

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования
«Полоцкий государственный университет»

В. П. АВДЕЙКО

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

Учебно-методический комплекс для студентов специальностей 1-36 01 01
«Технология машиностроения» и 1-36 01 03
«Технологическое оборудование машиностроительного производства»

Новополоцк
ПГУ
2009

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2я73
А18

Рекомендовано к изданию методической комиссией
радиотехнического факультета в качестве
учебно-методического комплекса (протокол № 1 от 23.01.2008)

РЕЦЕНЗЕНТЫ:

заместитель главного энергетика
ОАО «Полоцк-Стекловолокно» Д. В. СТЕПАНОВ;
канд. техн. наук, доц. кафедры конструирования и технологии
радиоэлектронных средств А. Л. АДАМОВИЧ

Авдейко, В. П.

А18

Электротехника, электрические машины и аппараты : учеб.-метод.
комплекс для студентов спец. 1-36 01 01 «Технология машиностроения»
и 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного про-
изводства» / В. П. Авдейко. – Новополоцк : ПГУ, 2009. – 264 с.

ISBN 978-985-418-797-6.

Состоит из четырех частей: теоретический (лекционный) материал с кон-
трольными вопросами, многовариантные задачи для практических занятий и
защиты лабораторных работ и задание к курсовой работе с методическими
указаниями по выполнению.

Предназначен для студентов машиностроительных специальностей, бу-
дет полезен инженерам-механикам в их практической деятельности.

УДК 621.3(075.8)
ББК 31.2я73

ISBN 978-985-418-797-6

© Авдейко В. П., 2009
© УО «Полоцкий государственный университет», 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС	6
1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ	6
1.1. Электрическое поле и его характеристики	6
1.2. Электрический ток	7
1.3. Напряжение	8
1.4. Сопротивление	8
1.5. Плотность электрического тока	9
1.6. Источники и приемники электроэнергии	10
1.7. Элементы электрической цепи	12
1.8. Законы электрической цепи	13
1.9. Основные характеристики магнитного поля	14
1.10. Закон полного тока	16
1.11. Закон Ома для магнитной цепи	17
1.12. Принцип работы электромагнитных устройств	17
1.13. Закон Ампера. Электромагнитная сила	19
1.14. Закон электромагнитной индукции	20
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ	22
2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА	25
2.1. Расчет по законам Кирхгофа	25
2.2. Работа источника на переменную нагрузку	26
2.3. Цепь параллельно-последовательного соединения приемников. Метод преобразования	30
2.4. Цепи с несколькими источниками электроэнергии	31
2.5. Нелинейные цепи	33
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ	37
3. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА	39
3.1. Получение синусоидальной ЭДС	39
3.2. Векторное изображение синусоидальных величин	41
3.3. Особенности цепей переменного тока	42
3.4. Цепи с идеальными элементами	43
3.5. Цепи последовательного соединения элементов	47
3.6. Параллельное соединение приемников	50
3.7. Понятие о символическом методе расчета цепей переменного тока	51
3.8. Схема замещения электрических приемников	53
3.9. Резонанс в электрических цепях	54
3.10. Повышение коэффициента мощности	55
3.11. Катушка со сталью в цепи переменного тока	57
3.12. Магнитные усилители	59
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ	61
4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ	64
4.1. Получение трехфазной ЭДС	64
4.2. Соединение генератора и приемника звездой	66
4.3. Соединение треугольником	68
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ	70
5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И СХЕМЫ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ	73
5.1. Аппараты ручного управления	73
5.2. Аппараты автоматического управления	74
5.4. Максимальная токовая защита электрических цепей	80
6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	86
6.1. Общие сведения	86
6.2. Принцип действия и устройство приборов	87
6.3. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов	92
6.4. Измерение электрических величин	93
6.5. Электрические измерения неэлектрических величин	102
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ	108

