характеристиками, приведенными на рис. 4.24.

Системы асинхронного привода, в которых регулирование частоты вращения осуществляется введением в роторную цепь дополнительной ЭДС, называются каскадными системами электроприводов. Существует множество разновидностей каскадных систем. В зависимости от типа источника формирования и регулирования противо-ЭДС в роторной цепи каскадные схемы подразделяют на «Электро-

машинные» и «Ветильные». Вариант схемы, приведенный на рис. 4.24, называется асинхронным вентильным каскадом (АВК).

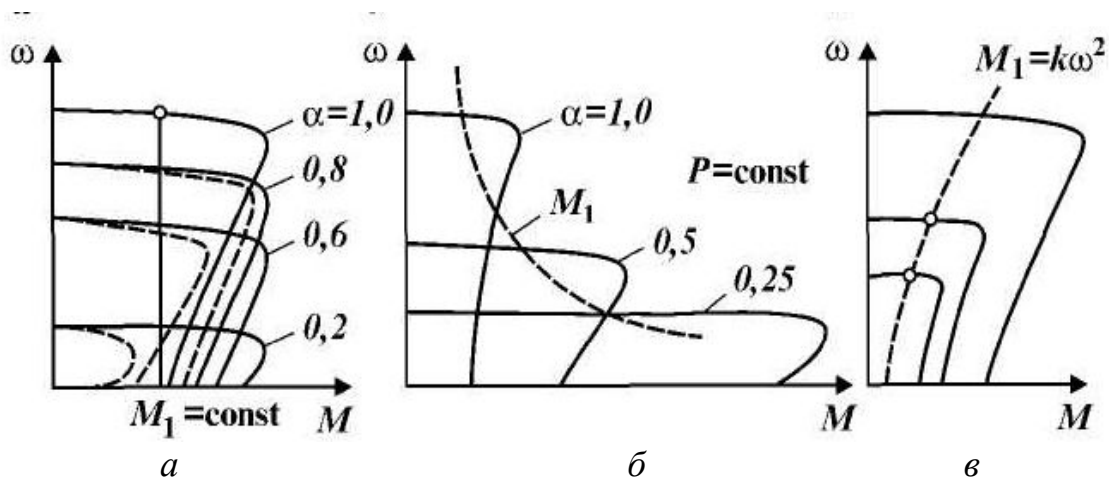


Рис. 4.23. Механические характеристики асинхронного двигателя:
а – при постоянном моменте; б – при постоянной мощности;
в – при вентиляторной нагрузке

Схема АВК[10] (рис. 4.24, а) содержит асинхронный двигатель М с фазным ротором, неуправляемый выпрямитель В, выполненный по трехфазной мостовой схеме, сглаживающий дроссель L и инвертор И, ведомый сетью, состоящий из тиристорного моста и согласующего трансформатора.

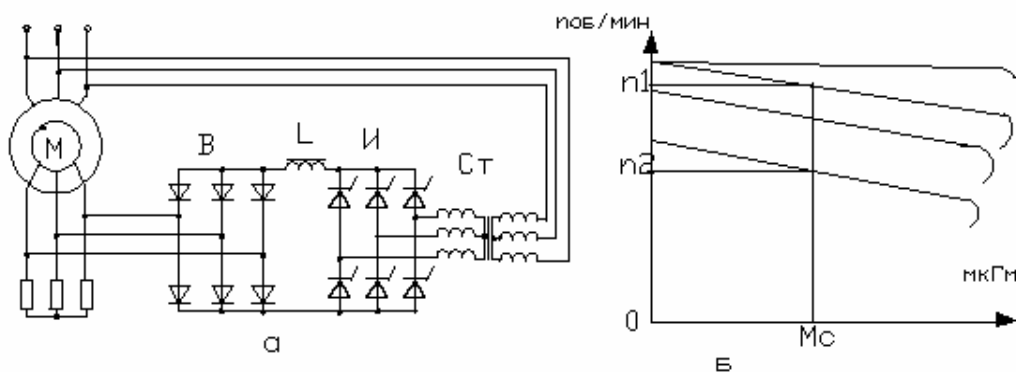


Рис. 4.24. АВК:
а – схема; б – характеристики.

При работе асинхронного двигателя на обмотках ротора наводится переменное напряжение, величина которого пропорциональна скольжению ($U_p = U_{2н} S$). С изменением частоты вращения двигателя изменяется и величина выходного напряжения неуправляемого вы-

прямителя ($U_d = 1,35 U_{2н} S$). Выходное напряжение инвертора, направленное на встречу напряжению выпрямителя, может регулироваться изменением угла β ($U_{и} = 2,34 U_{2ф} \cos \beta$), что позволяет регулировать ток ротора и пропорциональный ему момент, развиваемый двигателем

$$I_d = (U_d - U_{и0} \cos \beta) / R_{Э}, \quad (4.29)$$

где $U_{и0}$ – максимальное выходное напряжение инвертора;

$R_{Э}$ – эквивалентное сопротивление роторной цепи;

U_d – выходное напряжение выпрямителя, пропорциональное скольжению ротора.

Примем, что двигатель работает на характеристике 2 ($\beta = 90^\circ$, $U_{и} = 0$) с частотой вращения n_1 и моментом нагрузки M_c . При уменьшении угла β увеличивается напряжение инвертора, уменьшается ток ротора, и момент двигателя становится меньше момента нагрузки. Вследствие этого частота вращения двигателя будет уменьшаться, а напряжение на обмотках ротора будет возрастать. Этот процесс будет продолжаться до тех пор, пока момент двигателя снова станет равным моменту нагрузки.

Таким образом, изменяя угол регулирования β , например, от 90 до 0° , можно переводить работу двигателя на другие характеристики, где он будет работать с устойчивой пониженной частотой вращения.

По мере снижения частоты вращения двигателя возрастает количество энергии, трансформируемой из статора в роторную цепь. При реостатном способе регулирования частоты вращения вся эта энергия идет на нагрев элементов роторной цепи, в основном на дополнительных резисторах, введенных в роторную цепь. При работе асинхронного двигателя в системе АВК по мере снижения частоты вращения также возрастает энергия, передаваемая в роторную цепь. Величина этой энергии зависит от скольжения s . Иногда эту энергию так и называют энергией скольжения. Затем эта энергия преобразуется неуправляемым выпрямителем в энергию постоянного тока, а инвертор, ведомый сетью, преобразует ее снова в энергию переменного тока и передает в сеть. Потребляемая мощность из сети в системе АВК зависит от момента нагрузки и не зависит от частоты вращения. По мере снижения частоты вращения двигателя происходит перераспределение этой мощности: уменьшается мощность на валу двигателя и возрастает мощность, передаваемая в роторную цепь. Возвращение

этой энергии (за исключением потерь в обмотках и стали сердечника ротора) с помощью инвертора позволяет поддерживать относительно высокий КПД в широком диапазоне регулирования частоты вращения двигателя.

Достоинствами системы АВК являются:

- высокая плавность и широкий диапазон регулирования частоты вращения;
- более высокий КПД двигателя по сравнению с системами реостатного управления;
- простота перехода от регулируемого привода к нерегулируемому (при нарушении работы преобразователей и системы регулирования).

Есть в этой системе и существенные недостатки:

- уменьшение максимального момента до 17 % [10];
- низкий $\cos \varphi$;
- искажение формы напряжения питающей сети.

4.2.4. Типовые схемы управления асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором [9]

Типовые схемы управления асинхронными двигателями приведены на рис. 4.25.

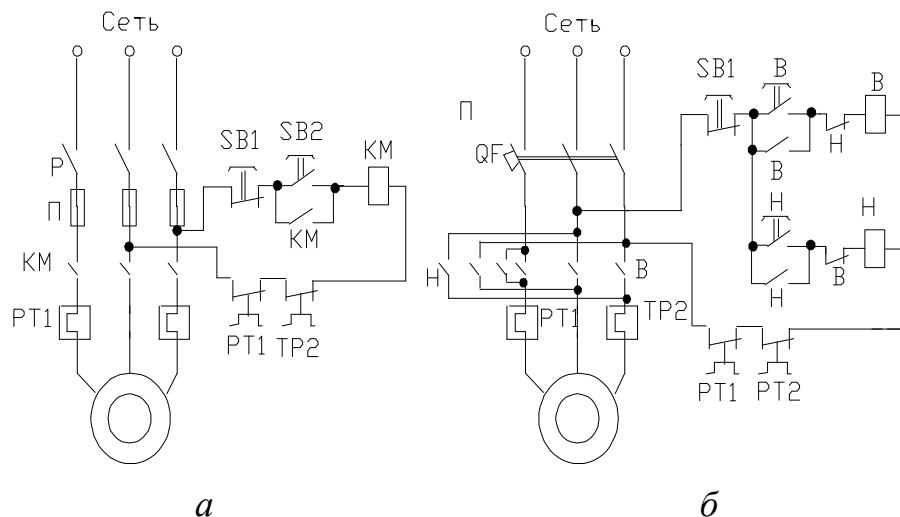


Рис. 4.25. Типовые схемы управления и защиты асинхронных двигателей:

а – нереверсивная, б – реверсивная

Аппаратура управления асинхронного двигателя в типовых схемах выполняет следующие функции:

- подключение обмоток статора непосредственно к питающей цепи (пуск двигателя);

- отключение двигателя от питающей сети (остановка двигателя);
- защиту двигателя от коротких замыканий;
- защиту двигателя от перегрузок по току;
- реверс двигателя (в схеме рис. 25, б).

Напряжение на схему управления двигателем подается включением рубильника Р (в схеме рис. 25, а) или включением автоматического выключателя (в схеме рис. 25, б).

При нажатии кнопки SB2 замыкается цепь питания катушки пускателя КМ. После срабатывания пускателя его главные контакты КМ подключают обмотки статора к сети, а замыкающие блок-контакты КМ шунтируют кнопку SB2.

При коротких замыканиях (в схеме рис. 25, а) перегорают плавкие предохранители П или срабатывает автоматический выключатель (в схеме рис. 25, б). В обеих схемах при перегрузках срабатывают тепловые реле, которые своими контактами РТ разрывают цепь питания катушек пускателей. В реверсивной схеме имеются дополнительные размыкающие блок-контакты В и Н. Они исключают возможность одновременной подачи напряжения к катушкам пускателей В и Н и короткого замыкания..

Приведенные типовые схемы ввиду своей простоты широко применяются в нерегулируемых электроприводах. Есть и существенные недостатки типовых схем:

- при прямом пуске кратность пускового тока $I_n / I_n = 5 - 7$;
- потери энергии в обмотках двигателя пропорциональны квадрату тока. Поэтому длительность прямого пуска ограничивается во избежание перегрева обмоток двигателя и выхода его из строя;
- для успешного пуска двигателя его вращающий момент на всем диапазоне изменения частоты вращения должен превышать момент нагрузки.

4.2.5. *Наладка асинхронных двигателей.*

Выполнение наладочных работ начинают с изучения проектных материалов: принципиальных схем, схем электрических соединений, размещения электрооборудования. Кроме этого проверяют соответствие электрооборудования проекту, его комплектность. При обнаружении внешних дефектов проводят их устранение или замену электрооборудования. Далее выполняются следующие наладочные работы:

Проверка правильности монтажа силовых цепей и цепей вторичной коммутации:

- измерение сопротивления изоляции;
- измерение сопротивления обмоток и резисторов постоянному току;
- проверка исправности и правильности соединения обмоток АД;
- измерение коэффициента трансформации АД (для двигателей с фазным ротором);
- испытание обмоток АД повышенным напряжением;
- проверка и настройка контакторов, пускателей, промежуточных реле и другой контактной аппаратуры;
- проверка и настройка автоматических выключателей и реле на заданные уставки;
- опробование работы схемы управления без включения АД;
- пробный пуск АД, проверка его работы на холостом ходу;
- проверка АД под нагрузкой.

Состояние изоляции АД является основным показателем для определения возможности включения его на напряжение сети. От состояния изоляции зависит надежность, долговечность, срок безотказной работы АД.

Сопротивление изоляции обмотки статора асинхронных двигателей напряжением до 1000 В измеряют с помощью мегомметра с напряжением 1000 В, а обмотки ротора (для двигателей с фазным ротором) – мегомметром с напряжением 500 В.

При измерении сопротивления изоляции относительно земли зажим *Л* (линия) подключают к токоведущей части испытуемого объекта, а зажим *З* (земля) – к его корпусу. Если измеряется сопротивление изоляции между элементами электрооборудования и электрических цепей, несоединенных с землей, то подключение зажимов мегомметра к выводам испытуемых элементов может быть произвольным. Присоединение мегомметра проводят посредством гибких изолированных проводов, сопротивление изоляции которых равно или превышает верхний предел измерений прибора. Достоверные показания мегомметра получают в том случае, когда его рукоятку вращают со скоростью 90–150 об/мин.

У обмотки статора АД измеряют сопротивление изоляции каждой фазы относительно корпуса, а также каждой фазы обмотки относительно двух других ее фаз. Если фазы статора соединены в звезду внутри корпуса, то измеряют сопротивление изоляции

обмотки только относительно корпуса. Аналогично измеряют сопротивление изоляции обмотки ротора АД с фазным ротором. Величина сопротивления изоляции при температуре $+ (10 \pm 30) ^\circ\text{C}$ должна быть не менее 0,5 МОм для обмоток статора и не менее 0,2 МОм для обмоток ротора асинхронных двигателей напряжением до 1000 В. При этом отсчет показаний мегомметра должен производиться не раньше чем через 60 с после приложения к изоляции напряжения мегомметра.

Измерение сопротивления изоляции двигателей напряжением 3 кВ осуществляется также мегомметром на 1000 В, а двигателей напряжением 6 кВ и выше – мегомметром на 2500 В. Сопротивление изоляции обмоток статора при температуре $+20^\circ\text{C}$ и напряжении двигателей 3; 6 и 10 кВ должно быть не менее соответственно 25; 50 и 85 МОм, а при рабочей температуре обмоток $+75^\circ\text{C}$ не менее соответственно 3; 6 и 10 МОм.

Сопротивление изоляции аппаратов напряжением до 1000 В – реле, контакторы, автоматические выключатели и т. п. – проверяют мегомметром с напряжением 500 или 1000 В. Как правило, сопротивление изоляции измеряют для схемы управления электропривода в целом, т. е. для группы электрически взаимосвязанных аппаратов. Сопротивление изоляции одного присоединения должно быть не менее 1 МОм.

Измерение сопротивления постоянному току (активного сопротивления) обмоток двигателей, аппаратов, резисторов проводят для проверки параметров схемы электропривода, выявления обрыва цепи или плохого состояния контактных соединений. В некоторых случаях это измерение позволяет выявить наличие короткозамкнутых витков в обмотках.

Сопротивление постоянному току измеряют с помощью омметров и мостов постоянного тока. Иногда для этой цели применяют также метод амперметра – вольтметра. В последнем случае на измеряемый объект – обмотку или резистор постоянное напряжение от низковольтного источника подают через последовательно включенный регулируемый резистор и измеряют ток и напряжение на измеряемом объекте. Сопротивление последнего определяется делением напряжения на величину постоянного тока.

В качестве измерительного моста постоянного тока широкое применение находит мост типа ММВ. Для измерения сопротивления зажимы моста с помощью калиброванных проводов соединяют с выводами измеряемого объекта и устанавливают нужный предел

измерения на приборе. Затем, нажав кнопку моста, в зависимости от отклонения стрелки поворачивают регулируемый элемент прибора в сторону увеличения сопротивления (стрелка показывает «мало») или уменьшения его (стрелка показывает «много»), добиваясь установки стрелки в нулевое положение, после чего считывают результат измерения. Из полученной таким образом величины сопротивления нужно вычесть сопротивление калиброванных соединительных проводов места.

У асинхронных двигателей, имеющих выводы начал и концов всех фаз обмотки статора, измерение сопротивления постоянному току проводят пофазно. Если обмотка соединена в звезду без вывода нулевой точки, то сопротивление измеряют между каждыми двумя выводами. Для обмотки ротора сопротивление измеряют между каждой парой колец, чтобы исключить влияние щеточного контакта. У двигателей мощностью выше 300 кВт измеренные величины сопротивлений отдельных фаз обмотки статора (ротора) не должны отличаться от заводских данных более чем на 2 %. Сопротивление пускорегулирующих и других резисторов измеряют на всех ответвлениях. Измеренные величины их не должны отличаться от предусмотренных проектом больше, чем на 3–4 %.

Для проверки правильности соединения обмотки статора АД нужно знать начало и конец каждой ее фазы. В случае отсутствия маркировки начал и концов фаз необходимо их определить. Сначала с помощью омметра, мегомметра и других приборов находят выводы отдельных фаз обмотки. Затем две фазы обмотки соединяют последовательно одну с другой и через выключатель присоединяют к источнику постоянного тока низкого напряжения (сухой элемент или аккумулятор), а к третьей фазе подключают вольтметр постоянного напряжения. Если упомянутые две фазы соединены одноименными выводами (концами и началами), то в момент замыкания цепи этих фаз выключателем стрелка вольтметра будет отклоняться. Путем попарного последовательного включения фаз обмотки определяют их одноименные выводы, одни условно маркируют как «начала» (С1, С2, С3), а другие как «концы» (С4, С5, С6).

Для указанной цели можно использовать и пониженное напряжение, если источник постоянного тока отсутствует. В этом случае две фазы обмотки статора также соединяются последовательно и непосредственно либо через реостат подключаются к источнику переменного напряжения. К третьей фазе подключают вольтметр переменного напряжения. Если стрелка вольтметра не отклоняется, то это озна-

чает, что упомянутые две фазы соединены одноименными выводами. Если же вольтметр на наличие напряжения на третьей фазе, то последовательно включенные фазы соединены разноименными выводами.

В короткозамкнутой обмотке ротора АД иногда могут быть разрывы стержней или короткозамыкающих колец. Для обнаружения подобных дефектов без разборки двигателя поступают следующим образом. В каждую фазу статора АД включают амперметр, после чего подключают двигатель к источнику низкого трехфазного напряжения промышленной частоты. Ротор АД медленно поворачивают вручную, наблюдая за показаниями амперметра. При исправной короткозамкнутой обмотке ротора токи в фазах статора останутся неизменными. При наличии разрывов стержней или колец стрелки амперметров при медленном вращении ротора вручную поочередно отклоняются, что служит основанием для разборки двигателя и ремонта обмотки ротора.

В двигателях с фазным ротором необходимо определять коэффициент трансформации, который равен отношению линейной ЭДС статора к линейной ЭДС ротора. Для упрощения измерений отношение ЭДС заменяют отношением напряжений статора и ротора. При этом на статор двигателей низкого напряжения (до 660 В) подают номинальное напряжение при разомкнутом роторе и измеряют линейные напряжения между фазами статора, а затем ротора. Отличие в показаниях измерений линейных напряжений статора (ротора) не должно превышать 1 %. Симметрия напряжений ротора косвенно свидетельствует об исправности его обмотки. Для получения более точного значения коэффициента трансформации проводят дополнительные измерения линейных напряжений, теперь уже подавая пониженное переменное напряжение на ротор АД при разомкнутой обмотке статора. Коэффициент трансформации определяется как полусумма коэффициентов трансформации обоих измерений.

Перед включением двигателей в сеть проводят испытание электрической прочности их изоляции повышенным напряжением промышленной частоты. Величина испытательного напряжения для обмотки статора составляет $1,6U_n + 800$ В для двигателей до 3300 В, $2U_n$ для двигателей до 6600 В и $1,6U_n + 2400$ В для двигателей с напряжением выше 6600 В. Обмотки ротора и пускорегулирующие сопротивления испытываются напряжением 1000 В. Длительность испытания – 1 мин. Учитывая повышенную опасность, испытания напряжением выше 1000 В проводятся специально подготовленным персоналом.

При наладке контакторов и магнитных пускателей проводят наружный осмотр, удаление смазки, зачистку контактов, проверяют одновременность замыкания и размыкания главных контактов, правильность работы блок - контактов. Выборочно (при большом количестве аппаратов) проверяют раствор, провал, начальное и конечное нажатие главных и блокировочных контактов. Затем измеряют напряжения втягивания и отпадания. Напряжение втягивания не должно быть больше 85 % номинального, напряжения обмотки контактора (пускателя) при ее температуре $+70^{\circ}\text{C}$. Напряжение отпадания информируется. Аналогичные операции выполняются и для промежуточных реле, а также для реле защиты и управления.

Согласно таблицам уставок, приведенным в проекте, проводят настройку реле защиты и управления. Для реле напряжения (тока) с помощью регулируемого источника напряжения (тока) выставляют напряжение (ток) втягивания или отпадания якоря реле, а при наличии указаний в проекте добиваются получения заданного коэффициента возврата реле. Напряжение (ток) втягивания реле регулируют изменением натяжения пружины (тонкая регулировка) или изменением воздушного зазора между якорем и сердечником реле (грубая регулировка). Воздушный зазор изменяют установкой немагнитных прокладок различной толщины.

Питание обмоток реле напряжения при их настройке осуществляют от лабораторного автотрансформатора типа ЛАТР. Установка уставок срабатывания токовых реле на ток до 20–25 А проводится путем включения реле на сеть через реостат, которым регулируется величина тока. При больших величинах токов применяют нагрузочный трансформатор, первичная обмотка которого подключается к ЛАТРу, а в цепь вторичной низковольтной и рассчитанной на большой ток обмотки включается настраиваемое реле. Изменяя с помощью автотрансформатора напряжение на первичной обмотке нагрузочного трансформатора, получают в его вторичной обмотке требуемое значение тока.

Перед включением двигателя проводят следующее:

- проверяют правильность работы схемы управления электроприводом (без подачи напряжения на статор АД);
- включают командные аппараты (кнопки, командоконтроллер и т. п.) в каждое из положений и фиксируют включение и отключение тех или иных аппаратов (контакторов, реле и т. п.),

- очередность их срабатывания и т. п.;
- проверяют действие блокировок, конечных выключателей и т. д.

В случае нормальной работы схемы управления проводят пробный, пуск АД холостую или при ненагруженном механизме. После окончания разгона АД должен проработать без нагрузки механизма не менее 1 ч. При этом проверяют нагрев обмоток, активной стали, наличие шума в АД, притирку щеток (для АД с фазным ротором), вибрацию, измеряют ток холостого хода, напряжение, скорость вращения. В случае отклонения каких-либо параметров от номинальных значений (например, повышенный нагрев обмоток) устанавливают причину и устраняют неисправность.

При нормальной работе электропривода на холостом ходу и готовности механизма проводят опробование электропривода во всех технологических режимах. В заключение проверяют АД на нагрев при номинальном напряжении и токе статора. Нагрузка АД создается механизмом. При этом установившаяся температура обмоток АД не должна превышать допустимых значений. В случае необходимости снимают рабочие характеристики АД, а также характеристики холостого хода и короткого замыкания. Однако снятие двух последних характеристик возможно только при наличии источника регулируемого трехфазного напряжения значительной мощности.

Окончание наладочных работ оформляется специальным актом. При этом эксплуатационному персоналу (заказчику) передается вся отчетная документация в виде протоколов наладки, испытаний электропривода и исполнительных принципиальных схем. Для сложных электроприводов составляется технический отчет по наладке.

Вопросы для самопроверки

1. В чем различие асинхронных двигателей с короткозамкнутым и фазным ротором?
2. Какие параметры приводятся в справочной литературе по асинхронным двигателям?
3. Что достигается введением в роторную цепь дополнительных резисторов?
4. Дайте характеристику трем способам торможения асинхронных двигателей.
5. Как перевести асинхронный двигатель в режим динамического торможения?
6. В асинхронном двигателе максимальный момент находится в квад-

ратичной зависимости от величины напряжения в сети. Это плохо или хорошо?

7. Перечислите и поясните показатели регулирования частоты.

8. Поясните регулирование частоты вращения асинхронного двигателя изменением частоты напряжения на статоре.

9. Как регулируется частота вращения асинхронного двигателя в каскадных схемах?

10. Укажите, срок службы асинхронного двигателя и что может вызвать его сокращение.

11. В чем отличие крановых двигателей от общепромышленных?

12. Какой из механизмов буровой установки работает в повторно кратковременном режиме.

4.3. Синхронные машины

4.3.1. Синхронные генераторы

Основными частями генератора переменного тока являются: а) индуктор – магнит или электромагнит, создающий магнитное поле; б) якорь – обмотка, в которой при изменении магнитного поля наводится ЭДС; в) контактные кольца, через которые с помощью щеток к обмоткам индуктора (возбуждения) подводится постоянное напряжение.

Вращающаяся часть называется ротором, а его неподвижная часть – статором. Как ротор, так и статор, в зависимости от расположения индуктора, могут исполнять роль индуктора или якоря. Ток якоря значительно превышает ток индуктора. Поэтому индуктор, как правило, располагают на роторе, а якорь на статоре. В качестве индуктора, создающего магнитное поле, почти всегда применяются электромагниты. Только в генераторах небольшой мощности в качестве индуктора используются постоянные магниты. Общий вид генератора с вращающимся индуктором приведен на рис. 4.26.