7. ТРАНСФОРМАТОРЫ	112
7.1. Назначение трансформатора	112
7.2. Принцип действия трансформатора	112
7.3. Устройство трансформатора	114
7.4. Трансформаторы в режиме холостого хода	115
7.5. Нагрузочный режим трансформатора	118
7.6. Векторная диаграмма трансформатора	119
7.7. Автотрансформаторы	120
7.8. Трехфазные трансформаторы	122
7.9. Многообмоточные трансформаторы	124
7.10. Согласующий трансформатор	125
7.11. Измерительные трансформаторы	126
7.12. Сварочные трансформаторы	127
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ	128
8. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА	130
8.1. Устройство машины постоянного тока	130
8.2. ЭДС обмотки якоря и электромагнитный момент	132
8.3. Режим генератора	133
8.4. Режим двигателя	135
8.5. Механические характеристики электродвигателя	137
8.6. Регулирование скорости вращения двигателя	138
8.7. Реверсирование и торможение двигателя	141
8.8. Анализ работы электродвигателя	144
8.9. Пуск в ход двигателя постоянного тока	148
8.10. Схема подключения двигателей постоянного тока к сети	149
8.11. Исполнительные двигатели постоянного тока	150
8.12. Тахогенераторы постоянного тока	151
8.13. Высокочастотные двигатели постоянного тока	151
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ	152
9. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ	154
9.1. Образование вращающегося магнитного поля	154
9.2. Устройство асинхронного двигателя	158
9.3. Принцип действия асинхронного двигателя	160
9.4. Электромеханическая и механическая характеристики асинхронного двигателя	161
9.5. Номинальные параметры	164
9.6. Регулирование скорости вращения двигателя	166
9.7. Пуск в ход асинхронного двигателя	167
9.8. Тормозные режимы асинхронного двигателя	168
9.9. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели	169
9.10. Включение трехфазного асинхронного двигателя в однофазную цепь	173
9.11. Сельсины	173
9.12. Поворотные (вращающиеся) трансформаторы	176
9.13. Асинхронный тахогенератор	178
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ	180
10. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ	182
10.1. Устройство синхронных машин	182
10.2. Работа синхронной машины в режиме генератора	183
10.3. Работа синхронной машины в режиме двигателя	184
10.4. Работа синхронной машины параллельно с сетью	185
10.5. Пуск в ход синхронного двигателя	187
10.6. Синхронные машины малой мощности	188
ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	196
ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ	218
Курсовая работа по дисциплине «Электротехника, электрические машины и аппараты»	242
УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ И БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ	258
РЕЙТИНГОВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ	262
ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА	263

ВВЕДЕНИЕ

Электротехника включает в себя широкий круг вопросов, связанных с практическим применением электрической энергии во всех областях человеческой деятельности.

Инженеру любой специальности необходимы конкретные знания по электрическому оборудованию, приборам, электрическим машинам, аппаратам, их устройству, принципу действия, назначению и области применения.

К сожалению, существующие в настоящее время учебники и учебные пособия перегружены теоретическим материалом, математическими доказательствами, формулами, что необходимо только для инженеров электротехнических специальностей.

Настоящий учебно-методический комплекс (УМК) является попыткой приблизить дисциплину «Электротехника, электрические машины и аппараты» к вопросам практической работы инженеров машиностроительных специальностей.

Сведен к минимуму материал по расчету цепей, но дано несколько важных с практической точки зрения примеров анализа этих цепей. Сокращен теоретический материал по трансформаторам и электрическим машинам, но большее внимание уделено важному разделу «Электрические аппараты и схемы максимальной токовой защиты», микромашинам, которые используются во вспомогательных электроприводах металлорежущих станков и в качестве датчиков обратных связей автоматизированных электроприводов.

Разработанные задачи для практических занятий и защиты лабораторных работ многовариантны, что позволяет эффективно и качественно организовать учебный процесс, включая контроль знаний студентов.