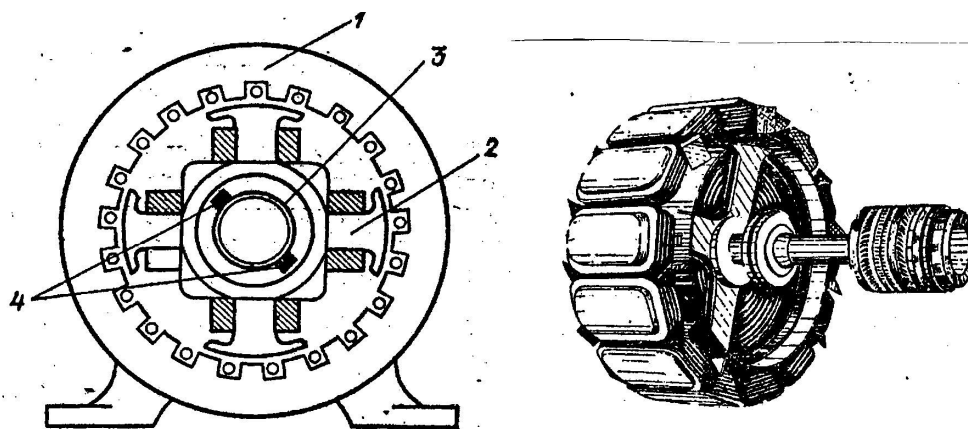


Рис. 4.26 Общий вид генератора с вращающимся индуктором:
 1 – якорь; 2 – индуктор (полюс с обмоткой возбуждения);
 3 – контактные кольца; 4 – щетки

Из рисунка видно, что ротор представляет собой цилиндр с установленными на нем полюсами с катушками (обмотками возбуждения). Обмотки возбуждения намотаны так, чтобы проходящий по ним постоянный ток, создавал поочередно северные и южные полюсы. Частота выходного напряжения генератора зависит от числа пар полюсов и частоты вращения ротора $f = pn/60$. Из этого следует, что для получения частоты выходного напряжения 50 Гц с уменьшением числа пар полюсов необходимо увеличивать частоту вращения ротора генератора. При одной паре полюсов ($p=1$) для получения $f = 50$ Гц необходимо вращать ротор с частотой 3000 об/мин. При больших скоростях вращения ротора на полюсы, закрепленные на валу с помощью болтов (в генераторах небольшой мощности) или к ободу ротора (в генераторах большой мощности), действуют большие центробежные силы. Поэтому генераторы, в которых в качестве индукторов используются электромагниты, имеющие конструкцию, приведенную на рисунке 4.26, выполняются многополюсными ($p = 6$ и более). Такие явнополюсные генераторы обычно приводятся в движение тихоходными водяными турбинами. Паровые и газовые турбины имеют частоты вращения 1500–3000 об/мин. С такими двигателями применяются не явнополюсные генераторы с малым диаметром ротора, не превышающим 1250 мм[8].

Рассмотренные конструкции являются основными типами генераторов переменного тока, применяемых в производстве электроэнергии.

Величина выходного напряжения генератора зависит от величины постоянного тока в обмотке возбуждения и частоты вращения ротора. Зависимость $E_r = f(I_B)$ при постоянной частоте вращения ротора называется характеристикой холостого хода генератора. Характеристика трехфазного короткого замыкания представляет собой зависимость тока в обмотке статора при коротком замыкании от тока в обмотке возбуждения $I_k = f(I_B)$ при постоянной частоте вращения ротора ($n = \text{const}$).

Магнитная система генератора в процессе работы подвергается размагничивающему действию током обмотки статора (реакция якоря). Поэтому характеристика $I_k = f(I_B)$ является линейной.

Внешние характеристики $U_r = f(I_c)$ (рис. 4.27) зависят от характера нагрузки. Эти характеристики определяют эксплуатационные свойства синхронного генератора. Они показывают, как изменяется выходное напряжение генератора при увеличении нагрузки (при постоянном токе возбуждения и определенном характере нагрузки). При индуктивном характере нагрузки отставание тока в обмотке статора от напряжения составляет около 90° . Реакция якоря имеет продольный (размагничивающий характер) и внешняя характеристика генератора (рис. 4.27, а, характеристика 3) близка к линейной. Из-за уменьшения результирующего потока выходное напряжение генератора сильно падает с увеличением нагрузки.

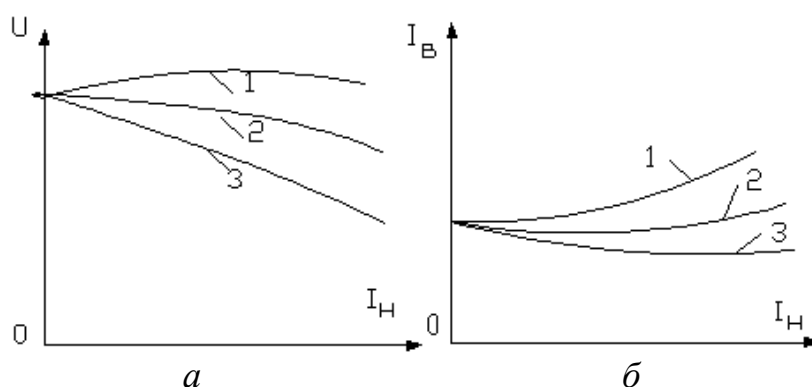


Рис. 4.27. Характеристики синхронного генератора:

а – внешние, б – регулировочные (1, 2, 3 – соответственно, при емкостной, активной и индуктивной нагрузках)

При активно-индуктивной нагрузке реакция якоря продольно-поперечная, ее размагничивающее действие снижается и выходное напряжение генератора с увеличением нагрузки снижается незначительно (рис. 4.27, а, характеристика 2).

При емкостной нагрузке реакция якоря становится подмагничивающей и с ростом нагрузки результирующий магнитный поток увеличивается, а внешняя характеристика приобретает вид, приведенный на рис. 4.27, а (характеристика 1).

При работе синхронного генератора основной показатель качества (стабильность выходного напряжения при изменении нагрузки) достигается регулированием тока возбуждения. Зависимость $I_b = f(I_c)$ при $n = \text{const}$, $U = \text{const}$, $\cos \varphi = \text{const}$ называется регулировочной характеристикой генератора.

Эти характеристики (рис. 4.27, б) показывают, как нужно изменять ток в обмотке возбуждения, чтобы выходное напряжение генератора поддерживалось на постоянном уровне при различном характере нагрузки. Из анализа регулировочных характеристик следует, что при емкостной нагрузке для получения стабильного выходного напряжения необходимо по мере увеличения нагрузки уменьшать величину тока возбуждения (рис. 4.27, б, характеристика 3). Постоянство выходного напряжения при активной и активно-индуктивной нагрузке достигается при регулировочных характеристиках 2 и 1 (рис. 4.27, б).

Вопросы для самопроверки

1. Поясните различие в устройстве явно полюсных и неявнополюсных синхронных генераторов.
2. Какие двигатели используются для вращения синхронных генераторов?
3. Как влияет характер нагрузки синхронного генератора на его внешнюю характеристику?
4. Что такое процесс синхронизации синхронных генераторов?
5. Поясните способы регулирования частоты и величины выходного напряжения синхронного генератора.
6. Почему синхронные генераторы, приводимые в действие двигателями внутреннего сгорания или газовыми турбинами, выполняются неявнополюсными?
7. На какие напряжения выпускаются синхронные генераторы, используемые в системах электроснабжения?
8. Что характеризует η_n и $\cos \varphi$?

4.3.2. Синхронные двигатели[11]

У синхронной машины магнитное поле статора и ротора вращаются с одинаковой частотой (синхронно). Это свойство машины и определяет ее название. Синхронная машина также, как и асинхрон-

ная, состоит из статора и ротора. По устройству статор синхронной машины не отличается от статора асинхронной. Магнитопровод статора выполняют из листовой электротехнической стали. В пазах статора располагают трехфазную обмотку, создающую вращающееся магнитное поле. Роторы (рис. 4.28) бывают двух типов: неявнополюсный и явнополюсный. В машинах небольшой мощности полюсы крепятся болтами к валу двигателя, в машинах большой мощности полюсы крепятся к ободу ротора.

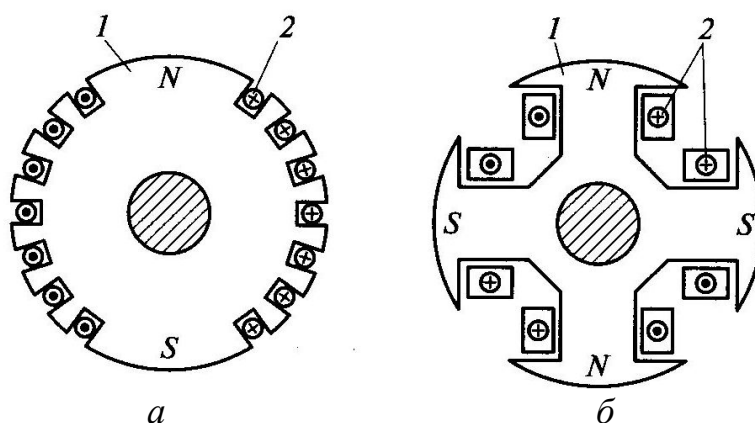


Рис. 4.28. Поперечный разрез:
 а – неявнополюсного и б – явнополюсного роторов:
 1 – сердечник, 2 – обмотка возбуждения

Основным достоинством синхронного двигателя является возможность работы с $\cos \varphi = 1$. Синхронный двигатель без нагрузки (на холостом ходу) может работать в режиме генератора реактивной мощности. При недовозбуждении ($I_b < I_{b0}$) генератор вырабатывает индуктивную энергию. При ($I_b > I_{b0}$) – емкостную. Выработывая и регулируя реактивную энергию, синхронный компенсатор может поддерживать требуемую величину $\cos \varphi$ питающей сети. Основное назначение работы двигателя в режиме компенсации реактивной мощности – поддержание постоянства напряжения в питающей сети.

4.3.3. Электромеханические свойства синхронных двигателей

Электромеханические свойства синхронных двигателей определяются тремя характеристиками (рис.4.29): механической, пусковыми и угловой.

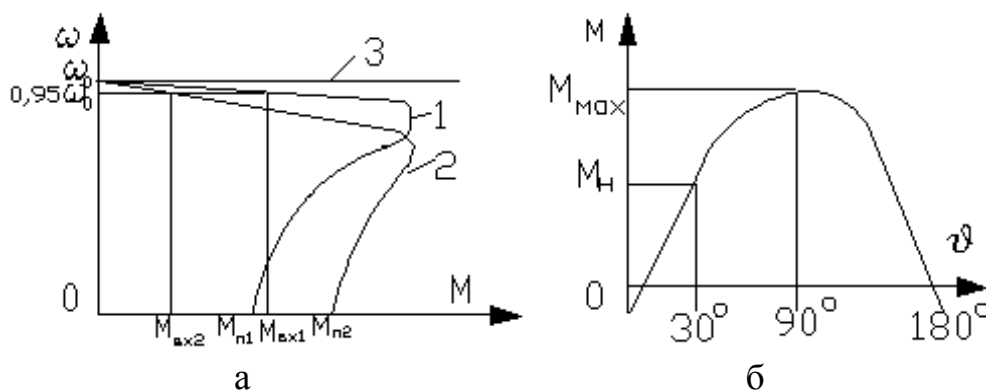


Рис. 4.29. Характеристики:

а – пусковые 1, 2, механическая 3 и пусковые 2, 3; б – угловая

На механической характеристике двигатель работает с постоянной синхронной частотой вращения. Угловая характеристика показывает зависимость угла φ (угол между напряжением на статоре и ЭДС ротора) от момента нагрузки. Из этой характеристики следует, что вращающий момент двигателя увеличивается по мере увеличения нагрузки до определенной величины M_{max} , превышение которой приведет к нарушению синхронного вращения поля статора и ротора (выпадению из синхронизма) и остановке двигателя.

Зависимость между моментом двигателя и углом φ определяется выражением

$$M = M_{max} \sin \varphi.$$

Момент двигателя при $\varphi = 25\text{--}30^\circ$ принимается как номинальный. Перегрузочная способность двигателя находится в пределах [8]

$$K_M = M_{max}/M_H = 2 - 2,5.$$

Синхронные двигатели имеют в роторе, кроме обмотки возбуждения, получающей питания от источника постоянного тока, еще и специальную пусковую короткозамкнутую обмотку. С помощью этой обмотки двигатель пускается в ход как асинхронный, и поэтому в пусковых режимах он обладает асинхронной характеристикой. На рис. 4.29, а представлены две пусковые характеристики синхронного двигателя, одна из них 1 соответствует пуску с пониженным начальным пусковым моментом M_{n1} и значительным «входным» моментом

$M_{вх1}$, под которым понимается момент, развиваемый двигателем при частоте вращения, равной $0,95 \omega$.

Наиболее сложным режимом в работе синхронного двигателя является процесс пуска. Обычно пуск синхронных двигателей (СД) состоит из трех интервалов: разбег двигателя до подсинхронной частоты вращения $\omega_{п}$ ($\omega_{п} = 0,95 \omega_0$), подача возбуждения в обмотку ротора; вхождение двигателя в синхронизм.

В настоящее время в качестве источников питания системы возбуждения СД используются управляемые выпрямители (рис. 4.30).

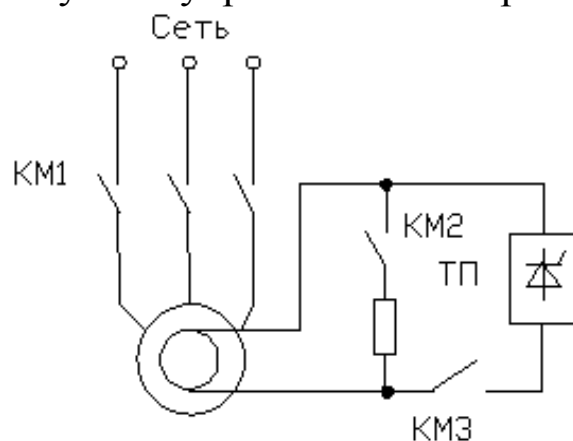


Рис. 4.30. Схема возбуждения синхронного двигателя

В исходном состоянии нормально закрытыми контактами пускателя КМ2 обмотка возбуждения подключена к резистору.

После подачи напряжения на обмотку статора двигателя он работает как асинхронный. В момент достижения подсинхронной скорости замыкаются контакты КМ3 и в обмотку возбуждения подается постоянный ток.

Момент, создаваемый двигателем в результате взаимодействия вращающегося магнитного потока и тока возбуждения двигатель втягивается в синхронизм (вращающееся поле и ротор вращаются с одинаковой скоростью, т.е. синхронно)

Управление моментом подачи напряжения возбуждения контролируется по частоте вращения ротора, времени пуска и др).

В зависимости от момента подачи полного напряжения на обмотку статора СД в сочетании с подачей тока возбуждения в обмотку ротора существуют три вида пуска СД: прямой, тяжелый и легкий. При прямом пуске на обмотку статора подается полное напряжение сети, а цепь обмотки ротора подключается наглухо (без разрыва) к якори возбuditеля. Прямой пуск с глухо подключенным возбудителем возможен при наличии трех условий:

- если позволяет мощность питающей сети;
- если время разгона до подсинхронной скорости меньше времени самовозбуждения возбудителя, (подача тока возбуждения в ротор должна происходить после достижения под синхронной скорости);
- если момент статического сопротивления на валу не превышает 40 % номинального момента СД.

В зависимости от мощности питающей сети так же, как в АД, применяются пуски при полном и пониженном напряжениях с использованием резисторов, реакторов и автотрансформаторов. При пуске СД высокого напряжения вместо контакторов используются масляные выключатели.

При пуске СД со снижением напряжения питания различают легкий и тяжелый пуски. При легком пуске напряжение возбуждения подается еще при пониженном напряжении питания. Легкий пуск применяется при малых статических моментах нагрузки из-за малого входного момента. При тяжелом пуске напряжение возбуждения подается при полном напряжении на обмотке статора. Пуск используется при больших моментах статического сопротивления, т. к. обеспечивает большие моменты при вхождении в синхронизм.

В производственных механизмах широкое распространение получили только синхронные электроприводы средней и большой мощности. Наличие всевозможных возмущающих воздействий приводит к отклонению параметров СД и питающей сети от их номинальных значений. Все это влияет на технико-экономические показатели синхронных электроприводов и качество напряжения питающей сети.

Поэтому к системам автоматического управления синхронными электроприводами предъявляются более высокие требования. Они должны обеспечить, кроме устойчивой работы электропривода, еще и стабилизацию напряжения питающей сети.

Использование синхронных электроприводов для механизмов, работающих с резко переменной нагрузкой, требует применения быстродействующей форсировки тока возбуждения СД. Она позволяет повышать (кратковременно) его перегрузочную способность и снижать установленную мощность [11].

Все это определило использование в синхронных электроприводах быстродействующих возбудителей с автоматическим регулированием возбуждения АРВ в зависимости от требований электропривода и системы электроснабжения.

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличается синхронный двигатель от асинхронного?
2. Что представляет система возбуждения синхронного двигателя?
3. Перечислите достоинства синхронного двигателя.
4. Какие свойства синхронного двигателя позволяют использовать его в качестве компенсатора реактивной энергии?
5. Поясните перевод синхронного двигателя в режим компенсации реактивной энергии.
6. Можно ли и необходимо ли изменять максимальный момент синхронного двигателя?
7. Поясните процесс пуска синхронного двигателя.
8. Что такое подсинхронная частота вращения синхронного двигателя, как и для чего она определяется?
9. Синхронный двигатель это потребитель или генератор реактивной энергии.

4.4. Расчет и выбор мощности двигателей

В настоящее время большинство машин и механизмов приводятся в действие электрическими машинами, рассчитанными на определенную мощность. Запланированный ресурс их использования (15–20) лет, может быть, достигнут только при правильном выборе мощности двигателя. Величина мощности двигателя должна быть выбрана в полном соответствии с предполагаемой нагрузкой и режимом работы.

Завышение мощности двигателя неоправданно увеличивает габариты, вес и первоначальную стоимость установки, ухудшает экономические показатели электропривода (снижает КПД и коэффициент мощности), что отрицательно сказывается на эксплуатационных характеристиках системы любого оборудования. Кроме этого применение двигателя завышенной мощности приводит к увеличению капитальных затрат, установленной мощности трансформатора и преобразователя, повышенному расходу энергии за счет снижения КПД и коэффициента мощности (последнее для асинхронного двигателя).

Применение двигателей недостаточной мощности приводит к преждевременному выходу их из строя, возникновению аварий, простоя рабочей машины и снижению производительности. В процессе

эксплуатации двигателя могут иметь место кратковременные толчки нагрузки, которые, не оказывая существенного влияния на нагрев машины, могут вызвать различные отклонения от нормального режима работы (нарушение коммутации в машинах постоянного тока, «опрокидывание» асинхронных двигателей, выход из синхронизма синхронных машин).

Производительность механизмов, работающих с частыми пусками и торможениями, в значительной мере зависит от длительности разгона и торможения. Сокращение длительности выполнения этих операций может быть достигнуто путем правильного выбора, так называемого оптимального передаточного числа редуктора между электродвигателем и механизмом.

Из изложенного следует, что правильный выбор мощности двигателя связан с решением таких вопросов, как их нагрев, ограничение максимальных нагрузок, формирование требуемых динамических свойств и др.

4.4.1. Нагрузочные диаграммы

Чтобы рассчитать мощность и выбрать двигатель, необходимо иметь нагрузочную диаграмму – зависимость тока I , момента M и мощности нагрузки двигателя P от времени.

В зависимости от характера изменения этих величин, установлены восемь номинальных режимов S1-S8, Основными считаются S1 (продолжительный), S2 (кратковременный) и S3 (повторно-кратковременный):

Продолжительным называется такой режим работы электрической машины, при котором за период ее включения температура всех частей достигает установившегося значения (при неизменной нагрузке). Нагрузка электродвигателя при длительном режиме работы может быть постоянной (рис. 4.31, а) или меняющейся по некоторому закону (рис. 4.31, б).

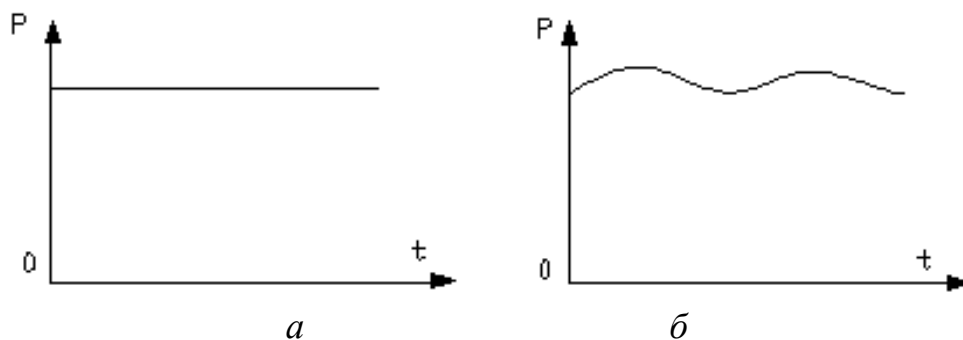


Рис. 4.31. Нагрузочные диаграммы:
а – постоянная; б – переменная нагрузка

Кратковременным называется режим работы двигателя, в котором за время включения двигателя его температура не достигает установившегося значения, а за время последующей паузы она снижается до температуры окружающей среды.

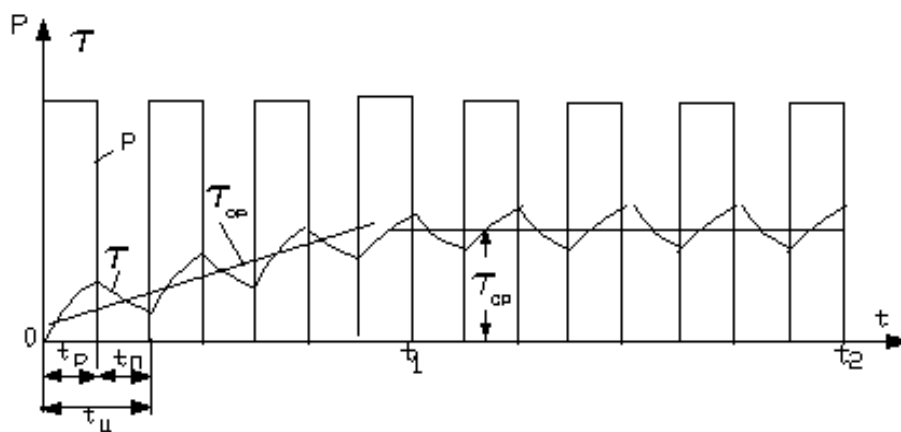


Рис. 4.32. Нагрузочная диаграмма двигателя в повторно-кратковременном режиме работы

Повторно-кратковременный режим. Диаграмма, характеризующая повторно-кратковременный режим работы двигателя, приведена на рис. 4.32. В этом режиме двигатель периодически подключается к источнику питания. За время включения двигателя его температура не достигает установившегося значения, а за время последующей паузы не снижается до температуры окружающей среды. В интервале $0-t_1$ температура двигателя повышается. Далее наступает установившийся режим, при котором средняя температура остается на постоянном уровне.

В качестве характеристик повторно кратковременного режима работы двигателей используется относительная продолжительность включения

$$\varepsilon = \frac{t_h}{t_h + t_g} = \frac{t_h}{t_w},$$

где t_p – период включения двигателя; $t_{п}$ – период паузы; $t_{ц}$ – время цикла работы.

В справочной литературе относительная продолжительность включения (ПВ) выражается в процентах:

$$\text{ПВ} = \frac{t_p}{t_{ц}} 100 = \varepsilon \cdot 100.$$

Для механизмов, работающих в повторно-кратковременном режиме (в основном это крановые механизмы, спускоподъемный агрегат установок глубокого бурения), выпускаются двигатели со стандартными ПВ = 15 %, 25 %, 40 % и 60 %. Продолжительность одного цикла не должна превышать 10 мин. При $t > 10$ мин температура двигателя за время включения достигает установившегося значения и режим работы будет считаться продолжительным.

4.4.2. Выбор мощности двигателей для механизмов с продолжительным режимом работы

Определение мощности двигателя, работающего в продолжительном режиме с постоянной нагрузкой, производится по статической нагрузке, рассчитываемой по производительности механизма с учетом технологических и конструктивных особенностей установки. Потери в передачах между двигателем и рабочей машиной учитываются КПД. По расчетной статической мощности подбирается (по каталогу) двигатель с ближайшей большей мощностью.

Например, расчетная статическая мощность электродвигателя для привода лебедки определяется по формуле

$$P = \frac{(Q_{\max} + Q_0) v}{1000 \eta} \text{ кВт},$$

где $Q_{\max}$ и Q_0 – вес поднимаемого груза и талевого блока, Н; σ – скорость подъема груза, м/с; η – к. п. д. механизма подъема.

Мощность двигателя насоса, кВт:

$$P = \frac{\gamma Q (H + \Delta H)}{1000 \eta_p \eta_n} \text{ кВт},$$

где H – высота напора (сумма высот всасывания и нагнетания), м;
 ΔH – падение напора в магистральных, м; η_p и η_n – к. п. д. передачи и насоса; γ – удельный вес перекачиваемой жидкости, Н/м³; Q – расход жидкости, м³/с.

Мощность двигателя вентилятора:

$$P = \frac{V h 10^{-3}}{\eta_d \eta_n} \text{ кВт},$$

где V – производительность вентилятора (количество нагнетаемого воздуха), м³/с;

h – суммарный напор, Н/м²;

η_d – КПД передачи вентилятора;

η_n – КПД передачи механизма.

Двигатель, мощность которого выбрана по статической нагрузке, может нормально работать лишь в том случае, если температура окружающей среды, не отличается от стандартной (+35 °С). При других температурах окружающей среды двигатель, развивая необходимую по условиям статической нагрузки мощность, будет либо перегружен, либо недогружен. В этом случае надо учесть фактические условия работы двигателя и внести в расчет необходимую поправку.

4.4.3. Выбор мощности двигателей для механизмов с неравномерной нагрузкой и продолжительным режимом работы [9]

Для выбора мощности двигателя в этом режиме используются два метода: метод средних потерь и метод эквивалентных величин.

Метод средних потерь можно применять для любого типа двигателей.

Для его использования необходимо иметь характеристику двигателя $\eta = f(P)$ и нагрузочную диаграмму $P = f(t)$. Расчет и выбор мощности двигателя этим методом может быть выполнен в следующем порядке:

- по нагрузочной диаграмме определяют $P_{\text{ср}}$;
- по мощности, рассчитанной по формуле $P=(1,1-1,3)P_{\text{ср}}$, выбирают по каталогу двигатель;

- определяют потери мощности при различных нагрузках

$$\Delta p = P \frac{1-\eta}{\eta}$$

(величина P определяется по нагрузочной диаграмме);

- определяют средние потери мощности за цикл

$$\Delta p_{\text{ср}} = \frac{\Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \dots + \Delta p_n}{t_{\text{ц}}},$$

- определяют потери в двигателе при работе с номинальной нагрузкой

$$\Delta p_{\text{н}} = P_{\text{н}} \frac{1 + \eta_{\text{н}}}{\eta_{\text{н}}}.$$

Если выполняется условие $\Delta p_{\text{ср}} < \Delta p_{\text{н}}$ и $\Delta p_{\text{н}}$ незначительно превышает $\Delta p_{\text{ср}}$, то двигатель выбран правильно.

Кроме этого двигатель должен быть проверен по перегрузочной способности. Максимальный момент в нагрузочной диаграмме должен быть меньше допустимого момента, развиваемого двигателем постоянного тока ($M_{\text{мах}} < 2,5 M_{\text{н}}$) и критического момента асинхронного двигателя ($M_{\text{мах}} < M_{\text{кр.}}$).

Пример 4.4. Методом средних потерь выбрать мощность двигателя постоянного тока. Нагрузочная диаграмма приведена на рис. 4.33, а

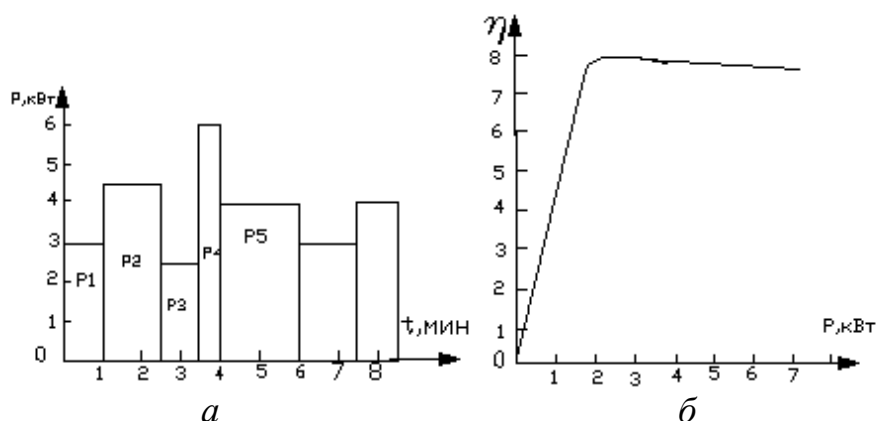


Рис. 4.33. Нагрузочная диаграмма (а) и характеристика $\eta = f(P)$

1. По нагрузочной диаграмме определяем среднюю мощность

$$P_{cp} = \frac{P_1 t_1 + P_2 t_2 + P_3 t_3 + P_4 t_4 + P_5 t_5 + P_6 t_6 + P_7 t_7}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7} =$$

$$\frac{3 \cdot 1 + 4,5 \cdot 1,5 + 2,5 \cdot 1 + 6 \cdot 0,5 + 4 \cdot 2 + 3 \cdot 1,5 + 4 \cdot 1}{1 + 1,5 + 1 + 0,5 + 2 + 1,5 + 1} = 3,73.$$

2. Ориентировочно определяем необходимую мощность двигателя

$$P = 1,2 P_{cp} = 1,2 \cdot 3,73 = 4,47 \text{ кВт.}$$

3. По каталогу выбираем двигатель, у которого $P_n \geq P$.

Для этих условий подходит двигатель постоянного тока: тип – 2ПА, $P_n = 4,5 \text{ кВт}$; $U_n = 110 \text{ В}$; $n_n = 950 \text{ об/мин}$; $\eta \% = 78,5$.

3. Определяем потери мощности в двигателе при различных нагрузках:

$$\Delta P_1 = P_1 \frac{1 - \eta_1}{\eta_1} = 3(1 - 0,79)/0,79 = 0,8 \text{ кВт};$$

$$\Delta P_2 = 4,5 \cdot (1 - 0,785) / 0,785 = 1,23;$$

$$\Delta P_3 = 2,5 \cdot (1 - 0,795) / 0,795 = 0,64;$$

$$\Delta P_4 = 6 \cdot (1 - 0,75) / 0,75 = 2,0;$$

$$\Delta P_5 = 4 \cdot (1 - 0,787) / 0,787 = 1,08;$$

$$\Delta P_6 = 3 \cdot (1 - 0,79) / 0,79 = 0,85;$$

$$\Delta P_7 = 4 \cdot (1 - 0,785) / 0,785 = 1,1;$$

$$\Delta P_{cp} = \frac{\Delta P_1 t_1 + \Delta P_2 t_2 + \Delta P_3 t_3 + \Delta P_4 t_4 + \Delta P_5 t_5 + \Delta P_6 t_6 + \Delta P_7 t_7}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6 + t_7} =$$

$$= \frac{0,8 \cdot 1 + 1,23 \cdot 2 + 0,64 \cdot 1 + 2 \cdot 0,5 + 1,08 \cdot 2 + 0,85 \cdot 1,5 + 1,1 \cdot 1}{1 + 1,5 + 1 + 0,5 + 2 + 1,5 + 1} = 1,11 \text{ кВт.}$$

4. Потери мощности при работе двигателя с номинальной нагрузкой:

$$\Delta P_n = 4,5 \cdot (1 - 0,785) / 0,785 = 1,23 \text{ кВт.}$$

Условие для правильного выбора мощности по тепловому режиму правильного выбора двигателя $\Delta P_n \geq \Delta P_{cp}$ выполняется, т. е. двигатель выбран правильно.

Выбор двигателя этим методом требует кропотливой работы и применяется лишь в тех случаях, когда необходимо точно определить мощность двигателя.

Для расчета и выбора мощности двигателей широко используются более простые методы – *методы эквивалентных величин: тока, момента и мощности*. Чтобы рассчитать мощность и выбрать двигатель методами эквивалентных величин, достаточно иметь нагрузочные диаграммы: $I=f(t)$, $M=f(t)$, $P=f(t)$, рис. (4.34).

Метод эквивалентного тока основан на том, что проходящий в двигателе и изменяющийся по величине фактический ток заменяется в расчетах эквивалентным током I_3 , который вызывает в двигателе те же потери, что и действительный ток.

Потери в двигателе делят на постоянные и переменные. Постоянные потери Δp не зависят от нагрузки и представляют собой потери в электротехнической стали, механические потери в подшипниках и вентиляционные потери трения о воздух.

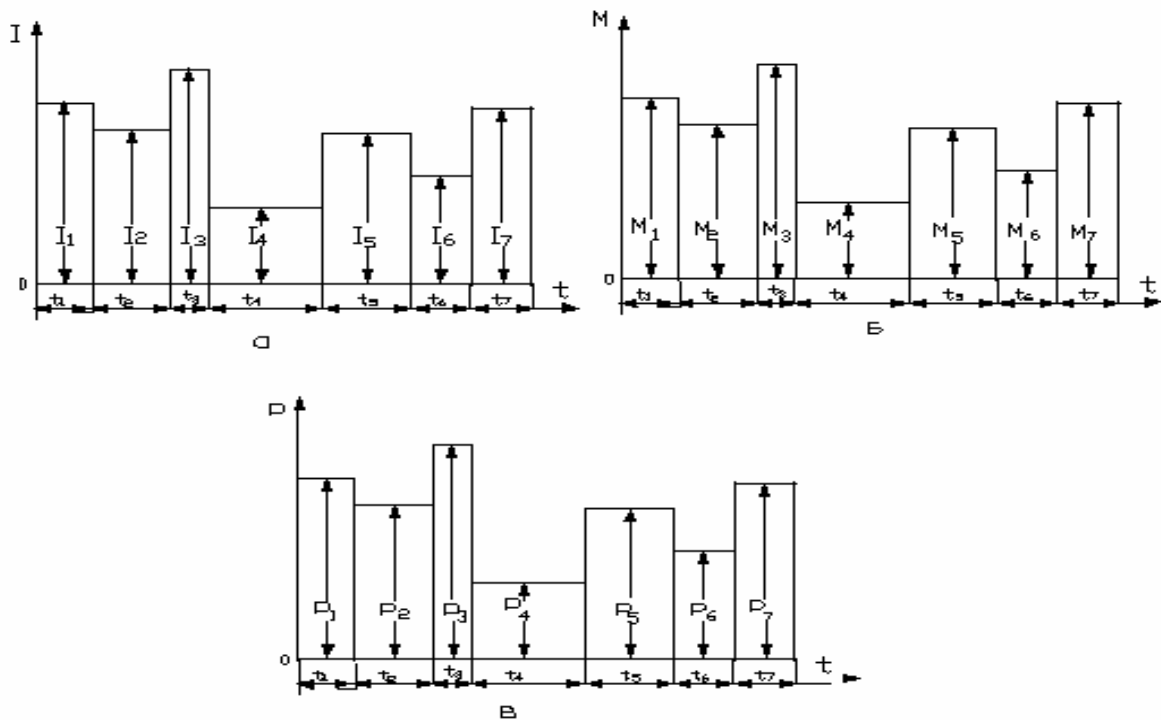


Рис. 4.34. Нагрузочные диаграммы двигателя:
а – по току; б – моменту; в – мощности

Переменные потери – это потери, связанные с нагревом обмоток, равные $I^2 R$. Следовательно, полные потери на каждом участке нагрузочной диаграммы

$$\Delta P_t = \Delta P_0 + I_c^2 R, \quad (4.34)$$

а средние потери

$$\Delta P_{cp} = \Delta P_0 + I_l R.$$

Подставляя формулы (5.2) и (5.3) в выражения (5.1), исключив ΔP_0 , после ряда преобразований получаем

$$I_3 = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + I_3^2 t_3 + I_4^2 t_4 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \dots + t_n}}.$$

По каталогу выбирают двигатель, у которого $I_n \geq I_3$.

Выбранный двигатель необходимо проверить по перегрузочной способности. В нагрузочной диаграмме (рис. 1.34, а) $I_{max} = I_4$. Выбранный двигатель проходит по перегрузочной способности при условии $I_{max} < 2,5 I_n$.

Если окажется, что указанные условия не выполняются, то необходимо выбрать двигатель ближайшей большей мощности. Этот двигатель будет недоиспользован по нагреву, и необходима проверка только по перегрузочной способности.

В двигателе независимого возбуждения $M = k\Phi I$. При постоянном магнитном потоке момент пропорционален току и для проверки двигателя по нагреву может быть использован эквивалентный момент, найденный по нагрузочной диаграмме (рис. 4.34, б).

$$M_3 = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \dots + t_n}}.$$

Достаточная перегрузочная способность двигателя обеспечивается при условии $M_3 < 2,5 M_n$.

Асинхронные двигатели имеют жесткую механическую характеристику. При работе в длительном режиме можно допустить, что момент двигателя пропорционален току статора, и для его проверки

по нагреву можно использовать метод эквивалентного момента. Выбранный двигатель методом эквивалентного момента можно считать правильным при условиях: $M_э \leq M_n$ (по нагреву) и $M_{\max} < M_k$ (по перегрузке).

При тех же условиях для выбора мощности двигателя можно использовать метод эквивалентной мощности, определенный по нагрузочной диаграмме (рис. 4.34, в)

$$P_э = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + \dots + t_n}}.$$

Из рассмотренных методов наиболее достоверным является метод эквивалентного тока. Этим методом можно пользоваться почти во всех случаях, кроме тех, когда необходимо учитывать изменение «постоянных потерь», т. е. потерь в стали и на трение в двигателе. Метод этот неприменим также и для короткозамкнутых двигателей с глубокими пазами или двойной клеткой, т. к. вторичное сопротивление их сильно изменяется в пусковых и тормозных режимах. Здесь следует применять методы, основанные на непосредственном определении потерь.

Методом эквивалентного момента нельзя пользоваться в указанных выше (для эквивалентного тока) случаях. Кроме того, формула эквивалентного момента неприменима для двигателей, у которых магнитный поток не остается постоянным (например, для двигателей последовательного возбуждения, пусковых и тормозных режимов, короткозамкнутого двигателя и т. п.).

Метод эквивалентной мощности, кроме тех же ограничений, имеет еще одно. Он не может применяться для двигателей, у которых скорость в процессе работы значительно изменяется, особенно в пусковых и тормозных режимах.

При любом графике нагрузки электродвигатель должен удовлетворять следующим основным требованиям: 1) перегрев двигателя не должен превышать значений, установленных на электрические машины; 2) двигатель должен сообщить рабочей машине необходимую скорость вращения; 3) при соответствующей скорости вращения двигатель должен развить момент, требуемый механизмом

Практические задачи выбора по мощности двигателей возникают как на стадии проектирования при предварительном выборе двигателей

для производственных механизмов и при проверке их по нагреву после окончательного расчета системы, так и в процессе эксплуатации.

Пример 4.5. По нагрузочной диаграмме (рис. 4.35) выбрать мощность двигателя методом эквивалентных величин рассчитать и выбрать мощность двигателя. Режим работы – повторно-кратковременный.

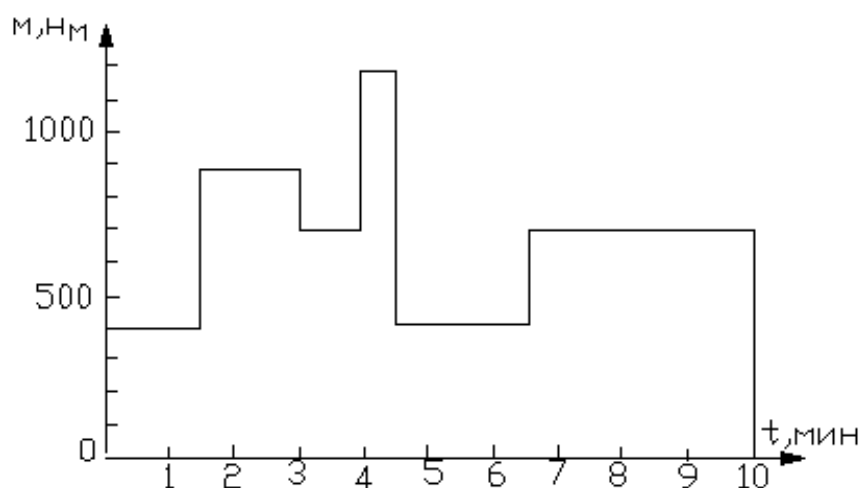


Рис. 4.35. Нагрузочная диаграмма $M=f(t)$

$$M_э = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + M_4^2 t_4 + M_5^2 + M_6^2 t_6}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5 + t_6}} = <$$

$$= \sqrt{\frac{400^2 \cdot 1,5 + 800^2 \cdot 1,5 + 700^2 \cdot 1 + 1200^2 \cdot 0,5 + 400^2 \cdot 2 + 700^2 \cdot 3,5}{1,5 + 1,5 + 1 + 0,5 + 2 + 3,5}} = 590, \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

По каталогу [12] выбираем двигатель RA200LA2. Паспортные данные двигателя: $P_n = 30 \text{ кВт}$; $M_{\max} = 1778 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $\eta = 0,92$; $M_{\max}/M_n = 3$. $M_n = 1778/3 = 692 \text{ Н}\cdot\text{м}$. У выбранного двигателя M_n больше $M_э$, $M_{\max}$ больше максимального момента в нагрузочной диаграмме, т. е. выбранный двигатель проходит по тепловому режиму и перегрузке.

Вопросы для самопроверки

1. Какие величины приводятся в паспортных данных двигателей?
2. К чему приводит неправильный выбор мощности двигателя?
3. Поясните как выбрать мощность двигателя методом средних потерь.

4. Что такое нагрузочная диаграмма и как ее получают?
5. В каком случае нельзя использовать для выбора мощности двигателя методы эквивалентного момента и метод эквивалентной мощности?
6. Как проверяется прохождение выбранного двигателя по перегрузочной способности?
7. Перечислите стандартные ПВ крановых двигателей.

4.5. Эксплуатация электрических машин и меры безопасности

4.5.1. Обслуживание асинхронных двигателей [4]

Нормальная работа асинхронных машин в системах электропривода обеспечивается при условии, если колебание напряжения на статоре находится в пределах 95–105 % номинального. Обслуживающий персонал должен осуществлять постоянный надзор за нагрузкой двигателей, температурой их обмоток, состоянием подшипников, вибрацией и другими параметрами, а также за состоянием пусковых и регулировочных аппаратов.

Наблюдение за рабочей нагрузкой АД проводится по показаниям амперметра или с помощью токоизмерительных клещей. Длительная нагрузка АД не должна превышать номинальной. Допускается кратковременная перегрузка двигателя по току статора до 50 % номинальной в течение не более 1–2 мин.

Температура обмоток двигателей контролируется либо с помощью термопар и термометров (для крупных двигателей), либо на ощупь. Контрольные измерения выполняют с помощью термометра. При повышении допустимой температуры необходимо снизить нагрузку АД, а также установить причину перегрева обмоток.

Обслуживающий персонал обязан периодически контролировать состояние подшипников двигателей, проверять их вибрацию, нагрев, обнаруживать ненормальный шум, указывающий на появление дефекта или недостаточное количество смазки. Смена смазки в подшипниках должна проводиться не реже одного раза в полгода.

Повышение вибрации двигателя приводит к ухудшению энергетических показателей электропривода и сокращению срока службы АД, поэтому при обнаружении повышенной вибрации необходимо принять меры к ее устранению или снижению до допустимого уровня.

Во избежание случаев все вращающиеся части АД (шкивы, полумуфты, концы валов, ременные передачи и др.) должны быть надежно закрыты ограждениями. То же относится к выводам обмоток АД и подключенным к ним питающим кабелям.

При капитальных ремонтах двигателей необходимо проводить измерение воздушного зазора между статором и ротором. У двигателей, снабженных специальными люками в торцевых щитках, измерение воздушного зазора может периодически выполняться во время профилактических осмотров и ремонтов. Увеличение воздушного зазора или его неравномерность по окружности расточки статора влечет за собой увеличение тока холостого хода и снижение коэффициента мощности АД. Неравномерность воздушного зазора чаще всего является следствием выработки подшипников.

У двигателей с фазным ротором нужно контролировать состояние кольцевого токосъема в роторе, периодически менять изношенные щетки, очищать кольца от попавшей пыли и грязи, выполнять продувку двигателя сжатым воздухом с целью удаления пыли. У двигателей, работающих в среде с большим содержанием токопроводящей пыли, паров жидкостей, газа и т. п., узел кольцевого токосъема должен быть герметически закрыт. Как показывает опыт эксплуатации [12], нарушение герметичности приводит к перекрытию колец в период пуска или в режиме противовключения, что в свою очередь ведет к срабатыванию максимально-токовой защиты, а в ряде случаев – к выходу АД из строя.

Релейно-контакторная аппаратура также нуждается в постоянном профилактическом уходе и ремонте, который осуществляется в основном в период плановых остановок. При этом проводится очистка аппаратов от пыли путем продувки сжатым воздухом зачистка контактов, в особенности силовых контактов пускателей и контакторов, проверка надежности контактных соединений и целостность проводников в месте их присоединения к зажимам. Следует отметить, что нередко имеет место отламывание проводов небольшого сечения, в особенности алюминиевых, от повышенной вибрации аппаратуры. То же относится и к питающим кабелям асинхронных двигателей в случае высокой вибрации последних.

Уставки реле защиты должны периодически проверяться по заранее утвержденному графику, поскольку характеристики реле с течением времени меняются. Полные плановые проверки устройств релейной защиты, автоматики и вторичных цепей в целом должны про-

водиться не реже 1 раза в 3 года, как правило, одновременно с ремонтом соответствующих первичных цепей и силового оборудования. В случае неправильного действия или отказа в работе реле защиты проводит соответствующее исследование реле.

Одновременно с полными плановыми проверками проводится измерение сопротивления изоляции вторичных цепей, а также силового электрооборудования.

В табл. 4.2. приведены некоторые из часто встречающихся неисправностей асинхронного электропривода и их вероятные причины. Способы устранения указанных неисправностей вытекают из характера их причин.

Таблица 4.2

Неисправности и их причины

Неисправность, ее признаки	Возможная причина неисправности
При включении АД не вращается, гудит	Нет напряжения в одной из фаз Разрыв нескольких стержней обмотки короткозамкнутого ротора, разрыв короткозамыкающего кольца
При включении АД срабатывает максимально-токовая защита	Замыкание обмотки статора на корпус. Короткое замыкание двух зажимов статора. Ложное срабатывание защиты
Пониженная скорость вращения АД	Напряжение на зажимах АД понижено. Обрыв в одной фазе обмотки статора или ротора
Повышенный нагрев АД	Повышенное напряжение на зажимах АД. Перегрузка АД. Междувитковое замыкание в обмотке статора. Разрыв стержня обмотки короткозамкнутого ротора
При нажатии кнопки «СТОП» АД не отключается	Приварились главные контакты контактора, пускателя
Повышенное искрение щеток АД (с фазным ротором)	Плохо пришлифованы щетки. Застревание щеток в обойме щеткодержателя. Ухудшение качества поверхности колец ротор (загрязнение, неровность поверхности и т. п.)
Повышенная вибрация АД	Несоосность валов АД и механизма. Небаланс ротора АД. Некачественно установленный агрегат на фундаменте, недостаточная жесткость фундамента
Повышенный шум подшипника, перегрев подшипника	Недостаточная смазка. Выработка или повреждение подшипника. Некачественное центрирование АД с приводным механизмом

Неисправность, ее признаки	Возможная причина неисправности
Отключение АД с фазным ротором в процессе пуска максимально-токовой защитой	Увеличение пускового тока из-за уменьшения выдержек реле времени (реле ускорения). Перекрытие контактных колец ротора токопроводящей пылью
Чрезмерное возрастание скорости АД в режиме генераторного торможения с возвратом энергии в сеть, например, при спуске груза	Значительное снижение питающего напряжения

4.5.2. Обслуживание двигателей постоянного тока

Повреждения электрических машин подразделяют на два вида: электрические и механические. К электрическим относятся: повреждения обмоток якоря и возбуждения, коллектора, щеток и щеточного аппарата. К механическим относят: повреждение станины, стали, вала и подшипников. Наибольшее число повреждений приходится на обмотки. Основными причинами преждевременного выхода обмоток из строя являются: нарушение изоляции при больших и длительных перегрузках, низкое качество изготовления и ремонта. Ухудшение изоляции приводит к замыканиям между соседними витками (в местах изгиба) или на корпус в местах выхода обмотки из пазов на острых углах. В местах паяк встречаются обрывы обмоток, довольно часто повреждается коллектор.

Причины и характер отказов при работе электрических машин устанавливают путем визуального обследования и измерения сопротивления изоляции и других величин

При визуальном обследовании проверяют: механические повреждения, способные вызвать отклонение от нормальной работы электропривода и создать аварийную ситуацию; комплектность и состояние основных узлов и деталей, обращая внимание на характерные признаки повреждения (течь смазки, следы «переброса», нарушение изоляции, наличие уплотнений на клеммных коробках.

При осмотре коллектора проверяют:

- правильность установки и притертости щеток;
- наличие следов нагара под щетками;
- наличие заеданий щеток в щеткодержателе;

- степень разрушения щеток.

Любой из перечисленных факторов может вызвать сильное искрение под щетками.

Если внешний осмотр показал, что машина исправна, замеряют величину *осевого разбега* якоря, для чего последний сдвигают в любую сторону до упора. В приспособлении, закрепленном на машине, устанавливают индикатор таким образом, чтобы наконечник измерительного стержня касался торцевой поверхности вала, а стрелка индикатора находилась против нулевого деления шкалы. Якорь сдвигают в противоположную сторону туда, где закреплен индикатор, и по его показанию определяют величину осевого разбега, который для подшипников скольжения должен быть в пределах 2–4 мм.

Далее замеряют *величину воздушного зазора между якорем и статором* с помощью пластинчатого или проволочного щупа. Зазор проверяют под каждым полюсом. Средний зазор в результате трех-четырех измерений должен отклоняться от номинального не более чем на 10 %.

Испытание электрической прочности изоляции проводится после осмотра внутренней части машины. При этом особое внимание обращают на отсутствие подгаров и выжигов по рабочей части коллектора, целостность бандажей крепления обмотки якоря, надежность крепления щеткодержателей и состояние щеток.

Электрическую прочность изоляции по отношению к корпусу проверяют мегомметром. Для машин с номинальным напряжением до 500 В включительно применяют мегомметр на 500 В, а для машин с номинальным напряжением 1000 В и выше – мегомметром на 1000 В. Сопротивление изоляции должно быть не менее 0,5 МОм. При сопротивлении изоляции ниже 0,5 МОм машину подвергают сушке, после чего повторно измеряют изоляцию.

При сопротивлении, равном нулю, машину разбирают и выявляют место пробоя или другой дефект. После каждой проверки мегомметром *необходимо* разрядить обмотку машины, заземлив ее на корпус.

4.5.3. Электробезопасность при обслуживании электродвигателей

При обслуживании асинхронных двигателей существует опасность поражения электрическим током при случайном прикоснове-

нии к токоведущим частям, находящимся под напряжением, поэтому обслуживающий персонал должен строго соблюдать правила техники безопасности.

Лица, обслуживающие электроустановки единолично, и старшие в смене или бригаде, закрепленные за данной электроустановкой, должны иметь квалификационную группу не ниже IV для установок напряжением выше 1000 В и группу не ниже III для установок напряжением до 1000 В.

Рабочая одежда обслуживающего персонала должна предохранять его от случайного соприкосновения с токоведущими частями, находящимися под напряжением, рукава одежды должны быть застегнуты у запястья. Нужно остерегаться захвата одежды вращающимися частями двигателей и механизмов.

Во всех случаях, когда это возможно, ремонтные и профилактические работы проводятся при полном снятии напряжения. Работы без снятия напряжения выполняются не менее чем двумя лицами обслуживающего персонала и обычно непродолжительны – до 1–1,5 ч.