Задание по курсовой работе требует творческого подхода к решению конкретной практической задачи по разработке электрических схем металлорежущего станка.

Автор надеется, что данное УМК будет полезно для студентов не только машиностроительных, но и других специальностей, и будет благодарен за конструктивные критические замечания.

ЛЕКЦИОННЫЙ КУРС

1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ

1.1. Электрическое поле и его характеристики

Электротехника изучает вопросы, связанные с генерированием, передачей и потреблением электрической энергии. Электрическая энергия за единицу времени (электрическая мощность) равна произведению напряжения на ток. Напряжение является характеристикой электрического поля, а ток – магнитного поля.

Реально существует единое электромагнитное поле, которое имеет две составляющие – электрическое поле и магнитное поле. Если одна из составляющих отсутствует (напряжение или ток), передача электрической энергии невозможна.

Однако исторически сложилось так, что эти поля рассматривают отдельно. В ряде случаев одной из сторон электромагнитного поля можно пренебречь. В электроустановках напряжением до 1 кВ электрическое поле практически не проявляет себя, а в высоковольтных слаботочных установках часто можно пренебречь магнитным полем.

Основным свойством электрического поля является механическое воздействие на электрический заряд. Силовой характеристикой электрического поля является вектор напряженности E , измеряемой в вольтах на метр (В/м). Энергетической характеристикой электрического поля является потенциал ϕ , измеряемый в вольтах (В). Эти характеристики взаимосвязаны. Чем больше разность потенциалов (напряжение U) между двумя точками поля, тем больше напряженность поля в пространстве между этими точками.

Одним из реальных устройств, использующих электрическое поле, является конденсатор – в простейшем случае это две параллельно расположенные пластины площадью S , разделенные диэлектриком и отстоящие друг от друга на небольшом расстоянии d .

Если подключить источник постоянного тока напряжением U к этим пластинам, то между ними будет создаваться электрическое поле напряженностью

$$E = U/d .$$

При этом на пластинах создается разноименный заряд q , измеряемый в кулонах (Кл), тем больший, чем больше напряжение между пластинами.

Коэффициентом пропорциональности между этими величинами является емкость C , измеряемая в фарадах (Ф):

$$q = CU .$$

В свою очередь емкость

$$C = \epsilon S/d ,$$

где ϵ – диэлектрическая проницаемость среды, измеряемая в фарадах на метр (Ф/м).

Различные среды имеют различные значения диэлектрической проницаемости. Вакуум и воздух имеют $\epsilon = \epsilon_0 = 1/4\pi \cdot 9 \cdot 10^9$ Ф/м, трансформаторное масло – $2,2 \epsilon_0$, фарфор – $5,5 - 6 \epsilon_0$, слюда – $5,5 - 7,5 \epsilon_0$.

Силовое действие электрического поля на заряд используется для окраски в электрическом поле, в электронной технике, для электросепарации, для пылеулавливания и т.д.

1.2. Электрический ток

Электрический ток представляет собой движение электрических зарядов под действием электрического поля.

В проводящей среде электрическое поле вызывает ток проводимости, обусловленный движением свободных электронов, в диэлектрике – ток смещения, в жидких и газовых диэлектриках, в вакууме может создаваться ток переноса, представляющий собой движение заряженных частиц. В дальнейшем рассматривается только характерный для металла ток проводимости в электрической цепи.

Для количественной оценки величины тока ввели понятие силы электрического тока i , которая определяется скоростью переноса заряда dq через поперечное сечение проводника за время dt .

$$i = dq / dt . \quad (1.1)$$

Если за равные промежутки времени t переносятся одинаковые по величине заряды q , то ток I называется постоянным.

$$I = q/t . \quad (1.2)$$

В СИ единицей измерения тока является ампер (А), заряда q – кулон (Кл) или ампер-секунда (А·с).