Работы, связанные с прикосновением к токоведущим частям, находящимся под напряжением до 1000 В, необходимо выполнять в диэлектрических перчатках и на изолирующем коврике. Если характер работы не позволяет пользоваться диэлектрическими перчатками, то следует пользоваться инструментом с изолированными рукоятками.

При работе вблизи токоведущих частей, находящихся под напряжением, или на самих токоведущих частях электрик должен занять такое положение, при котором токоведущие части расположены спереди или с двух сторон.

Следует всячески избегать прикосновения обеими руками или двумя точками тела к токоведущим частям разной полярности.

При работе на токоведущих частях, находящихся под напряжением или вблизи них, когда не исключено возникновение электрической дуги – отключение контакторов, пускателей, смена предохранителей под нагрузкой и т. п., следует одеть предохранительные очки.

Уход за щетками, работающими двигателями с фазным ротором. Замену щеток разрешается выполнять одному лицу обслуживающего персонала с квалификационной группой не ниже III.

Шлифование колец ротора допускается проводить на вращающемся АД лишь при помощи колодок из изоляционного материала.

После отключения кабеля от питающего напряжения с целью проведения работ концы всех трех фаз кабеля должны быть замкнуты накоротко и заземлены. Нужно иметь в виду, что после отключения от сети на кабеле сохраняется напряжение, обусловленное его емкостью, поэтому до снятия заряда и заземления жилы кабеля следует рассматривать как находящиеся под напряжением. То же относится и к конденсаторам, которые после отключения от сети длительное время сохраняют электрический заряд. Перед выполнением работ, связанных с прикосновением к выводам отключенного конденсатора, необходимо разрядить его на резистор с малым сопротивлением или замкнуть выводы конденсатора накоротко, соблюдая необходимые меры предосторожности.

Каждый работник обслуживающего персонала должен уметь освободить пострадавшего, соприкоснувшегося с токоведущей частью находящейся под напряжением и оказывать первую помощь пострадавшему от электрического тока.

4.6. Трансформаторы

4.6.1. Назначение и устройство трансформаторов

Трансформатором называется устройство, состоящее из сердечника и не менее двух обмоток. В зависимости от назначения трансформаторы подразделяются на силовые, предназначенные передачи электрической энергии, и специальные: сварочные, используемые для производства сварочных работ; измерительные, предназначенные для измерения электрических величин, и др.

Есть и другие определения названия [12], более подходящие для силовых трансформаторов – электромагнитное статическое устройство, предназначенное для передачи энергии из контура первичной обмотки, подключенной к сети, в контур вторичной обмотки, подключенной к нагрузке.

Любой трансформатор состоит из сердечника, набранного из листов трансформаторной стали и двух или нескольких обмоток, связанных между собой электромагнитно, а в автотрансформаторах есть и электрическая связь.

Конструкции сердечников однофазных и трехфазных трансформаторов приведены на рис. 4.36.

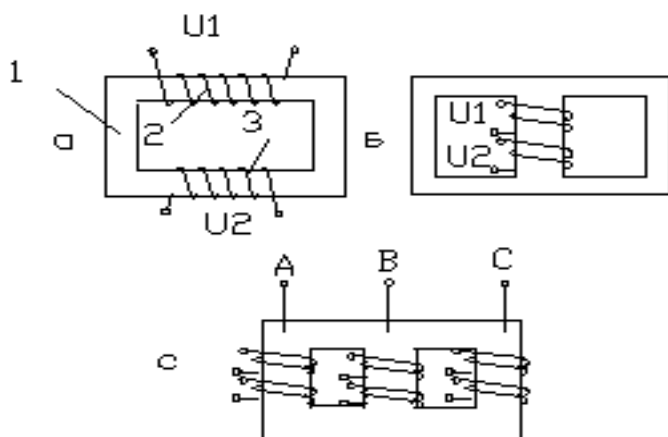


Рис. 4.36. Сердечники трансформаторов:

а – стержневого типа; б – бронзового типа; трехфазного

Трансформатор, имеющий две обмотки, называется двухмоточным; трансформатор с тремя или несколькими обмотками – трехмоточным или многообмоточным. По роду тока различают трансформаторы однофазные, трехфазные и многофазные. Под обмоткой многофазного трансформатора понимают совокупность всех фазных обмоток одинакового напряжения, соединенных между собой определенным образом. Та из обмоток трансформатора, к которой подводится напряжение сети U_1 , называется первичной. Напряжение U_2 , наводимое на вторичной обмотке, подается к потребителям.

При разомкнутой вторичной обмотке трансформатор работает без нагрузки (холостой ход). При этом в первичной обмотке протекает ток, называемый током холостого хода ($I_1 = I_0$). Величина тока I_0 не превышает 10 % номинального тока.

Ток холостого хода I_0 , протекающий по первичной обмотке, создает в сердечнике магнитный поток Φ . Этот магнитный поток, пересекая витки всех обмоток (первичной и вторичных), наводит в них ЭДС

$$E = 4.44 \varpi f \Phi,$$

где ϖ – число витков в обмотке; f – частота тока; Φ – магнитный поток, Вб.

Отношение ЭДС, наводимой на первичной обмотке E_1 к ЭДС на вторичной обмотке E_2 , называется коэффициентом трансформации

$$k_T = \frac{E_1}{E_2} = \frac{\varpi_1}{\varpi_2},$$

где ϖ_1, ϖ_2 – число витков обмоток ВН и НН;

У повышающих трансформаторов k_T определяют таким образом:

$$k_T = \frac{E_2}{E_1} = \frac{\varpi_2}{\varpi_1}.$$

4.6.2. Силовые трансформаторы

Мощные трансформаторы, используемые в системах электро-снабжения для повышения и понижения напряжения, относят к силовым трансформаторам. Различают два вида силовых трансформаторов – сухие и маслонаполненные (масляные). Масляные трансформаторы выпускаются с плоской и пространственной магнитными системами. Общий вид этих трансформаторов приведен на рис. 4.37. [8]

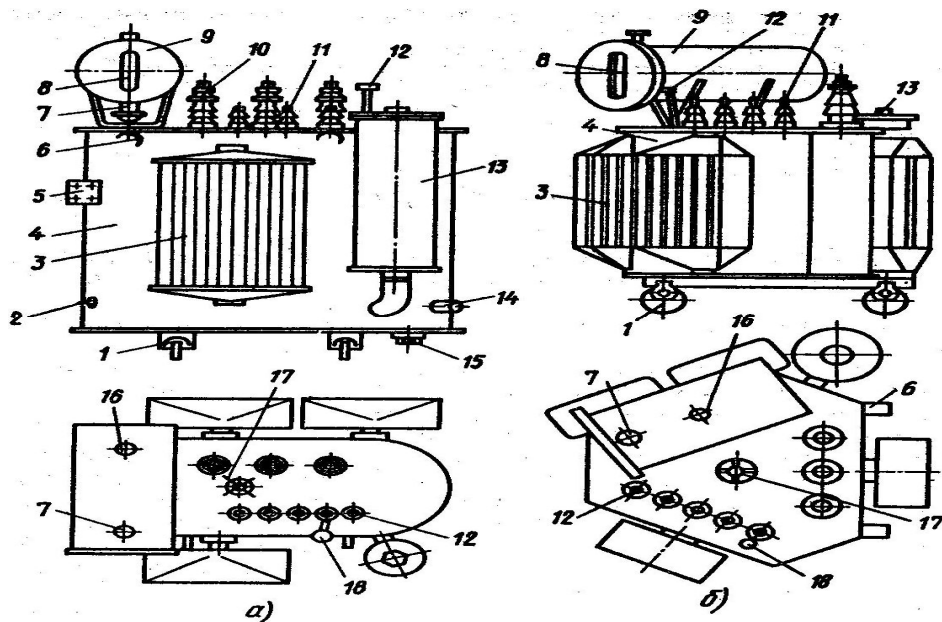


Рис. 4.37. Трансформаторы:

а – с плоской; б – с пространственной магнитными системами.

Основные элементы трансформатора: 1 – транспортный ролик; 2 – болт заземления; 3 – радиатор; 4 – бак; 5 – щиток; 6 – крюк для подъема; 7 – воздухоосушитель; 8 – маслоуказатель; 9 – расширитель; 10 – ввод ВН; 11 – ввод ВН; 12 – термометр; 13 – термосифонный фильтр; 14 – пробка для отбора пробы масла; 15 – пробка для слива; 16 – пробка для долива масла; 17 – переключатель; 18 – пробивной предохранитель

К параметрам, характеризующим трансформаторы, относятся:
- номинальная мощность трансформатора, кВА;

- номинальное напряжение, подводимое к первичной обмотке трансформатора;
- номинальные напряжения на вторичных обмотках трансформатора;
- номинальные токи в первичной и вторичных обмотках трансформатора;
- группа соединений обмоток трансформатора;
- коэффициент полезного действия трансформатора;
- коэффициент мощности, $\cos \varphi$;
- коэффициент трансформации, k_T ;
- напряжение короткого замыкания, $U_K \%$;
- мощность потерь короткого замыкания Δp_K .

Основные номинальные величины приводятся на щитке трансформатора.

Важным параметром трансформатора является напряжение короткого замыкания U_K . U_K – это такое напряжение на первичной обмотке, при котором по вторичной короткозамкнутой обмотке протекает номинальный ток. Напряжение короткого замыкания выражается в процентах номинального. Чем больше напряжение короткого замыкания U_K , тем больше внутреннее сопротивление обмоток трансформатора, наклон его внешней характеристики U_d и потери энергии.

Одним из важнейших параметров силовых трансформаторов является группа соединений его обмоток. В основном применяются два способа соединения обмоток – в звезду или треугольник. В системах электроснабжения, как правило, используется несколько трансформаторов, включаемых раздельно или параллельно. На параллельную работу силовые трансформаторы могут включаться при определенных условиях:

- одинаковых напряжениях на первичных и вторичных обмотках;
- одинаковом сдвиге фаз между напряжениями первичной и вторичной обмоток трансформатора;
- равенстве напряжений короткого замыкания (трансформатор с большим напряжением короткого замыкания будет меньше нагружен). Допускается разброс напряжений короткого замыкания не более 10 %;

Величина сдвига фаз между напряжениями на первичной и вторичной обмотках трансформатора определяет группу соединений обмоток трансформатора. Для этого используют часовой механизм.

При полном обороте часовой стрелки ее угол поворота составляет 360° . За каждый час стрелка поворачивается на 30° .

Если совместить вектор напряжения на первичной обмотке одной фазы с часовой стрелкой, установленной на отметке 12, то положение вектора напряжения на вторичной обмотке этой фазы будет зависеть от схемы ее соединения. Если соединить одноименные выводы первичной и вторичной обмоток в звезду, то вектор напряжения на вторичной обмотке будет совпадет с положением вектора напряжения на первичной обмотке, что соответствует группе соединений обмоток $Y/Y - 0$. Соединив вместе выводы а, в, с вторичной обмотки и оставив прежнее соединение первичной обмотки, получим другую группу $Y/Y - 6$. При соединении первичной обмотки в Y , а вторичной обмотки в Δ образуется группа к $Y/\Delta - 11$.

При параллельном соединении вторичных обмоток трансформаторов с различными группами результирующее напряжение в контурах, образованных вторичными обмотками, может иметь большую величину.

Основные виды повреждения трансформаторов. В процессе эксплуатации наибольшее количество повреждений наблюдается в устройствах обмоток, главной и продольной изоляции, вводов и переключателей. Поступивший в ремонт трансформатор осматривают, знакомятся с эксплуатационно-технической документацией, обращая особое внимание на сведения о работе и дефектах трансформатора в эксплуатации и результаты предыдущего ремонта.

При визуальном осмотре могут быть установлены многие неисправности трансформатора: поверхностное перекрытие, пробой или разрушение изоляторов, вздутие бака, образовавшееся вследствие механических усилий внутри трансформатора при его аварии, нарушение прочности швов бака или уплотнений, наличие течи масла, неисправности работы масло указателя, сливного крана и другие дефекты.

4.6.3. Измерительные трансформаторы [4]

К измерительным относятся трансформаторы тока и напряжения. *Трансформатор тока* (ТТ) (рис.4.38, а) состоит из сердечника и обмоток. Его первичная обмотка, состоящая из одного или нескольких витков, включается как амперметр, т. е. последовательно с нагрузкой. Вторичная обмотка трансформатора подключается к измерительным приборам, соединенным последовательно.

При отключении измерительных приборов вторичную обмотку ТТ необходимо замкнуть ключом s (рис.4.38, б). Суммарное сопротивление амперметра и цепей тока измерительных приборов мало (обычно меньше 2 Ом), поэтому ТТ работает в условиях, близких к режиму короткого замыкания. Напряжение вторичной обмотки ТТ определяется падением напряжения на относительно малом сопротивлении цепей измерительных приборов и соединительных проводов (обычно 1–12 В). Малому напряжению вторичной обмотки соответствует малое значение ЭДС E_2 , а следовательно, и малое значение магнитного потока в магнитопроводе ТТ.

Для возбуждения такого магнитного потока требуется незначительная МДС $\varpi_1 I_{1k}$, поэтому в уравнении

$$\varpi_1 I_1 = \varpi_2 I_2 + \varpi_1 I_{1k}$$

этой величиной можно пренебречь и считать

$$\varpi_1 I_1 = \varpi_2 I_2,$$

или

$$I_1 = (\varpi_2 / \varpi_1) I_2 = K_{\text{тр}} I_2.$$

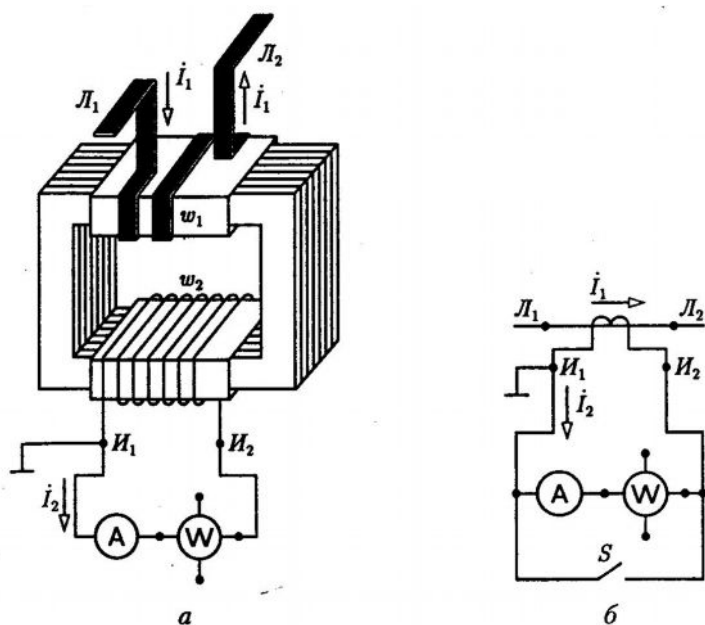


Рис. 4.38 Трансформатор тока:
а – принципиальная схема;
б – условное обозначение

Следовательно, первичный ток может быть определен умножением вторичного тока на постоянный коэффициент трансформации $K_{\text{тр}}$.

Таким образом, включение ТТ дает возможность определить ток в цепях ВН на основании измерения небольшого тока с соблюдением

мер безопасности. Кроме того, ТТ часто применяется для измерения больших токов в установках с напряжением ниже 1000 В. При правильном соединении выводов ТТ и выводов цепей измерительных приборов ток в измерительных приборах и ток в первичной обмотке ТТ совпадают по фазе. Если амперметр предназначен для полной работы с определенным ТТ, то на его шкале наносятся значения первичного тока.

Вторичный номинальный ток у всех ТТ имеет одно и то же стандартное значение 5 А (в некоторых специальных случаях 1 А).

Трансформаторы напряжения Принципиальная схема трансформатора напряжения и его условное обозначение приведены на рис. 4.39. Первичная обмотка трансформатора с большим числом витков включена в цепь высокого напряжения, которое необходимо измерять. К вторичной обмотке со значительно меньшим числом витков подключаются параллельно несколько приборов: вольтметр и др. Один вывод вторичной обмотки и корпус трансформатора заземляются. Это делается на случай повреждения изоляции, и замыкания на землю цепи тока (рис. 4.39, б).

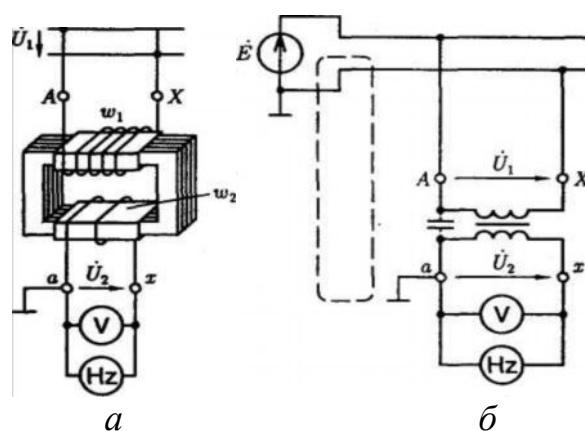


Рис. 4.39. Трансформатор напряжения:
а – принципиальная схема; б – условное обозначение

Сопротивление вольтметра и цепей напряжения измерительных приборов относительно велико (порядка тысяч Ом), т. е. ТН работает в условиях, близких к режиму холостого хода силового трансформатора. Поэтому падение напряжения на первичной и вторичной обмотке ТН весьма мало, что позволяет считать $U_1 = E_1$ и $U_2 = E_2$, т. е. вторичное напряжение связано с первичным постоянным соотношением.

При выбранных положительных направлениях напряжений (рис. 4.39), одинаковых относительно одноименных выводов трансформатора, фазы вторичного и первичного напряжений должны совпадать. Следовательно, соединение обмоток ТН выполняется согласно группе 0, выводы обмоток имеют разметку А-Х, а-х. Равенство фаз напряжений ТН и цепей измерительных приборов достигается соответствующим соединением выводов вторичной обмотки и выводов приборов. Правильная передача фазы важна, конечно, не для вольтметра, а для ваттметра и счетчика. Вторичное номинальное напряжение большинства ТН имеет одно и то же стандартное значение – 100 В.

Для напряжений до 6 кВ ТН изготавливаются сухими с естественным воздушным охлаждением, для напряжений от 6 кВ и выше применяются масляные ТН. Трансформаторы напряжения часто изготавливаются двух типов – однофазные и трехфазные.

Вопросы для самопроверки

1. Устройство, назначение и принцип действия измерительных трансформаторов.
2. По каким признакам классифицируются трансформаторы?
3. Что представляет собой группа соединения обмоток трансформатора?
4. Как поведет трансформатор, если количество витков первичной обмотки будет меньше расчетного?
5. Группа соединения обмоток Y/Y – 6. Как соединены выводы первичных и вторичных обмоток трансформатора?
6. С соблюдением каких условий можно включать трансформаторы на параллельную работу?
7. Устройство и назначение измерительных трансформаторов.
8. Что означают цифры на измерительном трансформаторе тока 300/5?
9. Для чего заземляется вторичная обмотка трансформатора тока?
10. Основные параметры трансформатора напряжения.

5. УСТРОЙСТВА КОММУТАЦИИ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

5.1. Низковольтное оборудование

5.1.1. Рубильники и переключатели

Рубильники и переключатели относятся к самым простым коммутационным аппаратам и применяются в цепях постоянного и переменного тока силой от 25 до 10 000 А при напряжении до 660 В. Рубильники и переключатели делятся на группы по конструктивным особенностям, способу присоединения и способам управления ими. Конструкции бывают одно – двух– и трехполюсные. Устанавливаются рубильники, как с передней, так и с задней стороны панели или каркаса щита. Управление рубильником производится центральной рукояткой, расположенной сбоку, или рычажным приводом (рис. 5.1).

Рубильники с центральной рукояткой могут отключать номинальный ток нагрузки, на который они рассчитаны, если напряжение в сети не превышает 220 В. При более высоких напряжениях эти рубильники используются, как разъединители для размыкания уже обесточенных цепей.

Рубильники, отключающие ток нагрузки, особенно в цепях постоянного тока, могут иметь в дополнение к основным подвижным ножам еще и разрывающие. Эти дополнительные ножи в нижней части крепятся шарнирно к основным и еще соединяются с ними стальной упругой пружиной, благодаря чему сокращается время отключения, а следовательно, быстрее разрывается электрическая дуга. При изнашивании рубильников заменяется не весь основной нож, а только его дополнительная разрывающая часть. Рубильники с центральной рукояткой обычно устанавливаются на лицевой стороне панелей щитов (см. рис. 5.1, б) или собираются отдельно на диэлектрическом основании (рис. 5.1, в).

Рубильники с боковой рукояткой (рис. 5.1, г) обычно устанавливаются в защитном кожухе или распределительных ящиках.

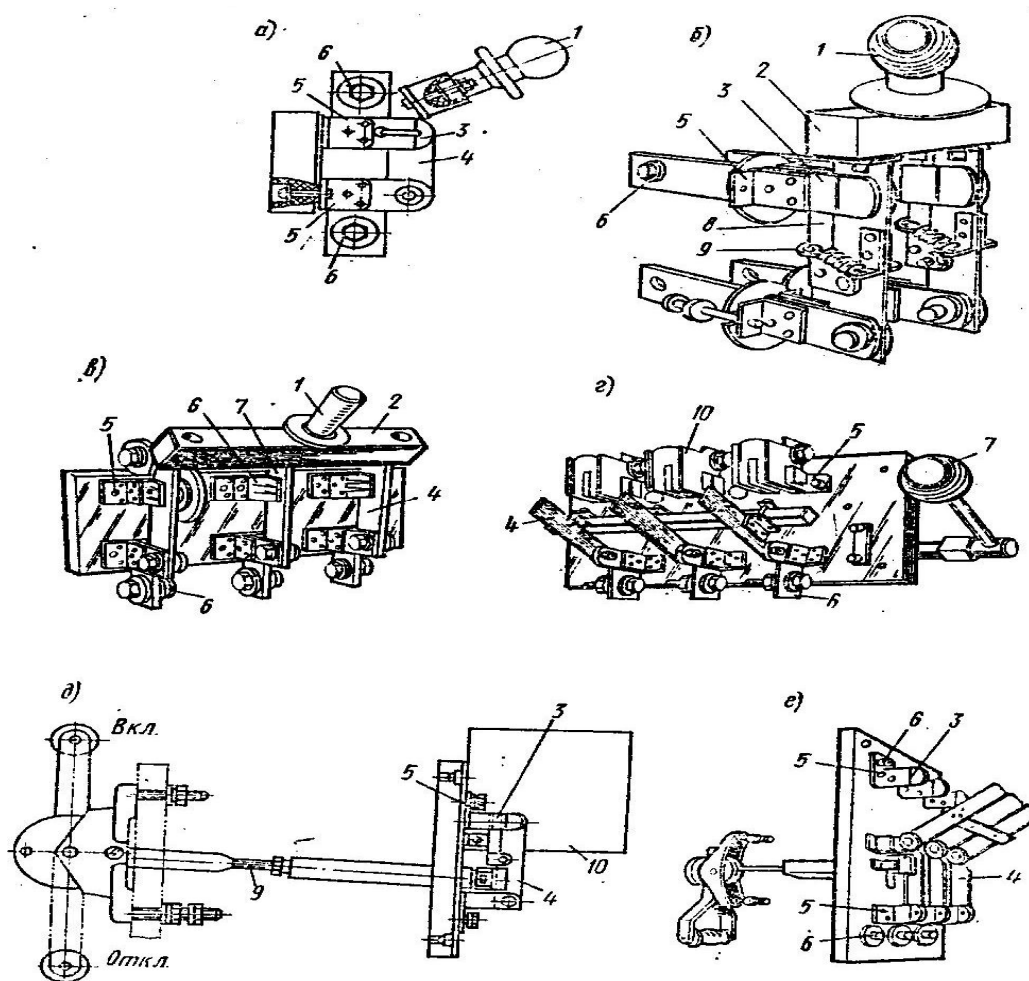


Рис. 5.1. Рубильники:

а – рубильник однополюсный с центральной рукояткой; б – рубильник двухполюсный с центральной рукояткой и дополнительными размыкающими ножами; в – рубильник трехполюсный с центральной рукояткой; г – рубильник трехполюсный с боковой рукояткой; д – рубильник с рычажным приводом; е – переключатель с рычажным приводом; 1 – центральная рукоятка; 2 – траверса; 3 – неподвижные контактные губки; 4 – контактные ножи; 5 – контактные стойки; 6 – контактные болты; 7 – боковая рукоятка; 8 – разрывающие ножи; 9 – упругая пружина; 10 – дугогасительная камера

5.1.2. Плавкие предохранители

Сила тока различных потребителей определяется их сопротивлением и подведенным напряжением. При заданном напряжении она тем меньше, чем больше сопротивление потребителей. Так, сопротивление широко распространенных потребителей – лампочек накаливания составляет сотни Ом, и поэтому сила тока в них составляет несколько миллиампер.

Если замкнуть провода до лампочки, то величина сопротивления цепи будет определяться только сопротивлением проводов, которое имеют очень малую величину. Такой случай называется коротким замыканием. Коротким замыканием называется вообще всякое замыкание источника на очень малое сопротивление. Большие токи, возникающие при коротких замыканиях, могут привести к перегреву проводов и повреждению источника питания.

Для защиты проводов и источников питания применяются плавкие предохранители и автоматические выключатели.

Существует множество разновидностей плавких предохранителей. Простейшими из них являются тонкие медные проволочки или проволочки из легкоплавкого металла. Предохранители включаются последовательно в цепь тока. Рассчитываются предохранители таким образом, чтобы они плавились при силе тока, превышающей то его значение, на которое данная цепь рассчитана.

Наибольшее распространение в сетях напряжением до 1000 В получили предохранители типа ПР и НПР, НПН. Разновидности предохранителей показаны на рис. 5.2. и 5.3. Предохранитель (рис. 5.2, а) является разборным, что позволяет быстро менять сгоревшую плавкую вставку или заменить ее другой. Плавкие вставки имеют плоскую форму с одним или несколькими сужениями, в одном из которых вставка и перегорает при перегрузке или во всех сразу при коротких замыканиях. Плавкие вставки выпускаются на следующие значения номинальных токов: 15, 60, 100, 200, 350, 600 и 1000 А.

Другим распространенным предохранителем является НПР, он в отличие ПР имеет нефибровую трубку, а фарфоровый корпус, заполненный кварцевым песком, что способствует быстрому гашению электрической дуги, возникающей при сгорании плавкой вставки.

Разновидностью предохранителя НПР является предохранитель НПН, который в отличие от первого неразборный. Применяется он для тока до 40 А при напряжении до 500 В.

В силовых цепях полупроводниковой техники для защиты от токов короткого замыкания все больше применяются быстродействующие предохранители. Это, прежде всего, неразборный предохранитель с указателем срабатывания типа: ПП-41 на номинальное напряжение 660 В и токи 100...630 А; ПП-51 на номинальное напряжение 380 В и токи 160...400 А; ПП-61 на номинальное напряжение 380 В и токи 63 и 160 А.

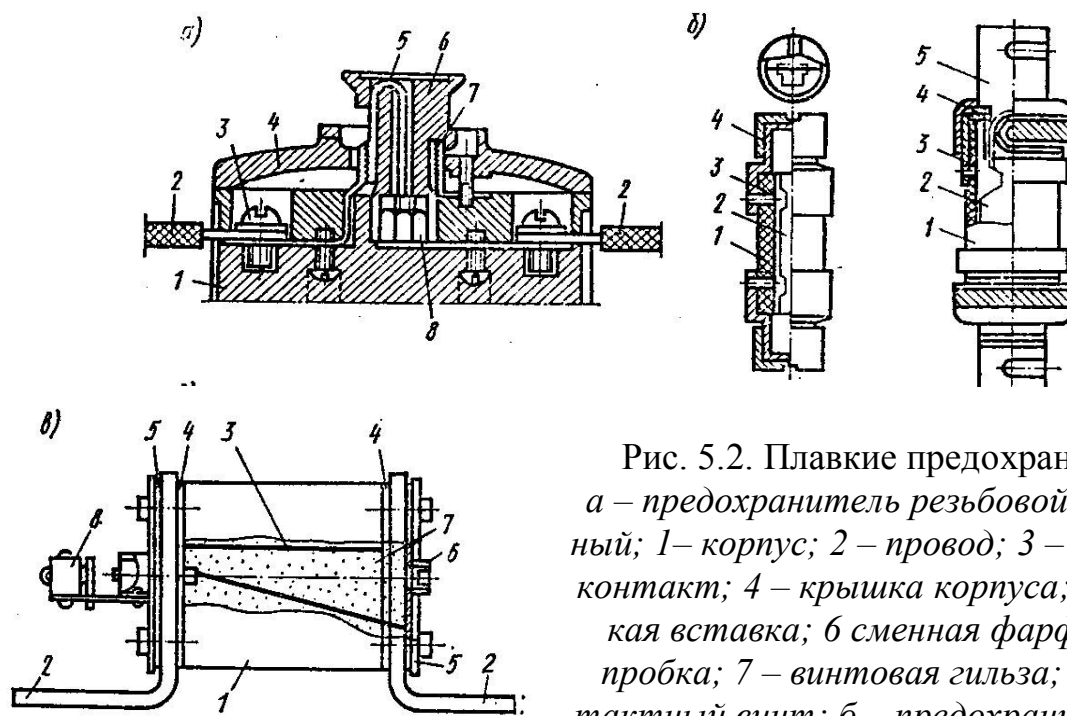


Рис. 5.2. Плавкие предохранители:
а – предохранитель резьбовой, пробочный; 1 – корпус; 2 – провод; 3 – винтовой контакт; 4 – крышка корпуса; 5 – плавкая вставка; 6 сменная фарфоровая пробка; 7 – винтовая гильза; 8 – контактный винт; б – предохранитель типа ПР; трубчатый фибровый патрон; 2 – плавкая вставка; 3 – латунные кольца с резьбой; 4 – колпачки; 5 – контактные ножи; в – быстродействующий предохранитель; 1 – ультра фарфоровый корпус № 2 – медные выводы; 3 – плавкий элемент; 4, 5 – изоляционные прокладки; 6 – отверстие с заглушкой для заполнения предохранителя; 7 – наполнитель; 8 – контакт для связи с системой сигнализации и управления

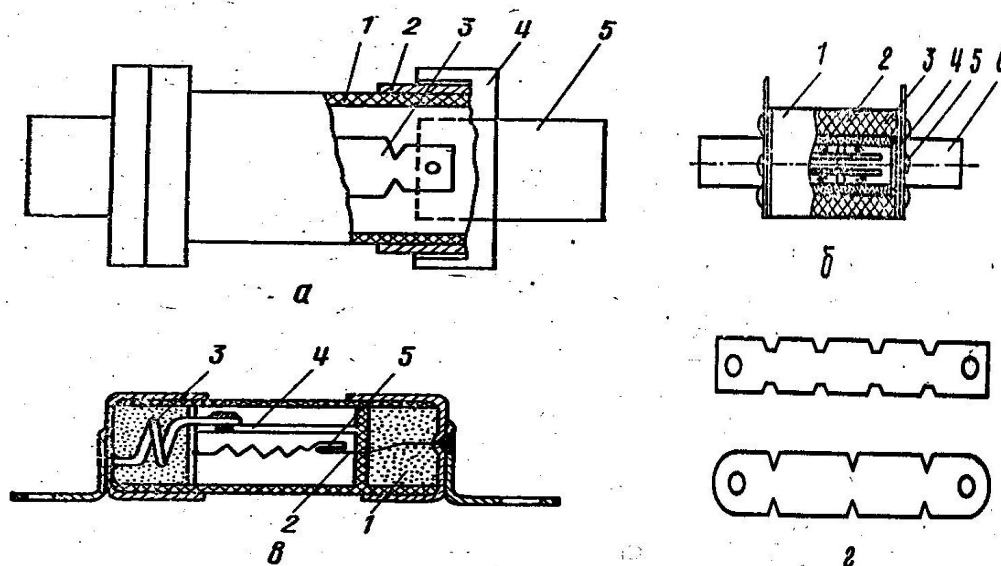


Рис. 5.3 Плавкие предохранители типов ПР – 2 (а) и ПН– 2 (б), инерционный предохранитель (в), форма плавкой пластины (г)

5.1.3. Контактторы

Контактторы представляют собой группу электрических аппаратов, предназначенных для дистанционного управления электрооборудованием с токами от 10 до 480 А. Промышленность выпускает контакторы разного типа: переменного тока типа КНТ с катушкой на напряжение 127, 220 и 380 В и токи 10, 25, 60, 100 и 200 А; постоянного тока типа М1 с катушкой напряжением 24...220 В и токи 40, 63, 100 и 160 А. Для работы в цепях управления с токами до 16 А выпускаются контакторы КТ6000/00 и КТ6000/20, которые снабжены защелкивающим механизмом для улучшения электрического контакта. Выпускается также контактор К1000 для коммутации устройств индукционного нагрева большой мощности. Он применяется в цепях с частотой 500...2500 Гц и напряжением до 1600 В, а также в цепях с частотой 8000 Гц и напряжением до 800 В на токи 1600—4800 А. Кроме того, контакторы серии КТ6000, КТП600 и КТ7000 разработаны и выпускаются гибридные аппараты переменного тока КТ60 и КТП60 с без дуговой коммутацией, в которых находят применение полупроводниковые элементы.

Устройство контактора переменного тока показано на рис. 5.4, а. Он состоит из электромагнитной, контактной и дугогасительной систем. Магнитная система образуется катушкой 1, ярмом с неподвижным сердечником 11 и подвижной частью (якорем) 3 с короткозамкнутым медным противовибрационным витком 2 и деталями крепления к диэлектрическому основанию. Подвижная и неподвижная часть сердечника представляют собой пакеты листов электротехнической стали Ш - образной формы. Толщина пакетов 0,35...0,5 мм, кроме крайних. Крайние пакеты для придания им большей жесткости, делают толщиной 0,8...1 мм. В контактную систему входят главные подвижные контакты 4, установленные на держателе 12, неподвижные 10 и вспомогательные блок-контактные цепи управления: нормально открытые 7 и нормально закрытые 6. Для соединения подвижных контактов с болтами подсоединения внешних цепей используются гибкие проводники 5, представляющие собой пакеты полос из медной фольги. Постоянство давления подвижного контакта на неподвижный контакт обеспечивает контактная пружина 12. Схема управления работой контактора отличается простотой и показана на рис. 5.4, б. на примере управления работой асинхронного электродвигателя.

Защита силовой цепи и электродвигателя от коротких замыканий и больших значений тока осуществляется автоматом QF, установленным перед контактором. Дистанционное управление электродвигателя осуществляется с помощью кнопки SB2 («пуск»).

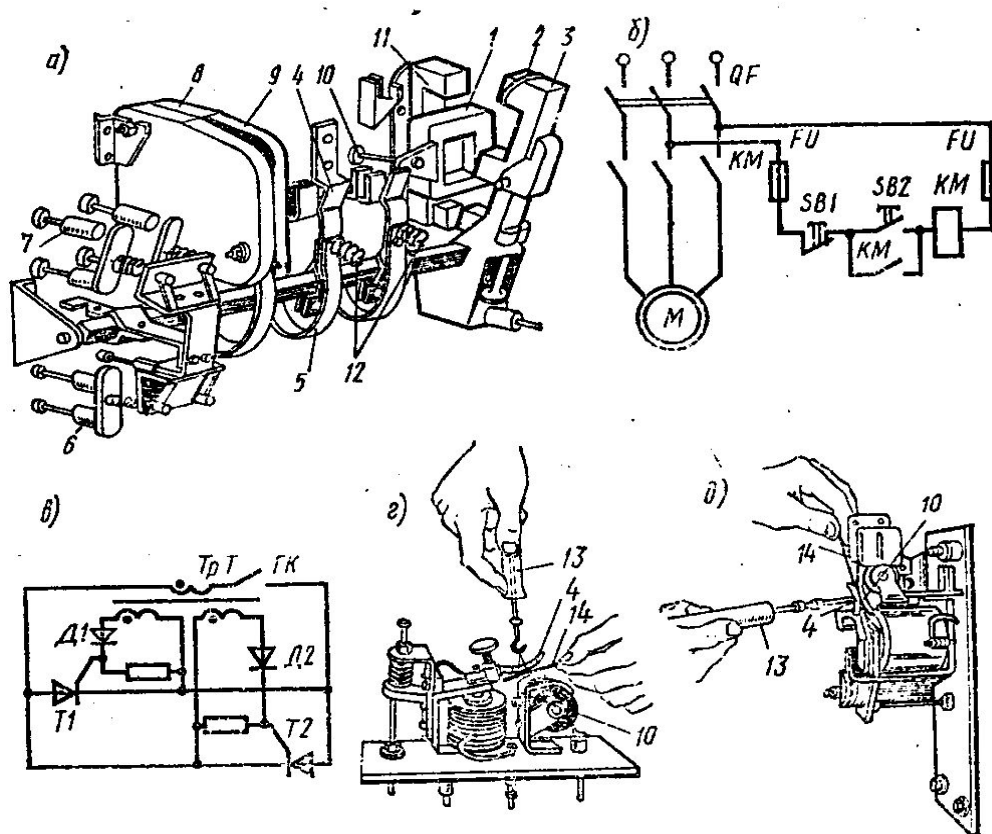


Рис. 5.4. Контакторы:

а – устройство контактного контактора; б – схема управления асинхронным двигателем; в – упрощенная принципиальная схема гибридного (тиристорного) контактора переменного тока; г, д – проверка начального натяжения контактов

Перед монтажом контакторов по паспортной табличке и внешнему виду проверяется его комплектность и соответствие проекту. Снимаются и осматриваются дугогасительные камеры, на которых не должно быть трещин, сколов и следов трения или касания подвижных контактов об их внутреннюю поверхность, а на металлических деталях не должно быть коррозии и нарушений гальванического или другого покрытия. На резьбовых соединениях проверяется исправность средств, препятствующих самоотворачиванию и надежность затяжки.

Проверяется легкость хода подвижной системы и одновременность касания подвижных и неподвижных контактов, которая не должна превышать 0,5 мм. Смещение кромок полюсов сердечника и якоря относительно друг друга не должно быть более 2 мм, а смещение осей контактов 1 мм. После удаления консервирующей смазки и деталей крепления на время транспортировки осматриваются поверхности соприкосновения сердечника и якоря. При этом особое внимание обращается на их состояние и степень пригонки. Гибкие соединения не должны иметь повреждений и занимать положение, исключающее их повреждение при работе контактора. Пружины возврата подвижной системы должны быть без трещин, иметь равномерное расположение витков и свободный возврат в исходное положение. При необходимости, вызванной неудовлетворительными условиями хранения, проверяется соответствие нормам и величины «растворов» и «провалов» контактов, их начальных и конечных нажатий (рис. 5.4, з, д), где показаны способы проверки начального нажатия подвижного контакта 4 и неподвижного контактора постоянного тока 10 с помощью динамометра 13 и полоски бумаги 14. Втягивающая катушка не должна иметь повреждений изоляции и следов касаний подвижной части контактора о ее поверхность. В подшипниках вала должна быть смазка.

На рис. 5.4, в показана упрощенная принципиальная схема гибридного контактора переменного тока с бес дуговой коммутацией. Гибридные контакторы (КТ – с катушкой электромагнита переменного тока и КТП – с катушкой постоянного тока) позволяют успешно сочетать малые габариты, небольшую потребляемую мощность и повышенную способность к нагрузкам контактных аппаратов с высокой износостойкостью, надежностью и простотой обслуживания бесконтактных элементов. В таких контакторах параллельно главным контактам ГК встречно-параллельно включены тиристоры Т1 и Т2, управление работой которых осуществляется от трансформатора тока ТрТ, где первичной обмоткой служит шина контактора. Вторичные же обмотки трансформатора подключены к управляющим цепям через диоды Д1 и Д2. При включенном контакторе ток проходит только по контактам ГК, так как падение напряжения на них очень мало и значительно ниже порогового напряжения вольтамперной характеристики тиристоров. При отключении контактов ГК ток проходит в цепь тиристоров, находящихся во включенном состоянии, под действием сигналов управления, поступающих от трансформатора

тока TpT . При этом дуга на контактах ГК не образуется, так как падение напряжения на тиристорах не превышает 4...5 В, что ниже напряжения, необходимого для зажигания электрической дуги. При изменении направления тока сигналы управления снимаются, и ток в цепи тириستоров прекращается при первом переходе его через нулевое значение (в течение не более полупериода).

5.1.4. Магнитные пускатели

Магнитные пускатели предназначены для дистанционного управления электродвигателями мощностью до 75 кВт. В большинстве случаев они имеют максимальную защиту от перегрузок недопустимой продолжительности и от токов повышенной величины при обрыве одной из фаз. Кроме этого они имеют минимальную защиту при падении напряжения в питающей сети на 35–40 % номинального значения. При этом магнитный поток катушки не в состоянии удерживать подвижную часть сердечника, и магнитный пускатель отключает электродвигатель. Защиты от тока короткого замыкания не предусматривается. Для этого в силовую цепь перед магнитным пускателем устанавливаются быстродействующие предохранители.

Основой конструкции теплового реле является биметаллическая пластина, которая при нагревании выгибается в сторону слоя с меньшим коэффициентом линейного расширения (вверх) и освобождает защелку, которая под действием пружины поворачивается влево и размыкает контакты цепи управления. Нагревается биметаллическая пластина от нагревательного элемента, который включается последовательно в силовую цепь. После устранения причины срабатывания реле и остывания биметаллической пластины в исходное рабочее положение его возвращают вручную – нажатием на кнопку возврата, которая затем под действием пружины занимает исходное положение. В качестве силового элемента магнитного пускателя используется прямо ходовая или поворотная магнитная система. Прямо ходовая магнитная система показана на рис. 5.5, а. Здесь неподвижная часть магнитопровода 1 с катушкой 2 закрепляется неподвижно в корпусе пускателя, а подвижная часть (якорь) 4 связана с подвижными контактами 6. При прохождении через катушку тока создается магнитное поле Φ , под действием которого якорь, сжимая пружину 3, притягивается к неподвижной части магнитопровода и подвижные контакты соединяются с неподвижными 5, что обеспечивает прохож-

дение по силовой цепи электрического тока. Постоянство нажатие контактов обеспечивается давлением пружинящей пластины или пружины 7. Магнитная прямо ходовая система может иметь не только Ш-образную но и П-образную форму. Применяется прямо ходовая система в магнитных пускателях серии ПМЕ и ПМЛ.

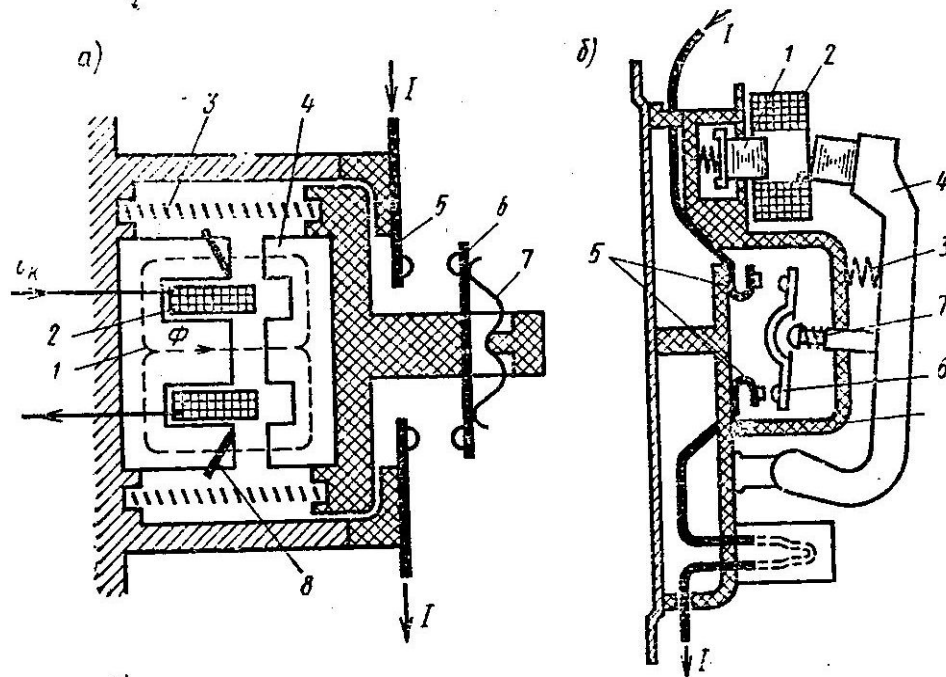


Рис. 5.5. Магнитные пускатели:
а – схема с прямо ходовой магнитной системой;
б – то же с поворотным якорем

Принципиальная схема управления асинхронным двигателем с элементами защиты приведена на рис. 5.6. Схема не реверсивная.

Для защиты от коротких замыканий обмотка статора подключается к сети через плавкие предохранители. Для защиты от перегрузок использованы тепловые реле РТ.

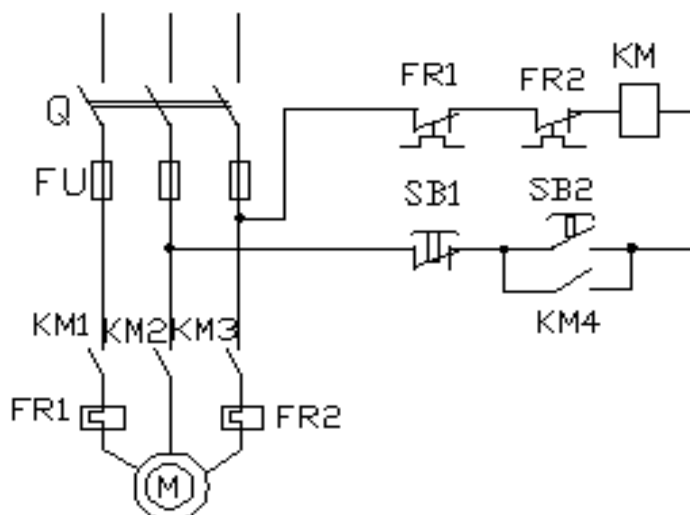


Рис. 5.6. Схема управления асинхронным двигателем

5.1.5. Автоматические выключатели

Автоматические выключатели (автоматы) предназначены для относительно нечастых включений и отключений электрических цепей (при нормальных условиях работы, электрооборудования), а также для автоматического размыкания цепей при токах короткого замыкания и перегрузке.

Устройство, предназначенное для контроля за соответствующим параметром защищаемой цепи и выдачи сигнала на отключение автомата, называется *расцепителем*.

Пороговое значение контролируемого параметра, при котором срабатывает расцепитель, называется *уставкой*.

Автоматы могут иметь следующие расцепители:

- электромагнитный, срабатывающий мгновенно при токах, превышающих номинальный ток уставки в 2–20 раз, что соответствует защите от токов короткого замыкания;
- тепловой, срабатывающий при токах, превышающих номинальный ток расцепителя в 1,25–1,8 раза, что соответствует защите от перегрузок;

Кинематическая схема электромагнитного расцепителя приведена на рис. 5.7.

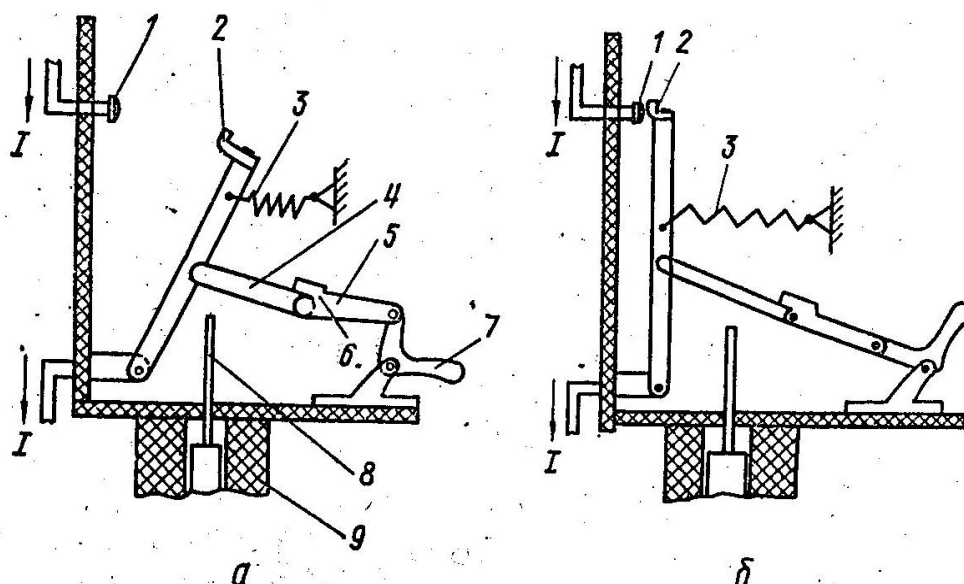


Рис. 5.7. Механизм свободного расцепителя

Схемы содержат неподвижный контакт 1, подвижный контакт 2, удерживаемый усилием пружины 3, систему рычагов 4 и 5 с упором

6, ограничивающим перемещение рычагов, и привод 7. Электромагнитный расцепитель состоит из обмотки 9, включенной в силовую цепь при защите от коротких замыканий и перегрузок, или к источнику питания через управляющий элемент (при дистанционном включении защиты) и толкатель 8. При включении автомата приводом 7 рычаги устанавливаются в одну линию (рис. 5.7, б). Рычаг с подвижным контактом поворачивается до соединения с неподвижным контактом. Пружина 3 переходит в натянутое состояние. В таком состоянии автомат считается включенным.

При касании подвижного контакта 2 с неподвижным контактом 1, который удерживается усилием пружины 3, замыкается силовая цепь. Через систему рычагов 4 и 5 контакты связаны с приводом 7. Рычаг 5 имеет упор 6, ограничивающий перемещение рычагов который ограничивает перемещение (ломание) рычагов 4, 5 вниз; подвижный контакт связан с отключающей пружиной 3. На рис. 5.7, а механизм показан в подготовленном для включения состоянии. При включении (рис. 5.7, б) подвижные контакты 2 прижимаются к неподвижным контактам 1, обеспечивая надежное их соединение. Отключающая пружина находится в натянутом состоянии, система рычагов занимает жесткое положение.

При коротких замыканиях или перегрузках по току большая электромагнитная сила, действующая на сердечник, преодолевает действие пружины (на схеме не показана), выталкивает из катушки толкатель. После касания толкателя 4, происходит излом рычагов 4 и 5 и под воздействием пружины 3 подвижной контакт 2 смещается, размыкая тем самым перегруженную силовую цепь.

Такие автоматы называются автоматами максимального тока. Имеются автоматы, которые срабатывают под действием тепловой защиты минимального тока, обратного тока или обратной мощности и минимального напряжения. Они отличаются друг от друга условиями срабатывания механизма (движение толкателя 8 обеспечивается при разных условиях).

Автоматические воздушные выключатели типа АВ имеют ручной (рукоятка, рычаг) и электромагнитный приводы. Они выпускаются на номинальные токи от 400 до 2000 А. Для работы в сетях постоянного тока воздушные выключатели изготавливают в двухполюсном исполнении, а для сетей переменного тока – в трех полюсном. Буквы и цифры обозначают тип автомата.

Особенную группу автоматов представляют собой быстродействующие аппараты защиты [13]. На рис. 5.8 показан общий вид и схема устройства быстродействующего автоматического выключателя серии АЗ700, который предназначен для максимальной токовой защиты цепей с номинальным напряжением до 440 В постоянного и 660 В переменного тока. Основными его элементами являются главные 3 и дугогасительные 1 контакты, дугогасительная камера 2, электромагнит 4, звенья 6, 7 и упор 13 механизма свободного расцепления, расцепители 5, 8, 10, 11, возвратная пружина 9 и рукоятка 12. Включение автоматического выключателя осуществляется вручную рукояткой 12, или дистанционно с помощью электромагнита 4. Отключение контактов может осуществляться с помощью рукоятки или одного из расцепителей. Основой теплового расцепителя 5 является биметаллический элемент из двух пластин с различными температурными коэффициентами линейного расширения. Пластины жестко соединены между собой горячей прокаткой или сваркой. При токовых перегрузках нагрев биметаллического элемента приводит к его изгибу в сторону пластины с меньшим температурным коэффициентом расширения, которая воздействует на звенья 6, 7 механизма свободного расцепления. При этом контакты выключателя размыкаются. Электромагнитный расцепитель, срабатывающий при токах короткого замыкания, представляет собой длинноходовой электромагнит 8, якорь которого имеет свободный ход 5–10 мм, а по катушке протекает ток нагрузки. Якорь воздействует на расцепитель и отключает цепь нагрузки. Ток срабатывания электромагнита регулируется изменением натяжения пружины 9 или числа витков катушки. На электромагнитном принципе работает и минимальный расцепитель. При минимальном значении напряжения сети якорь электромагнита находится в притянутом состоянии. Когда напряжение снижается ниже значения уставки (30–70 % номинального значения), якорь отбрасывается пружиной 9 от магнитной цепи. Эта пружина воздействует на механизм свободного расцепления. Для дистанционного отключения автоматического выключателя установлен электромагнитный расцепитель, обмотка которого рассчитана на кратковременный режим работы от напряжения сети. Конструктивно выключатель АЗ700 (рис. 2.8, б) состоит из пластмассового основания 1, на котором смонтированы детали и узлы выключателя и крышка 2. Контактная система представляет собой главные подвижные контакты 3, укрепленные на

рычаге, связанном с механизмом управления аппарата, и главного неподвижного контакта 4.

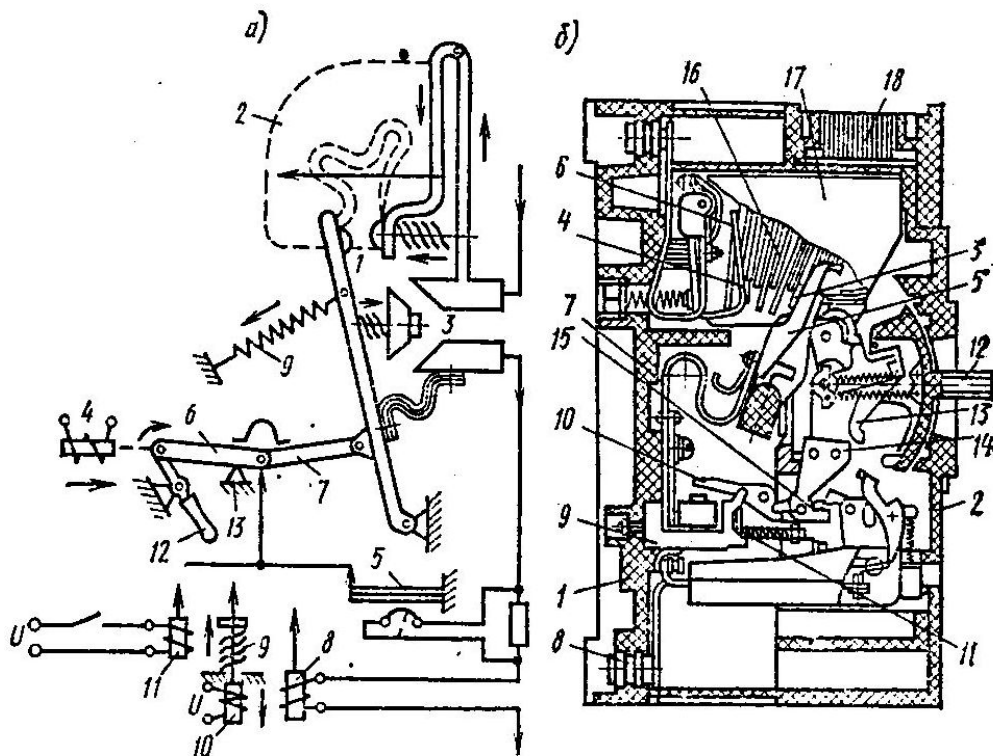


Рис. 5.8. Быстродействующий автоматический выключатель АЗ700:
а – принципиальная схема; б – конструкция

Контакты изготовлены из металлокерамической композиции на основе серебра. Контакты 3 и 4 припаяны к контактодержателям 5 и 6. Контактodержатель 5 по движению контакта 3 электрически соединен гибким соединением 7 с максимальным электромагнитным разделителем и выводом 8 для внешнего подсоединения. Контактodержатель 6 неподвижного контакта 4 имеет возможность небольшого перемещения в зависимости от соотношения усилий возвратной пружины и сил электродинамического воздействия контактов. Максимальный электромагнитный расцепитель устанавливается в каждом полюсе выключателя и представляет собой электромагнит, состоящий из сердечника 9, якоря 10 и удерживающей пружины 11. Механизм управления включает в себя рукоятку управления 12, рычаг 13, защелку 14 и отключающую рейку 15. Дугогасительные камеры расположены под контактами каждого полюса выключателя и представляют собой набор стальных пластин 16 в изоляционной оправе 17. Посредством этих пластин происходит дробление и деионизация

зация электрической дуги. Дугогасительные камеры устанавливаются в корпусе 1 и удерживаются крышкой 2. Искрогаситель 18 выполнен в отдельном пластмассовом корпусе и является съемным блоком, который крепится к крышке 2. Он предназначен для охлаждения и деионизации газов, выходящих из выключателя при отключении токов короткого замыкания. Для включения рукоятку управления 12 перемещают сначала вниз для того, чтобы рычаг 13 сцепился с защелкой 14, фиксированной полуосью отключающей рейки 15.

Затем рукоятка перемещается вверх, благодаря чему замыкаются главные контакты 3 и 4. При возникновении тока короткого замыкания якорь 10 электромагнитного расцепителя максимального тока притягивается к сердечнику 9 и воздействует на отключающую рейку 15, что приводит к отключению самого выключателя.

В серии автоматических выключателей АЗ700 применяются бесконтактные полупроводниковые разделители типа РП. При возникновении токовых перегрузок или короткого замыкания они вырабатывают по заданной программе сигнал на автоматическое отключение выключателя путем воздействия на его дистанционный расцепитель. На таком же принципе работают и быстродействующие автоматические электромагнитные выключатели серии «Электрон» с номинальным током до 5500 А.

Вопросы для самопроверки

1. При каких повреждениях в двигателе необходимо его отключение устройствами защиты?
2. Чем отличается электромагнитный дистанционный расцепитель от обычного?
3. Какие расцепители имеет автоматический выключатель АЗ700?
4. Для защиты асинхронного двигателя применены плавкие предохранители. Как скажется на работе двигателя перегорание одной из плавких вставок?
5. С помощью рис. 5,7 поясните работу механизма свободного расцепления.
6. Устройство и назначение плавких предохранителей.
7. Назначение и основные элементы контакторов.
8. Автоматические выключатели, устройство и назначение.
9. Устройство электромагнитных и тепловых расцепителей.
10. Что проверяется при обследовании контакторов и пускателей?

5.2. Высоковольтное оборудование

5.2.1. Высоковольтные выключатели [13]

Высоковольтные выключатели применяются для отключения электрооборудования при нормальных нагрузках и автоматического отключения в аварийных режимах (коротких замыканиях).

При отключении высоковольтного оборудования между расходящимися контактами сильно ионизируется воздух, который является проводящей средой. При прохождении тока через эту среду образуется горящая дуга, температура воздуха в которой достигает несколько тысяч градусов. Чем больше ток в цепи в момент размыкания, тем выше температура дуги. Следствием этого может быть расплавление контактов, повреждение аппаратов, находящихся на небольшом расстоянии, и опасность для обслуживающего персонала. Поэтому в установках высокого напряжения (более 1000 В) выключатели оснащаются специальными дугогасительными камерами. В зависимости от средств, используемых для гашения дуги, выключатели подразделяются на: 1) масляные; 2) со специальными жидкостями; 3) воздушные (пневматические); 4) электромагнитные (воздушные); 5) автогазовые (с газом, генерируемым твердым веществом под действием температуры дуги); 6) элегазовые; 7) вакуумные.

На рис. 5.9 приведена конструкция выключателя, в котором дуга гасится газом, генерируемым твердым веществом под действием температуры дуги.

Выключатель нагрузки типа ВНП-16 выпускается заводом в комплекте с предохранителями типа ПК (рис. 5.13). Напряжение к выключателю подводится через болтовые контакты. При включении вспомогательный нож 2 выключателя входит в дугогасительную камеру 3 с расположенными внутри нее контактными губками. При этом образуется предварительная цепь тока. Окончательно токовая цепь создается не дугогасительными контактами, а рабочими ножами 4 и неподвижными контактами 5.

При отключении цепи между контактными элементами (губками и ножом) возникает электрическая дуга. Под действием высокой температуры дуги органическое стекло вкладышей дугогасительной камеры выделяет большое количество газов. Газы под давлением устремляются из дугогасительной камеры и гасят дугу. Выключатель на-

грузки может быть скомплектован с одним, двумя или четырьмя предохранителями.

При ремонте выключателя проверяют состояние изоляторов, пластмассовых деталей дугогасительной камеры. Осматривают подвижные (дугогасительные) и неподвижные контакты на отсутствие механических повреждений. Разбирают дугогасительную камеру, очищают от копоти ветошью, смоченной в бензине. Трещины на поверхностях камеры недопустимы, в этом случае ее заменяют. Осматривают вкладыш из оргстекла. Если толщина стенок вкладыша меньше 1 мм, его заменяют.

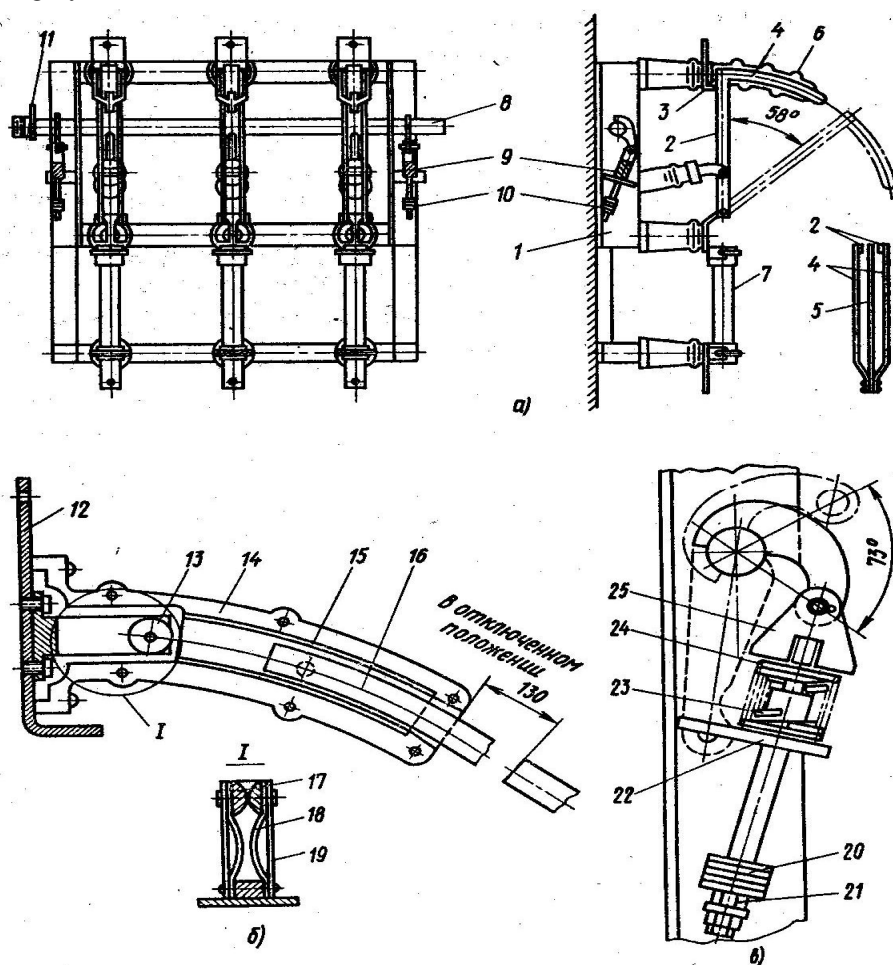


Рис. 5.9. Выключатель нагрузки ВНП – 16:

а – общий вид; б – дугогасительная камера; 1 – рама; 2, 3 рабочие контакты; 4 – стальные пластины; 5 – дугогасительный контакт; 6 – дугогасительная камера; 7 – предохранитель; 8 – вал; 9 – отключающая пружина; 10 – резиновый буфер; 11 – приводной рычаг; 12 – стойка неподвижного контакта; 13 – неподвижный контакт; 14 – щека; 15 – вкладыш; 16 – положение подвижного контакта в момент отключения выключателя; 17 – основной неподвижный контакт выключателя; 18 – гибкая связь; 19 – пружинящая пластина; 20 – резиновая шайба; 21 – стальная шайба; 22, 23 и 24 – пружины; 25 – вилка

Проверяют, свободно ли входит подвижный дугогасительный контакт (нож) в горловину дугогасительной камеры. При повороте вала на $70\text{--}75^\circ$ ножи должны перемещаться на 58° ; а дугогасительный подвижный контакт – входить в камеру на 160 мм. Если при включении выключателя ножи ударяются о неподвижный контакт, необходимо это устранить путем изменения длины тяги, соединяющей вал с приводом. Проверяют отключающие пружины, и если они ослабли или имеют дефект, их заменяют. Проверяют буферные шайбы; в случае необходимости их делают вновь из листовой резины толщиной 4–6 мм.

Поверхность соприкосновения контактов должна составлять не менее 75 % площади их рабочей поверхности. Во включенном положении подвижные и неподвижные контакты должны быть плотно прижаты друг к другу. Погнутость контактов должна быть устранена. Место присоединения заземляющего провода должно быть зачищено до металлического блеска и смазано тонким слоем технического вазелина.

Проверяют и добиваются безотказной работы привода, отсутствия в нем осевых люфтов, перекосов контактов при включении. Осматривают изоляторы; при небольших повреждениях поверхности глазури эти места покрывают влагостойким лаком (асфальтовым, глифталевым), который наносят в два слоя и сушат в течение 2–3 ч при температуре 110°C . Незначительные сколы поверхности (до 1 см) могут быть приклеены карбональным клеем при условии очистки склеиваемой поверхности бензином. Проверяют прочность колпачков и фланцев. Выкрошенную армировочную массу восстанавливают, предварительно очистив поверхность от грязи, пыли и масла следующей замазкой: 1 ч (по массе) портландцемента, 1,5 ч песка, 100 ч. смеси, размешанные в 40 ч. воды.

После выполнения ремонта параметры масляного выключателя с приводом должны быть доведены до значений, предусмотренных заводом-изготовителем.

Проводят следующие испытания:

- измерение сопротивления изоляции подвижных и направляющих частей выключателя мегаомметром 2500 В. Сопротивление изоляции для выключателей на номинальное напряжение 6–10 кВ должно быть не ниже 1000 МОм;

- испытание изоляции выключателя повышенным напряжением промышленной частоты 50 Гц, приложенным в течение 1 мин. Испы-

тательное напряжение для выключателей на номинальное напряжение 10 кВ выбирается в зависимости от типа изоляции (керамическая, из органических материалов и др.) в пределах 32–42 кВ. При испытании не должно быть пробоя изоляции, скользящего разряда или поверхностного перекрытия;

- измерения сопротивления постоянному току (микроомметром М-246 или двойным мостом, или методом вольтметр – амперметр) контактов выключателя для главной цепи полюсов. Сопротивление должно соответствовать заводским данным, в частности для выключателя ВМГ-10 630 А–75 мкОм, ВМПП-10–55 мкОм, ВМПЭ-10–50 мкОм;

Выключатели ВМП-10. Малообъемные масляные выключатели ВМП относятся к типу горшковых, в которых трансформаторное масло применяется в основном для гашения дуги и лишь частично для изоляции между токоведущими деталями и корпусом, а также между разомкнутыми контактами.

Выключатели ВМП в однополюсном исполнении предназначены для работы в закрытых установках переменного тока напряжением до 10 кВ частотой 50 Гц.

Выключатели изготавливаются трех разновидностей:

1. Обычные – для работы в нормальных климатических условиях.
2. Тропические – для работы в районах с тропическим климатом (к обозначению выключателей этих разновидностей добавляется буква Т).
3. Усиленные – в общем, и тропическом исполнении (к значению добавляется буква У).

Выключатели делятся на две группы: ВМП-10, ВМП-10У и ВМП-10Т – для стационарных распределительных устройств типа КСО;

ВМП-10К, ВМП-10КУ, ВМП-ЮКТ, ВМП-10КТУ – для комплектных распределительных устройств (КРУ) с ячейками выкатного типа (к обозначению выключателей второй группы добавляется буква К).

Каждый из выключателей типа ВМП имеет варианты исполнения по номинальному току, отличающиеся между собой сечением токопровода и размерами выводов.

Управление выключателями осуществляется электромагнитными и пружинно-грузовыми приводами. Выключатель в собранном виде в трехфазном исполнении с электромагнитным приводом ПЭ-11 показан на рис. 5.10.

Каждая фаза имеет отдельный выключатель (полюс), который смонтирован на двух опорных изоляторах 2 с внутренним механиче-

ским креплением арматуры, установленных на общей стальной раме 1. Рама является основанием выключателя.

Выключатель управляется приводом 8, связанным тягами 7 и 6 с главным валом 4 выключателя. На валу 4 против каждого полюса установлен двухплечий рычаг, который одним концом соединен с изоляционной тягой 3 полюса, а другим – с отключающей пружиной.

Для амортизации при включении и отключении выключатель 1 снабжен масляным и пружинным демпферами 9. Масляный демпфер смягчает удары при отключении, а пружинный – при включении.

Если расстояние между центрами полюсов менее 250 мм (в шкафах КРУ), то между полюсами выключателя устанавливаются изоляционные перегородки.

Токопроводы 10 и 11 подсоединяются к верхнему и нижнему фланцам выключателя. Следовательно, выключатель ВМП в эксплуатации находится под напряжением.

Каждый полюс выключателя состоит из прочного влагостойкого изоляционного цилиндра 1, на концах которого заармированы металлические фланцы 2 и 9. Внутри корпуса 4 из алюминиевого сплава, укрепленного на верхнем фланце, размещен выпрямляющий механизм 6, подвижный контактный стержень 16, роликовое токосъемное устройство 3 и маслоотделитель 17.

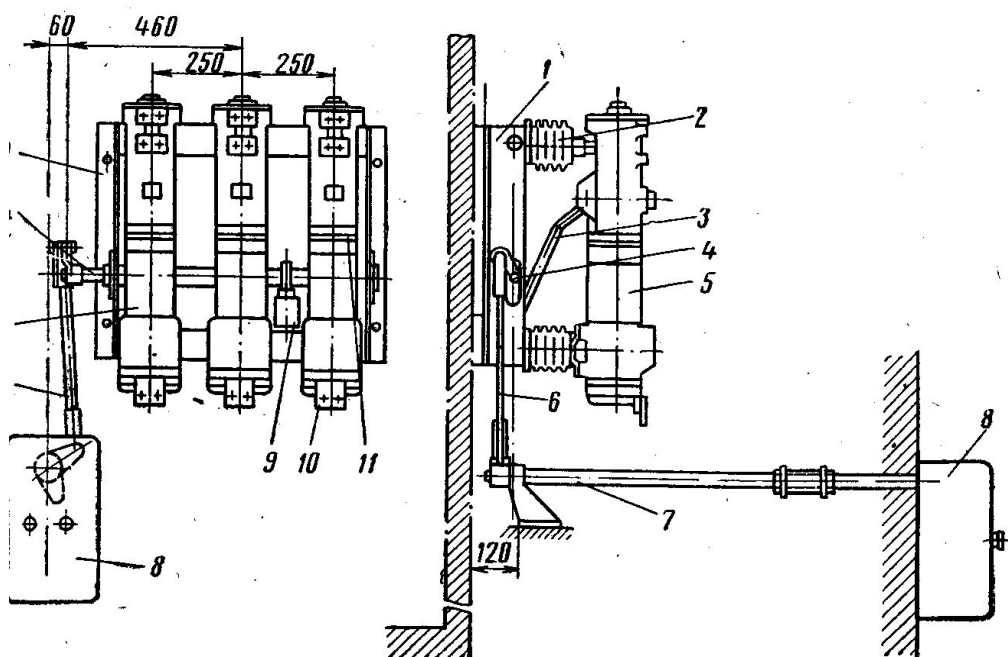


Рис. 5.10. Установка выключателя ВМП-10 с приводом ПЭ-11

Корпус механизма сверху закрыт крышкой 5 из изоляционного материала, имеющей канал 19 для соединения внутренней полости цилиндра с атмосферой и маслосливное отверстие, закрытое пробкой 18.

Конструктивное устройство одного полюса выключателя ВМП-10 показано на рис. 5.11.

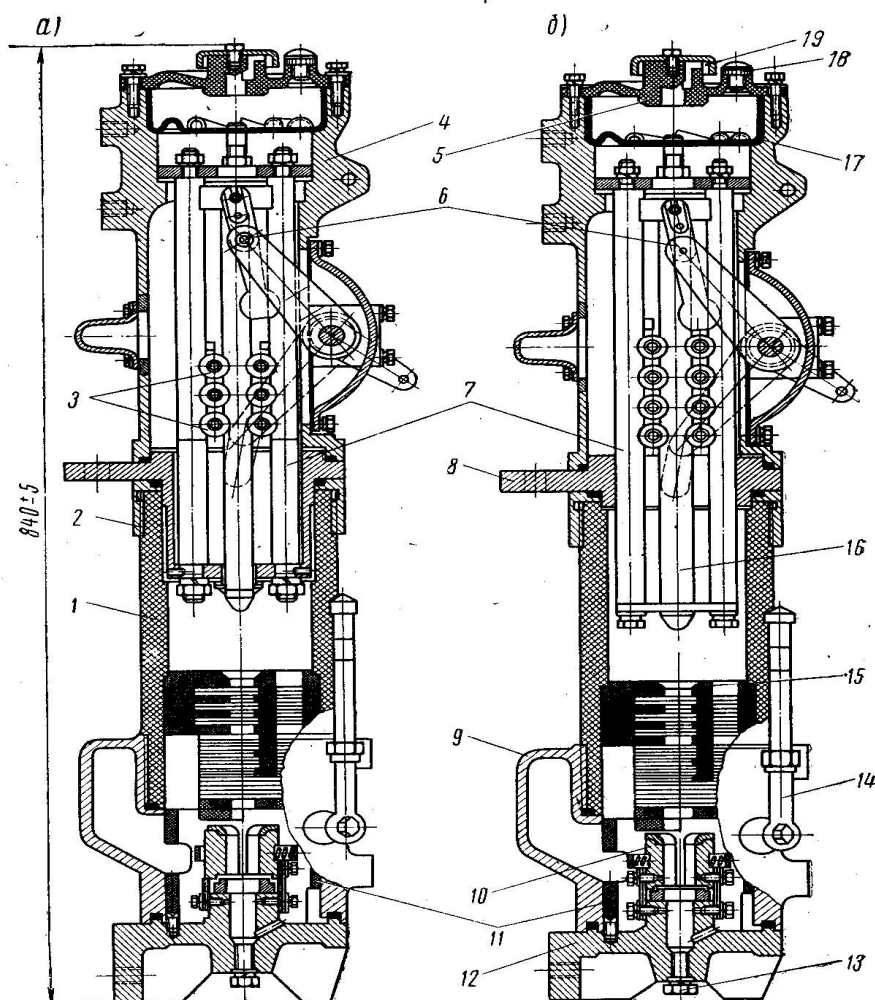


Рис. 5.11. Разрез полюса выключателя ВМП - 10

Нижний фланец 9 снизу закрыт крышкой 12 из «меди, внутри которой расположен неподвижный розеточный контакт 10, а снаружи – маслоспускная пробка 13. К крышке 12 с помощью болтов крепится токоведущая шина.

Конструкция нижнего фланца 9 позволяет создать воздушную подушку при залитом трансформаторным маслом цилиндре выключателя. Подушка выполняет роль амортизатора при повышении давления в нижней части цилиндра в момент горения электрической дуги.

Неподвижный розеточный контакт состоит из медных сегментов в количестве 5 шт. (в выключателях на 630–1000 А) и 6 шт. – на 1500 А, пружин 2, создающих нажатие в контакте, упорного кольца 3, неподвижного контактодержателя, роль которого выполняет нижний фланец, и гибких связей из тонких медных полосок, которые соединяют контактодержатель с сегментами. С целью уменьшения износа от воздействия электрической дуги верхний конец сегментов армирован металлокерамикой 6.

При входе контактного стержня 16 в розетку сегменты расходятся, сжимая при этом контактные пружины 2.

5.2.2. Разрядники

Устройство разрядника показано на рис. 5.12. Он состоит из многократных искровых промежутков и последовательных нелинейных резисторов (сопротивлений), помещенных в фарфоровый корпус. Единичный искровой промежуток состоит из двух фасонных латунных электродов 14, приклеенных к изоляционной миканитовой или картонной прокладке 15. Искровые промежутки в определенном количестве помещены в бакелитово-бумажный цилиндр, который не позволяет им смещаться друг относительно друга.

Резисторы набирают из вилитовых дисков, плоскости которых металлизуют алюминием, а боковые поверхности покрывают изолирующей обмазкой.

Наиболее характерные повреждения разрядников: сколы и трещины фарфорового корпуса, нарушения герметичности и крепления внутренних деталей разрядника, увеличенный ток утечки (более 10 мА) и низкое пробивное напряжение промышленной частоты (менее 26–30,5 кВ).

Разрядник, как правило, находится все время во включенном положении. При осмотрах, особенно после грозы, и автоматических отключениях обращают внимание на целостность фарфоровых корпусов: они должны быть очищены от грязи и пыли и осмотрены. При наличии трещин на корпусе разрядник заменяют. Незначительные трещины эмалевого покрытия допускают дальнейшую эксплуатацию разрядника. Головки болтов и гайки должны быть окрашены, чтобы не было ржавых подтеков.

Полная ревизия разрядника производится одновременно с проведением текущего или капитального ремонта всего оборудования подстанции. Разрядник отсоединяют от шин и осторожно в вертикальном положении переносят к месту проверки и профилактических испытаний. Легким покачиванием проверяют на слух плотность укладки внутренних деталей.

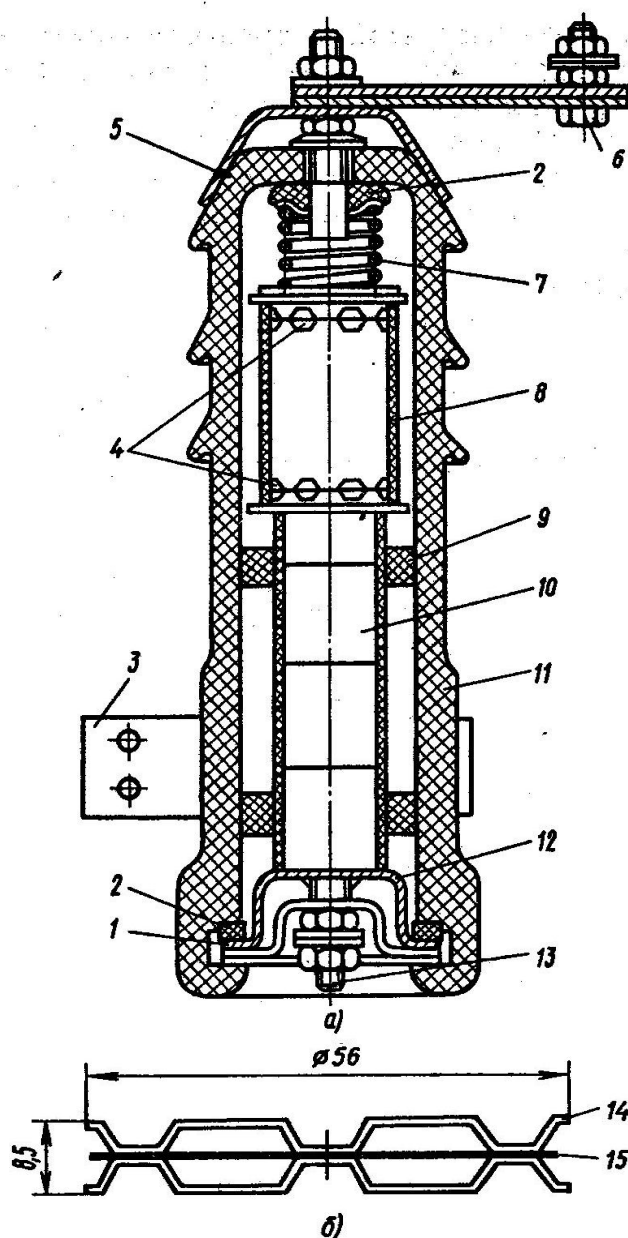


Рис. 5.12. Вентильный разрядник РВП – 10:

а – общий вид; *б* – единственный искровой промежуток; 1 – металлический сегмент; 2 – озоностойкая резина; 3 – хомут; 4 – искровые промежутки; 5 – металлический колпак; 6 – болт для присоединения шин; 7 – спиральная пружина; 8 – изоляционный цилиндр; 9 – прокладка из фтора или воздуха; 10 – резисторы; 11 – фарфоровый корпус; 12 – нижняя диаграмма; 13 – болт для заземления; 14 – латунный электрод; 15 – изоляционная прокладка

Измеряют ток утечки и величину пробивного напряжения. При обнаружении неисправностей или отступления от норм электрических показателей разрядник заменяют новым, проверенным. Вскрытие разрядника с целью ремонта его деталей является сложной операцией, требует специального оборудования и опыта ремонтного персонала. Вскрытие разрядника возможно в чистом, сухом, теплом, светлом помещении. Замену отдельных деталей или изменение их взаимного расположения, а также ремонт их проводят в строгом соответствии с заводскими инструкциями.

5.2.3. Разъединители

Устройство, работа, неисправности и способы устранения. Основными элементами разъединителя (рис.5.13) являются: рама, изоляторы, контакты, пружины. В процессе эксплуатации в основном изнашиваются или повреждаются изоляторы, контакты системы, приводной механизм и каркас (цоколь).

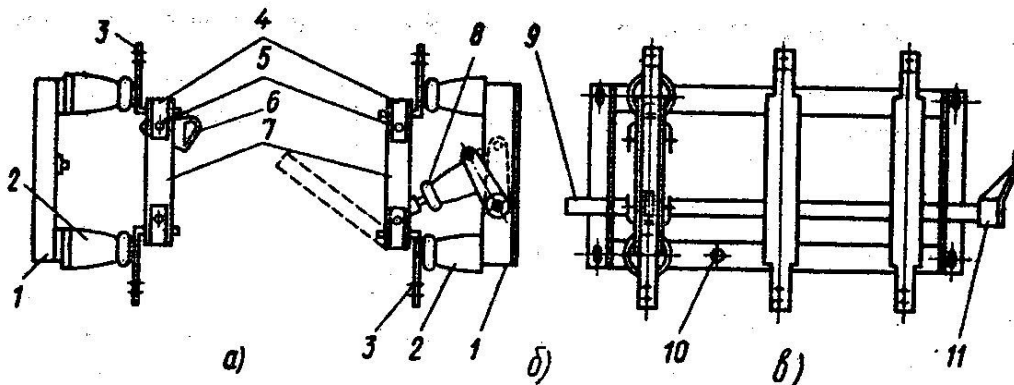


Рис. 5.13 – Разъединитель:

а – однополюсный; б – трехполюсный (вид сбоку); в – трехполюсный (вид спереди): 1 – рама; 2 – изолятор; 3 – контакт; 4 – стальные пластины; 5 – пружина; 6 – замок; 7 – нож; 8 – фарфоровая тяга; 9 – вал; 10 – болт заземления; 11 – рычаг

Появление пленки оксида на поверхности контактов разъединителей увеличивает их переходное сопротивление, что ведет к чрезмерному нагреву, который легко установить по появлению на них цветов побежалости. Дефект устраняется зачисткой контактов мелкозернистой стеклянной шкуркой. Очищенную поверхность контакта для предохранения от окисления (коррозии) покрывают тонким слоем технического вазелина; особенно в не отапливаемых помещениях

Искривление ножей подвижных контактов можно устранить взаимным перемещением подвижных и неподвижных контактов относительно друг друга или устранением кривизны. При ударах ножа о головку опорного изолятора неподвижного контакта неисправность устраняют регулированием тяги, привода.

Если вал имеет продольное перемещение, то устранить его возможно установкой плоских шайб или кольцами из согнутой проволоки диаметром 4–5 мм. Шайбы и кольца устанавливают с двух сторон и приваривают в нескольких точках к валу. Кроме того, продольное перемещение можно ликвидировать, если просверлить на валу отверстия с одной стороны стенки рамы и установить шплинты;

Плотное соприкосновение подвижных и неподвижных контактов обеспечивается специальными пружинами, создающими требуемое нажатие. Уход за состоянием пружин сводится к внешнему осмотру. Плотность прилегания контактов проверяют щупом толщиной 0,05 мм и шириной 3 мм. Просовывая щуп в промежуток между подвижным и неподвижным контактами, устанавливают величину, на которую он углубляется в зазор. Если эта глубина превышает 4–5 мм, ножи подвижного контакта регулируют

Допускается не одновременность включения не более 3 мм. Регулировку следует производить подгонкой тяг. Нож разъединителя в положении «включено» должен находиться от основания неподвижного контакта на расстоянии не более 5 мм.

Необходимо тщательно проверить работу системы привода. Вспомогательные контакты К.СА должны замыкаться при приближении ножа разъединителя к губкам, а размыкаться при прохождении ножом 75 % его полного хода. Регулировка достигается изменением длины тяги привода. Все болтовые соединения подтягивают, а поверхность очищают от грязи. Трущиеся поверхности привода разъединителей смазывают летом солидолом или техническим вазелином, зимой — холодостойкой смазкой. Холостой ход привода не должен превосходить 5°. При большем ходе уменьшают зазоры в сочленениях.

Отремонтированный разъединитель проверяют неоднократным включением и отключением с помощью привода. Если при этом не обнаружится каких-либо признаков раз регулирования или других дефектов, разъединитель принимают в эксплуатацию.

Основные неисправности разъединителей и способы их устранения приведены в таб. 5.1.

Таблица 5.1.

Неисправности разъединителей и способы их устранения

Неисправность	Возможная причина	Способ устранения
Привод не удерживает выключатель во включенном положении	Фиксатор не зацепляется за стопорный палец из-за следующих причин: коротка тяга, соединяющая рычаг выключателя нагрузки с секторным рычагом привода не поворачивается на оси фиксатор из-за повышенного трения сточился зуб фиксатора соскочила пружина фиксатора	Увеличить длину тяги, вывернув шпильки Снять фиксатор, очистить ось и отверстие фиксатора, снять заусенцы и нанести новую смазку Заменить фиксатор Поставить пружину на место
Выключатель не отключается после расцепления защелки с отключающей собачкой – привод не отключает выключатель	Заклинилась отключающая собачка и секторный рычаг из-за неправильной установки привода и увеличились люфты деталей Деформировались отключающая собачка и секторный рычаг в месте соприкосновения Плохо обработаны секторный рычаг и отключающая собачка	Установить правильно привод, уменьшить люфты деталей привода на осях с помощью дополнительных шайб Заменить привод Тщательно зачистить места соприкосновения и слегка смазать
Привод отключается при заводе пружины выключателя нагрузки	Сработался зуб защелки Сработался выступ отключающей собачки, за который зацепляется зуб защелки	Заменить защелку или целиком привод Заменить отключающую собачку или целиком привод
Защелка не расцепляется с отключающей собачкой при нажатии на рычажок ручного питания	Соскочила возвратная пружина с защелки Отогнулся палец на рычаге ручного отключения	Установить пружину на место Выправить палец на рычаге ручного отключения
Защелка не расцепляется с отключающей собачкой при подаче импульса за катушку отключения	Слабо ударяет боек по хвосту защелки – высоко установлен корпус соленоида	Опустить корпус соленоида

5.2.4. Предохранитель кварцевый ПК

Устройство, неисправности и методы их устранения (рис. 5.14). Основными элементами предохранителя являются фарфоровый патрон 3, заполненный кварцевым песком, плавкие вставки 5, изоляторы 9 и указатель срабатывания 7.

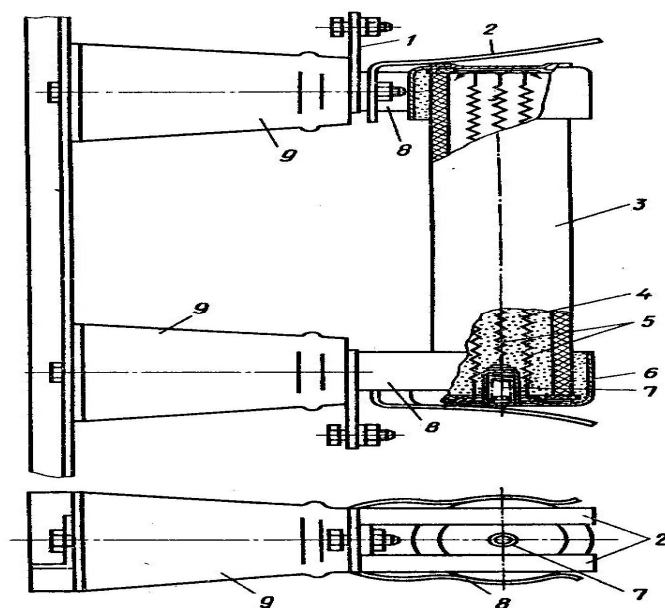


Рис. 5.14. Кварцевый предохранитель:

- 1 – контактные выводы; 2 – ограничители; 3 – фарфоровый патрон;
4 – кварцевый песок; 5 – плавкие вставки; 6 – латунные колпачки;
7 – указательное устройство; 8 – контактный держатель; 9 – изолятор

Указатель срабатывания состоит из металлической крыши с втулкой, внутри которой помещена спиральная пружина. Один конец закреплен к дну втулки, второй – к головке указателя и снабжен небольшим крючком, который зацепляют на находящуюся внутри указателя проволоку, которая, перегорая, выбрасывает головку.

При визуальном осмотре предохранителя проверяют: состояние фарфоровых изоляторов, армировку на концах патрона, латунные колпачки, контактные соединения с ошиновкой. Плотность соприкосновения достигается подгибанием контактных зажимов. Если контакт от перегрева потерял упругость, его заменяют.

Проверяют контактные соединения с ошиновкой. В конструкции предохранителя с кварцевым заполнением предусмотрена многократная перезарядка, которая выполняется квалифицированным персоналом в ремонтных мастерских согласно заводским инструкциям. Це-

лостность плавкой вставки проверяют прибором или контрольной лампой. Полноту засыпки кварцевого песка проверяют легким встряхиванием. Старый песок оставляют в исключительных случаях, если он не спекся и не отсырел (влажность меньше 0,05 %). Размер песчинок должен быть 0,5–1 мм. Чтобы не допустить проникновение в патрон, колпачки крепят на цементном растворе.

5.2.5. Комплектные распределительные устройства

Комплектное распределительное устройство (КРУ) на напряжение 6–10 кВ состоит из ячеек различного назначения (вводных, отходящих линий, трансформаторов напряжения и др.), выполненных в виде шкафов с соответствующим оборудованием. Шкаф КРУ серии XXVI с выключателем показан на рис. 5.15.

Этот шкаф состоит из двух частей: корпуса 1 с аппаратурой, стационарно закрепляемого на закладных частях пола, выдвижной тележки 14 с аппаратурой, которая может находиться в трех положениях:

- рабочем, (тележка полностью введена в корпус, как показано на рис. 5.14);
- контрольном, (тележка выдвинута настолько, что силовые контакты разомкнуты, а вспомогательные контакты могут быть замкнуты, что позволяет опробовать выключатель на включение и выключение при разомкнутой силовой цепи;
- ремонтном, при котором она удалена из корпуса.

В корпусе имеются отсеки сборных шин 1, верхних и нижних разъёмных контактов 25 и 19, отсек 13 выдвижной тележки 14 и релейный 7. В отсеке 3 размещены сборные шины 5, установленные на опорных изоляторах 6, отпайки 4, проходящие через проходные изоляторы 2 в отсек 25 и подключенные к неподвижным элементам 23 верхних разъёмных контактов. В отсеке 19 находятся кабельная сборка 20 для отходящего кабеля 18, трансформаторы тока 17 с неподвижными элементами нижних разъёмных контактов и заземляющий разъединитель 16. В отсеке 7 размещена релейная аппаратура 8. Некоторые приборы и часть реле устанавливаются на дверце 9-го отсека. На выдвижной тележке 14 располагаются выключатель 11 с приводом и подвижные элементы 15 верхних и нижних разъёмных контактов. Вторичные цепи аппаратуры, размещенной на выдвижной тележке, соединяются с цепями релейного отсека гибким жгутом 10 со

специальным разъемом. На чертеже показаны также рычаг 12 для доводки тележки в рабочее положение, ручки, с помощью которых выкатывают тележку из корпуса шкафа, а также кнопки управления выключателем.

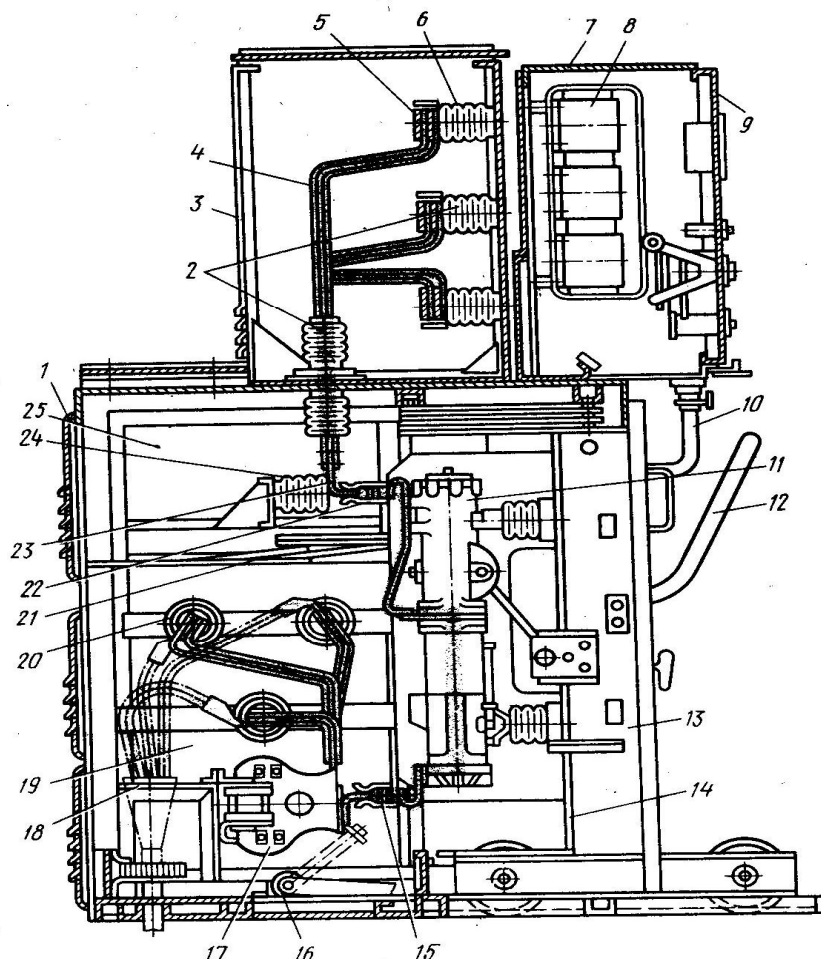


Рис. 5.15 Комплектное распределительное устройство (КРУ)

Кроме комплектных распределительных устройств КРУ используются комплектные распределительные устройства КСО (стационарные одностороннего обслуживания) на напряжение, 10 кВ, состоящие из ряда камер (рис. 5.16).

Камера представляет собой по конструкции стальной каркас, на котором размещены сборные шины 1 и шинный разъединитель 2 с приводом 4, выключатель 3 с приводом 7, трансформаторы тока 5 и кабельные разъединители 6. Две дверцы на фасаде соответственно предназначены для осмотра выключателя и для присоединения и испытания кабельной линии. Коробка зажимов для шинок вторичных цепей со световым карнизом размещена в верхней части фасада

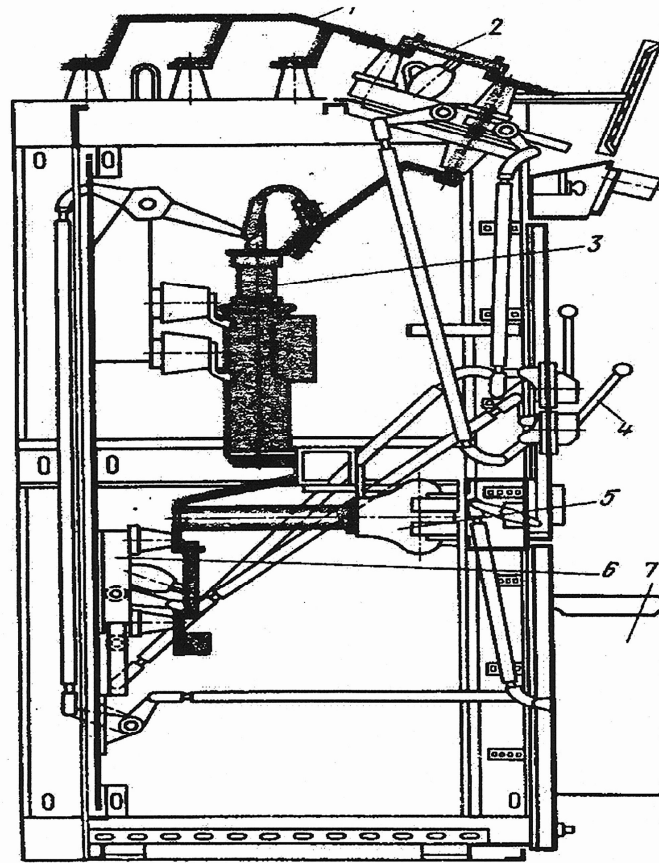


Рис. 5.16. Распределительное устройство КСО (камера)

Комплектные распределительные устройства наружной установки (КРУН) также состоят из ряда ячеек различного назначения в виде шкафов с встроенными в них аппаратами, приборами, устройствами защиты и управления и отличаются от комплектных распределительных устройств внутренней установки (КРУ) наличием уплотнений, обеспечивающих защиту аппаратуры от загрязнений и атмосферных осадков.

Шкаф комплектного распределительного устройства наружной установки на 10 кВ серии К-VI с выключателем МГГ-10 на 2000 А и воздушным вводом показан на рис. 5.17.

В металлическом корпусе 5 с дверцей 2 размещены воздушный ввод 6, сборные шины 7, шинный разъединитель 8 с приводом 3, выключатель 9 с электромагнитным приводом 1 и трансформаторы тока 4.

К каждому распределительному устройству обычно прилагается схема заполнения.

Испытания, проверка, регулировка. После выполнения капитального ремонта параметры масляного выключателя с приводом должны

быть доведены до значений, предусмотренных заводом-изготовителем.

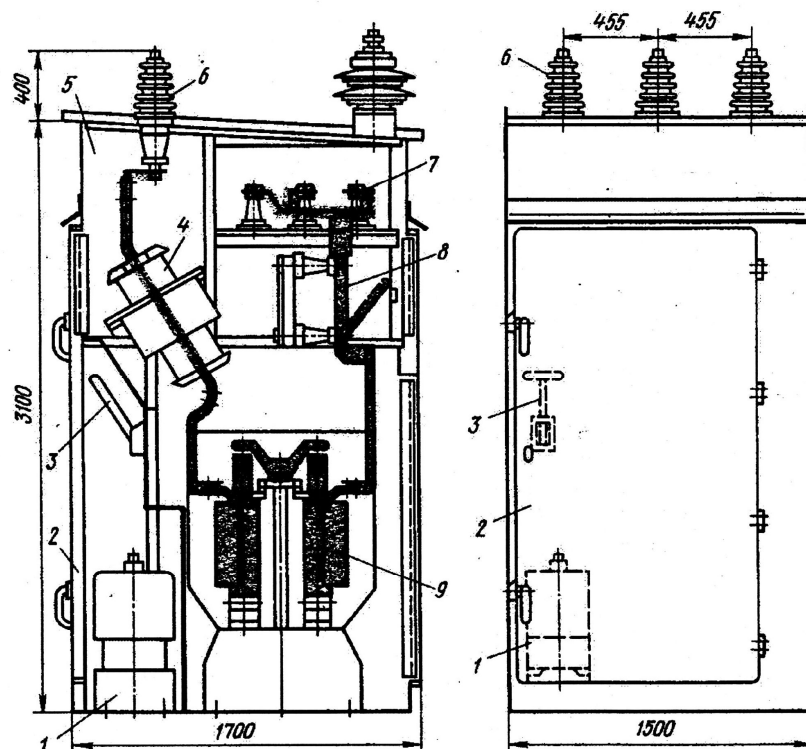


Рис. 5.17. Шкаф комплектного распределительного устройства на 10 кВ

6. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

6.1. Электробезопасность

Общие сведения

Меры безопасности обслуживающего персонала регламентируются правилами безопасности труда, правилами электробезопасности, правилами поведения на рабочих местах при ремонте электрического оборудования и внутреннего распорядка.

Как показывают статистические данные [12], среди общего количества несчастных случаев травматизм от поражения электрическим током составляет около 10 %. Однако степень тяжести этих травм и количества летальных исходов превышает аналогичные показатели травматизма, вызванного другими причинами. Основными причинами поражения электрическим током является:

- прикосновение к открытым токоведущим частям оборудования и проводам;
- прикосновение к токоведущим частям, изоляция у которых повреждена;
- касание токоведущих частей через предметы с низким сопротивлением изоляции;
- прикосновение к металлическим частям оборудования, случайно оказавшимся под напряжением в результате отсутствия или повреждения защитных устройств; соприкосновение со строительными деталями конструкций, оказавшихся под напряжением. Опасность поражения электрическим током создает также разнообразное оборудование: источники сварочного тока, электрический привод (включая пускорегулирующую аппаратуру), электрооборудование подъемно-транспортных устройств, электрифицированный транспорт, высокочастотные и осветительные установки, электрические ручные машины и т. д.

Опасность поражения электрическим током связана с недостатками в конструкции и монтаже оборудования, нарушением правил его эксплуатации, неудовлетворительной организацией рабочих мест, недостаточным обучением работников.

Воздействие электрического тока на организм человека может вызвать различные электрические травмы: электрический ожог, металлизацию кожи, электрический знак, электрический удар, электроофтальмию.

Степень тяжести поражения человека электрическим током зависит от ряда факторов: электрического сопротивления тела человека; величины длительности действия, рода и частоты тока, пути тока в организме; состояние организма и условий внешней среды. Сопротивление тела человека действию тока зависит от состояния кожного покрова, плотности, толщины и влажности кожи, психического состояния, пола, возраста и колеблется от нескольких сотен Ом до нескольких тысяч и сотен тысяч Ом. Чем выше сопротивление, тем меньше степень поражения. При заболевании кожи, сердца, легких, нервной системы опасность поражения электрическим током увеличивается. Утомленный человек легче подвергается поражению током. При внимательном обслуживании электрифицированного оборудования степень поражения ослабляется. Необходимо помнить, что болезненное состояние организма, алкогольное опьянение уменьшает сопротивление организма и увеличивает степень поражения током, а любое заболевание сердца является противопоказанием для доступа к работе, связанной с опасностью поражения электрическим током.

С увеличением длительности протекания тока через тело человека также возрастает тяжесть поражения. Так для переменного тока частотой 50 Гц предельно допустимый ток при продолжительности воздействия 0,1 с составляет 500 мА, а при воздействии 1 с лишь 50 мА.

В зависимости от условий, повышающих или понижающих опасность поражения человека электрическим током, все помещения делается на помещения с повышенной опасностью, особо опасные и без повышенной опасности.

Значение тока, проходящего через человека, в случае прикосновения к металлической части, находящейся под напряжением, определяются главным образом сопротивлением человека.

В расчетах принимают минимальное сопротивление человека

$R_{\text{ч}} = 1 \text{ кОм}$, безопасный для организма ток $I_{\text{без.}} = 0,03 \text{ А}$. Поэтому безопасным является напряжение прикосновения $U_{\text{пр}} = I_{\text{без.}} \cdot R_{\text{ч}} = 0,03 \cdot 1000 = 30 \text{ В}$.

Комплекс мероприятий, обеспечивающий электробезопасность, включает в себя:

- размещение открытых токоведущих частей в местах, недоступных для случайного прикосновения или защищенных от него оболочками и т.д..

- применением пониженного напряжения для электрического инструмента и переносных светильников;
- применение резиновых перчаток, подставок, ковриков и.т.д.;
- применение защитных заземлений и занулений, а также устройств контроля изоляции и токов утечки и устройств защитного отключения.

Увеличение сопротивления человека достигается применением защитных изолирующих устройств. Эти устройства делятся на основные и дополнительные.

Основные средства выдерживают рабочее напряжение электроустановок. Они допускают прикосновение к токоведущим частям.

Дополнительные средства защиты служат для повышения надежности основных средств.

В сетях с напряжением до 1000 В к основным средствам относятся:

- перчатки (рукавицы) резиновые диэлектрические;
- инструмент с изолированными рукоятками, указатели напряжения, токоизмерительные клещи.

К дополнительным средствам относятся:

- галоши резиновые диэлектрические;
- коврики (дорожки) резиновые, изолирующие подставки.

Согласно Правилам устройства электроустановок для обеспечения безопасности людей все металлические части электрооборудования установок, по которым нормально ток не проходит, должны быть заземлены. Заземляются корпуса электродвигателей, путевых выключателей, каркасы электрошкафов, сердечники и кожухи электромагнитов, сетки, ограждающие панели, каркасы пусковых и регулировочных реостатов, кожухи контроллеров.

Для заземления перечисленных элементов необходимо иметь заземляющее устройство. В цехах применяют контактное заземляющее устройство. Оно состоит из искусственных заземлителей, соединенных металлической полосой с выводами в двух местах.

6.2. Расчет защитного заземления

Защитное заземление – преднамеренное электрическое соединение с землей или ее эквивалентом металлических не токопроводящих частей электроустановок, которые могут оказаться под напряжением.

Защитное заземление применяется в сетях напряжением до 1000 В переменного тока – трехфазные трех проводные с изолированной

нейтралью; однофазные двухпроводные, изолированные от земли; двухпроводные сети постоянного тока с изолированной средней точкой обмоток источника тока; в сетях выше 1000 В переменного и постоянного тока с любым режимом нейтрали.

В зависимости от места размещения заземлителей относительно заземленного оборудования различают два типа заземляющих устройств: выносное и контурное.

При выносном заземляющем устройстве заземлитель вынесен за пределы площадки, на которой размещено заземляемое оборудование, или сосредоточен на некоторой части этой площадки.

При контурном заземляющем устройстве электроды заземлителя размещают по контуру (периметру) площадки, на которой заземляемое оборудование, а также внутри этой площадки.

В открытых электроустановках корпуса присоединяют непосредственно к заземлителю проводами. В зданиях прокладывается магистраль заземления, к которой присоединяют заземляющие провода. Магистраль заземления соединяют с заземлителем не менее чем в двух местах.

В качестве заземлителей в первую очередь следуют использовать естественные заземлители в виде проложенных под землей металлических коммуникаций (за исключением трубопроводов для горючих и взрывчатых веществ, труб теплотрасс), металлических конструкций зданий, соединенных с землей, свинцовых оболочек кабелей, обсадных труб артезианских колодцев, скважин, шурфов и т.д.

В качестве естественных заземлителей подстанций и распределительных устройств рекомендуется использовать заземлители опор отходящих воздушных линий электропередачи, соединенные с заземляющим устройством подстанции или распределительным устройством с помощью грозозащитных тросов линий.

Если сопротивление естественных заземлителей требуемому сопротивлению растеканию тока соответствует, то устройство искусственных заземлителей не требуется.

Когда естественные заземлители отсутствуют или использование их не дает нужных результатов, применяют искусственные заземлители: стержни из угловой стали размером 50×50, 60×60, 75×75 с толщиной стенки не менее 4 мм, длиной 2,5 – 3 м; стальные трубы диаметром 50 – 60 мм, длиной 2,5–3 м с толщиной стенки не менее 3,5 мм; прутковая сталь диаметром не менее 10 мм, длиной до 10 м и более.

Заземлители забивают в ряд или по контуру не такую глубину, при которой от верхнего конца заземлителя до поверхности земли остается 0,5 – 0,8 м. Расстояние между вертикальными заземлителями должно быть не менее 2,5 – 3 м.

Для соединения вертикальных заземлителей между собой применяют стальные полосы толщиной не менее 4 мм и сечением не менее 48 мм² или стальной провод диаметром не менее 6 мм. Полосы (горизонтальные заземлители) соединяют с вертикальными заземлителями сваркой.

Магистраль заземления внутри зданий с электроустановками напряжением до 1000 В выполняют стальной полосой сечением не менее 100 мм² или сталью круглого сечения той же проводимости. Ответвления от магистрали к электроустановкам выполняют стальной полосой сечением не менее 24 мм² или круглой сталью диаметром не менее 5 мм.

Нормируемые сопротивления приведены в таб. 6.1.

Таблица 6.1

Сопротивления защитных заземлителей в электрических установках

Характеристика установок	Допустимое сопротивление заземлителей, Ом
Установки напряжением выше 1000В	
Защитное заземление в установках с большими токами замыкания на землю ($I_a > 500$ А)	0,5
Защитное заземление в установках с малыми токами замыкания на землю ($I_a < 500$ А):	
заземляющее устройство одновременно используется для установок напряжением до и выше 1000 В	$\frac{125}{I_a} \leq 4$
заземляющее устройство используется только для установок напряжением выше 1000 В	$\frac{125}{I_a} \leq 10$
Установки напряжением до 1000 В	
Защитное заземление всех установок	4

Значения расчетных токов замыкания на землю принимаются по данным энергосистемы, либо путем расчетов.

Расчет заземления проводится следующим образом.

1. В соответствии с ПЭУ устанавливается необходимое сопротивление заземления R_3 .

2. Определяют путем замера, расчетом или на основе данных по работающим аналогичным заземлительным устройствам возможное сопротивление растеканию естественных заземлителей R_e . Если $R_e < R_3$, то устройство искусственного заземления не требуется. Если $R_e > R_3$, то необходимо устройство искусственного заземления.

3. Сопротивление (Ом) растекания искусственного заземления:

$$R_{\text{и}} = \frac{R_3 R_e}{R_e - R_3}.$$

Далее расчет ведется по $R_{\text{и}}$.

Таблица 6.2

Приближенные значения удельных сопротивлений грунтов и воды ρ , Ом·м

Наименование грунта	Удельное сопротивление, Ом·м
Песок	700
Суглинок	100
Глина	40
Садовая земля	40
Глина (слой 7–10 м) или гравий	70
Мергель, известняк, крупный песок с валунами	1000–2000
Скала, валуны	2000–4000
Чернозем	20
Торф	20
Речная вода (на равнинах)	10–100
Морская вода	0,2–1

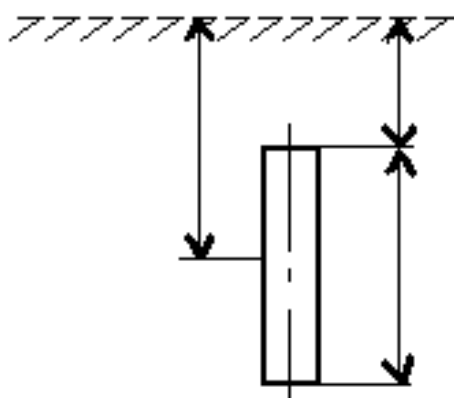


Рис. 6.1. Расположение вертикального заземлителя в земле

4. Определяют удельное сопротивление грунта ρ из табл. 6.2. При производстве расчетов эти значения должны умножаться на коэффициент сезонности, зависящий от климатических зон и вида заземлителя (табл. 6.3).

Таблица 6.3

Признаки климатических зон и значения коэффициента k_c

Данные, характеризующие климатические зоны и тип применяемых заземляющих электродов	Климатические зоны Казахстана			
	I	II	III	IV
Климатические признаки зон: средняя многолетняя низшая температура (январь) средняя многолетняя высшая температура (июль) среднегодовое количество осадков, мм продолжительность замерзания вод, дн Значение коэффициента k_c при применении стержневых электродов длиной 2 – 3 м и глубине заложения их вершины 0,5 – 0,8 м Значение коэффициента k'_c при применении протяженных электродов и глубине заложения их вершин 0,8 м	От – 20 до – 15° С От + 16 до + 18° С ~400 190–170 1,8–2 4,5–7,0	От – 14 до – 10° С От + 18 до + 22° С ~500 ~150 1,5–1,8 3,5–4,5	От – 10 до 0° С От + 22 до + 24° С ~500 ~100 1,4–1,6 2,0–2,5	От 0 до +5° С От + 24 до + 26° С ~300-500 0 1,2–1,4 1,5–2

Расчетное удельное сопротивление грунта для стержневых заземлителей (вертикальных заземлителей) $\rho_{расч. в} = k_c \rho_{табл.}$; для протяженного заземлителя (горизонтальных полос) $\rho_{расч. г} = k'_c \rho_{табл.}$

5. Определяют сопротивление (Ом) растеканию одного вертикального заземлителя: для стержневого круглого сечения (трубчатый или уголкового) в земле (рис.6.1)

$$R_B = \frac{0,366 \rho_{расч.В}}{l} \left(\lg \cdot \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t'' + l}{4t' - l} \right).$$

При этом $l \gg d$, $t_0 \gg 0,5$ м; для уголка с шириной полки b $d = 0,95b$.

Все размеры даны в метрах, а удельное сопротивление грунта в Ом·м.

Сопротивление растекания вертикального заземлителя можно определить по упрощенным формулам (Ом);

для уголка 50×50×5 мм $R_B = 0,348 \rho_{\text{расч. в}} k_c$;

для уголка 60×60×6 мм $R_B = 0,298 \rho_{\text{расч. в}} k_c$;

для уголка 75×75×8 мм $R_B = 0,292 \rho_{\text{расч. в}} k_c$;

для трубы диаметром 60 мм $l = 2 - 2,5$ мм. $R_B = 0,302 \times \rho_{\text{расч. в}} k_c$.

5. Установив характер расположения заземлителей (в ряд или контуром), определяют число вертикальных заземлителей

$$n_B = \frac{R_B}{\eta_B R_{II}}.$$

где η_B – коэффициент использования вертикальных заземлителей, зависящий от количества заземлителей и расстояния между ними (табл. 6,4; 6,5; 6,6; 6,7).

Таблица 6.4

Коэффициенты использования η_B вертикальных электродов из труб, уголков или стержней, размещенных в ряд без учета влияния полосы связи

Отношение расстояния между элект- родами к длине а/л	Число электродов n_B	η_B
1	2	0,84–0,87
	3	0,76–0,80
	5	0,67–0,72
	10	0,56–0,62
	15	0,51–0,56
	20	0,47–0,50
2	2	0,90–0,92
	3	0,85–0,88
	5	0,79–0,83
	10	0,72–0,77
	15	0,66–0,73
	20	0,65–0,70
3	2	0,93–0,95
	3	0,90–0,92
	5	0,85–0,88
	10	0,79–0,83
	15	0,76–0,80
	20	0,74–0,79

Количество вертикальных заземлителей для определения η_v можно принять равным $R_v/R_{\text{и}}$.

Таблица 6.5

Коэффициенты использования η_v вертикальных электродов из труб, уголков, стержней, размещенных в ряд без учета влияния полосы связи

Отношение расстояния между элект- родами к длине a/l	Число электродов n_v	η_v
1	4	0,66–0,72
	6	0,58–0,65
	10	0,52–0,58
	20	0,44–0,50
	40	0,38–0,44
	60	0,36–0,42
	100	0,33–0,39
2	4	0,76–0,80
	6	0,71–0,75
	10	0,66–0,71
	20	0,61–0,66
	40	0,55–0,61
	60	0,52–0,58
	100	0,49–0,55
3	4	0,84–0,86
	6	0,78–0,82
	10	0,74–0,78
	20	0,68–0,73
	40	0,64–0,69
	60	0,62–0,67
	100	0,59–0,65

7. При устройстве простых заземлителей в виде короткого ряда вертикальных стержней расчет на этом можно закончить и не определять проводимость соединяющей полосы, поскольку длина ее относительно невелика (в этом случае фактически величина сопротивления заземляющего устройства будет несколько завышена).

При устройстве заземлителей по контура из ряда вертикальных заземлителей целесообразно учитывать и сопротивление растеканию полос (горизонтальный заземлитель). Для этого на площади установки заземления намечают, как будут размещены вертикальные заземлители n_v , и определяют длину соединительной полосы (м)

$l_r = 1,05n_b a$, где a – расстояние между вертикальными заземлителями (обычно отношение расстояния между вертикальными заземлителями к их длине принимают равным $a/l = 1; 2; 3$).

8. Определяют сопротивление растеканию горизонтального заземлителя. Для стержневого круглого сечения (рис. 6.2) (Ом)

$$R_r = \frac{0,366 \rho_{расч.г}}{l} \cdot \lg \cdot \frac{i^2}{dt}.$$



Рис. 6.2. Расположение горизонтального заземлителя в земле

Здесь $l > d$; $l \gg 4t$. Для полосы шириной b , $d = 0,5 b$. Действительное сопротивление (Ом) растекания горизонтального заземлителя с учетом коэффициента использования

$$R'_r = \frac{R_r}{\eta_r},$$

где η_r – коэффициент использования горизонтального заземлителя определяется по табл. 6,6; 6,7..

Таблица 6.6

Коэффициенты использования η_r горизонтального полосового электрода (трубы, уголки, полосы и т. д.) при размещении вертикальных электродов в ряд

Отношение расстояния между электродами к длине a/l	η_r при числе электродов в ряду							
	4	5	8	10	20	30	50	65
1	0,77	0,74	0,67	0,62	0,42	0,31	0,21	0,20
2	0,89	0,86	0,79	0,75	0,56	0,46	0,36	0,34
3	0,92	0,90	0,85	0,82	0,68	0,58	0,49	0,47

9. Уточняется сопротивление (Ом) растеканию заземлителей с учетом сопротивления горизонтального заземлителя

$$R'_B = \frac{R'_r R_{II}}{R'_r - R_{II}}.$$

Таблица 6.7

Коэффициенты использования η_r горизонтального полосового электрода (трубы, уголки, полосы и т. д.) при размещении вертикальных электродов по контуру

Отношение расстояния между электродами к длине a/l	η_r при числе электродов в контуре заземления								
	4	5	8	10	20	30	50	70	100
1	0,45	0,40	0,36	0,34	0,27	0,24	0,21	0,20	0,19
2	0,55	0,48	0,43	0,40	0,32	0,30	0,28	0,26	0,24
3	0,65	0,64	0,60	0,56	0,45	0,41	0,37	0,35	0,33

10. Определяют уточненное количество вертикальных заземлителей. Здесь $n'_в$ округляется в сторону увеличения

$$n'_в = \frac{R_B}{\eta_n R_B^1}.$$

Пример 6.1

Определить необходимое число уголков размером $50 \times 50 \times 5$ мм длиной 2,5 м для устройства заземления трансформатора в четырехпроводной сети напряжением 380/220 В. Заземлитель протяженный – стальная полоса 40×4 мм. Расстояние между уголками 2,5 м. Уголки забиты в ряд. Глубина заложения протяженного заземлителя 0,7 м.

Грунт – глина с удельным сопротивлением 40 Ом·м. Климатическая зона II. Нормируемое сопротивление заземляющего устройства 4 Ом.

Решение

1. Удельное сопротивление грунта с учетом коэффициента сезонности по табл. 6,3: для вертикальных заземлителей $\rho_{расч. в} = k_c \rho_{табл} = 1,45 \cdot 40 = 58$ Ом·м,

для горизонтального заземлителя $\rho_{расч. в} = k_c \rho_{табл} = 3,5 \cdot 40 = 140$ Ом·м.

2. Сопротивление растеканию вертикального заземлителя:

$$R_B = \frac{0,366 \rho_{расч. в}}{l} \left(\lg \cdot \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t^{II} + l}{4t^I - l} \right) = \frac{0,366 \rho_{расч. в}}{l}$$

$$\left(\lg \cdot \frac{2 \cdot 2,5}{0,95 \cdot 0,05} + \frac{1}{2} \lg \frac{4 \cdot 1,95 + 2,5}{4 \cdot 1,95 - 2,5} \right) = 18,4.$$

Здесь $d = 0,95 b$; b – ширина полки уголка;

$t' = t_0 + 0,5 l = 0,7 + 0,5 \cdot 2,5 = 1,95$ м.

3. Количество вертикальных заземлителей:

$$n_B = \frac{R_B}{\eta_B R_3} = \frac{18,4}{0,7 \cdot 4} = 6,6$$

где R_3 – необходимое сопротивление заземления по норме, Ом;

η_B – коэффициент использования вертикальных заземлителей по табл. 6,4, равный 0,7.

Считаем, что число труб $18,4/4 \approx 4$.

Принимаем к установке семь уголков.

4. Длина горизонтального заземлителя (полосы):

$$l_r = 1,05 \eta_B a = 1,05 \cdot 7 \cdot 2,5 = 18,4 \text{ м.}$$

Принимаем $l_r = 19$ м.

5. Сопротивление растеканию горизонтального заземлителя

$$R_r = \frac{0,366 \rho_{расч.г}}{l} \cdot \lg \cdot \frac{i^2}{dt} = \frac{0,366 \cdot 140}{19} \lg \frac{19^2}{0,5 \cdot 0,04 \cdot 0,7} = 11,8$$

Здесь $d = 0,5 b = 0,5 \cdot 0,04$.

6. Действительное сопротивление растекания горизонтального заземлителя с учетом коэффициента использования:

$$R_r' = \frac{R_r}{\eta_r} = \frac{11,8}{0,67} = 17,8, \text{ Ом.}$$

7. Сопротивление растеканию заземлителей с учетом сопротивления горизонтального заземлителя:

$$R_B' = \frac{R_B R_3}{R_r' - R_3} = \frac{17,8 \cdot 4}{17,8 - 4} = 5,2, \text{ Ом.}$$

8. Уточненное количество вертикальных заземлителей:

$$n_B' = \frac{R_B'}{\eta_B R_3} = \frac{18,4}{0,7 \cdot 5,2} = 5,1.$$

Принимаем к установке шесть вертикальных заземлителей (уголков).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время быстрыми темпами происходит расширение ассортимента электрооборудования, применяемого в различных областях народного хозяйства Казахстана. Одновременно расширяются функциональные возможности, и повышается качество различных видов электрооборудования. Для эффективного его использования необходимы специалисты высокой квалификации, имеющие практические профессиональные навыки и хорошие теоретические знания. Хорошие профессиональные навыки и опыт по эксплуатации различных видов оборудования могут быть получены в процессе обучения рабочим профессиям на начальном этапе обучения в ВУЗе. На решение этой задачи направлено предлагаемое учебное пособие. В нем рассмотрены основные вопросы, которыми придется заниматься специалистам – бакалаврам по специальности 050718 («Электроэнергетика»). Многообразие условий работы электрооборудования даже на одном предприятии требуют от обслуживающего персонала творческого подхода к решению каждого вопроса, грамотных технических решений и качественного их исполнения.

Система подготовки таких специалистов должна разрабатываться с учетом состояния и перспективы развития различных видов электрооборудования, требуемого практического опыта и навыков будущих специалистов по обслуживанию и ремонту будущих специалистов. Будущий специалист должен хорошо знать устройство, принцип действия, характеристики и другие свойства электрооборудования, иметь практический опыт использования измерительных приборов, уметь рассчитывать и выбирать электродвигатели, элементы преобразовательных устройств и др. С учетом рассмотренных задач разработано предлагаемое учебное пособие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Белецкий А.Ф.* Основы теории линейных электрических цепей. – М.: Издательство связь, 1967.
2. *Электротехника и электроника / Под ред. П.А. Петленко.* «АСАДЕМА», 2003.
3. *Востриков Н.Г.* Электрические измерения. – М.: Высшая школа, 1986.
4. *Вернер В.В.* Электромонтер-ремонтник. – М.: Высшая школа, 1987.
5. *Жеребцов И.П.* Основы электроники. Л.: Энергоатомиздат, 1989.
6. *Грамолин В.Н.* Новые комплектные буровые установки ОАО "Урал-маш"//Нефтегазовая вертикаль. – 1999. – № 10. Дацковский Л.Х.
7. *Кругликов А.П.* Силовые преобразователи энергии – Алматы: КазНТУ, 2008.
8. *Беспалов В.Я , Котеленец Н.Ф.* Электрические машины. – М.: Издательский центр «Академия», 2008.
9. *Ключев В.А.* Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М: Энергоатомиздат, 1998.
10. *Онищенко Г.Б.* Асинхронный вентильный каскад. – М.: Энергия, 1967.
11. *Корытин А.М.* Синхронные приводы. – М.: Энергия, 1977.
12. *Алиев И.И.* Справочник по электротехнике и электрооборудованию. – М.: Высшая школа, 2000.
13. *Белкин Т.С., Вариводов В.Н.* Состояние и перспективы развития коммутационной аппаратуры высокого напряжения // Электричество, 2001.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. Основные сведения из электротехники.....	4
1.1. Основные понятия и определения.....	4
1.2. Мощность электрического тока.....	6
1.3. Электромагнетизм.....	7
1.4. Диэлектрические материалы.....	8
1.5. Проводниковые материалы.....	9
2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	12
2.1. Общие сведения об измерительных приборах.....	12
2.2. Устройство и работа приборов.....	13
2.3. Основные неисправности и методы их устранения.....	15
2.4. Измерение тока и напряжения.....	20
2.5. Измерение активной мощности.....	23
2.6. Измерение реактивной мощности.....	28
2.7. Погрешности измерения.....	29
3. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ	31
3.1. Полупроводниковые приборы.....	31
3.2. Тиристоры.....	33
3.3. Транзисторы.....	36
3.4. Выпрямители.....	38
4. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	46
4.1. Машины постоянного тока.....	46
4.1.1. Устройство и принцип действия машин постоянного тока...	46
4.1.2. Электромеханические свойства двигателей постоянного тока	48
4.1.3. Способы регулирования частоты вращения двигателей постоянного тока.....	53
4.1.4. Способы торможения двигателей постоянного тока.....	55
4.2. Асинхронные двигатели.....	59
4.2.1. Устройство и принцип действия.....	59
4.2.2. Электромеханические свойства асинхронных двигателей.....	61
4.2.3. Способы регулирования частоты вращения асинхронных двигателей.....	70
4.2.4. Типовые схемы управления асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором	78
4.2.5. Наладка асинхронных двигателей.....	79
4.3. Синхронные машины.....	86

4.3.1. Синхронные генераторы.....	86
4.3.2. Синхронные двигатели.....	89
4.3.3. Электромеханические свойства синхронных двигателей.....	90
4.4. Расчет и выбор мощности двигателей.....	94
4.4.1. Нагрузочные диаграммы.....	95
4.4.2. Выбор мощности двигателей с продолжительным режимом работы.....	97
4.4.3. Выбор мощности двигателей с неравномерной нагрузкой и продолжительным режимом работы.....	98
4.5. Эксплуатация электрических машин и меры безопасности	
4.5.1. Обслуживание асинхронных двигателей.....	105
4.5.2. Обслуживание двигателей постоянного тока.....	108
4.5.3. Электробезопасность при обслуживании электродвигателей	109
4.6. Трансформаторы.....	111
4.6.1. Назначение и устройство трансформаторов.....	111
4.6.2. Силовые трансформаторы.....	113
4.6.3. Измерительные трансформаторы.....	115
5. УСТРОЙСТВА КОММУТАЦИИ И ЗАЩИТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ	119
5.1. Низковольтное оборудование.....	119
5.1.1. Рубильники и переключатели.....	119
5.1.2. Плавкие предохранители.....	120
5.1.3. Контактторы.....	123
5.1.4. Магнитные пускатели.....	126
5.1.5. Автоматические выключатели.....	128
5.2. Высоковольтные оборудование.....	133
5.2.1. Высоковольтные выключатели.....	133
5.2.2. Разрядники.....	139
5.2.3. Разъединители.....	141
5.2.4. Предохранители кварцевые ПК.....	144
5.2.5. Комплектные распределительные устройства.....	145
6. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ.....	149
6.1. Электробезопасность.....	149
6.2. Расчет защитного заземления.....	151
Заклучение.....	161
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	162
Содержание.....	163

Учебное издание

Кругликов Алексей Прохорович

**ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА
для рабочих профессий**

Учебное пособие

Нач. РО ИИЦ
Редактор
Компьютерная верстка

*Губайдулина З.А.
Губайдулина З.А.
Байменова Ж.Н.*

Подписано в печать 28.08.2012 г.

Бумага офсетная. Формат 60х84 1/16. Усл.п.л. 9,5. Уч. изд.л. 10,3

Тираж 300 экз. Заказ №_____ Цена договорная

Издание Казахского национального технического университета
имени К.И. Сатпаева

Информационно-издательский центр КазНТУ

г. Алматы, ул. Сатпаева, 22

ISBN 978-601-228-369-3



9

786012 283693