Если воспользоваться упрощенной аналогией, то электрический ток можно сравнить с интенсивностью потока жидкости, т.е. количеством (массой) жидкости, проходящей через какой-либо трубопровод за единицу времени.

В общем случае электрический ток может изменяться во времени. На практике преимущественное распространение получил электрический ток, изменяющийся по синусоидальному закону. В дальнейшем, как принято на практике, вместо термина «сила электрического тока» будем использовать термин «электрический ток» или еще короче – «ток».

1.3. Напряжение

Ток возникает под действием электрического поля. Одной из характеристик электрического поля является потенциал. В электрической цепи ток возникает под действием разности потенциалов, которая называется напряжением. Напряжение создается различными источниками питания. Напряжение обозначается буквой u (постоянное напряжение – U) и измеряется в вольтах (В).

Если величину электрического тока можно представить величиной потока жидкости, то напряжение соответствует давлению, под действием которого течет эта жидкость.

1.4. Сопротивление

Если взять проводник длиной l , сечением S и создать разность потенциалов на его концах, то по нему будет протекать ток, тем больший, чем больше эта разность потенциалов, т.е. напряжение.

Коэффициент пропорциональности между током и напряжением называют электрическим сопротивлением r (в электрических цепях постоянного тока электрические величины – ток, напряжение, сопротивление и др. – принято обозначать большими буквами).

$$r = u/i. \quad (1.3)$$

Сопротивление однородных проводников определяется по формуле

$$R = \rho l/S, \quad (1.4)$$

где ρ – удельное сопротивление материала проводника – сопротивление проводника длиной 1 м и сечением 1 м².

Сопротивление измеряется в омах (Ом), удельное сопротивление – в омах на метр (Ом·м).

Часто на практике удельное сопротивление измеряется во внесистемной единице: $[\rho] = \text{Ом} \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$.

Например, для медного провода $\rho = 0,0175 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, для алюминиевого $\rho = 0,029 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$, для нихромового $\rho = 1 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$. Это удобно, т.к. сечение проводника измеряется в мм^2 , а его длина в м.

Величина, обратная электрическому сопротивлению, называется электрической проводимостью, которая измеряется в сименсах (См):

$$g = 1/r \quad \text{или} \quad G = 1/R.$$

При анализе электрических цепей проводимость используется реже, чем сопротивление.

1.5. Плотность электрического тока

Ток, текущий по проводнику, вызывает его нагрев. При этом путем теплопередачи нагревается изоляция вокруг этого проводника. Интенсивность нагрева зависит от плотности электрического тока, которая определяется отношением силы тока к площади поперечного сечения провода:

$$J = i/S. \quad (1.5)$$

При передаче электрической энергии от источника к потребителю возникает вопрос: какое сечение провода необходимо выбрать для этой цели? Естественно, стремятся выбрать провод как можно меньшего сечения. Но чем меньше сечение провода при данном токе, тем больше его температура и температура изоляции. Для каждой изоляции существует определенная температура, которую выдерживает эта изоляция длительное время, соответствующее сроку ее службы.

По нагревостойкости электроизоляционные материалы разделяются на классы: Y, A, E, B, F, H, C. Например, паспортный срок службы обеспечивает изоляция класса A, если ее нагревать до температуры не выше 105°C , E – 120°C , B – 130°C , F – 155°C , H – 180°C , C – более 180°C .

Установившаяся температура провода и его изоляции зависит не только от плотности тока, но и от коэффициента теплопередачи, т.е. от условий охлаждения.

Так, медные провода с резиновой изоляцией при их открытой прокладке допускают плотность тока $8 - 12 \text{ А/мм}^2$, причем меньшая плотность тока относится к проводам большего сечения, т.к. они находятся в худших условиях охлаждения. Оголенные провода допускают плотность тока до

20 А/мм². Для провода с плохими условиями охлаждения (катушки мало-мощных трансформаторов, обмотки реле, контакторов) следует выбирать плотность тока не более 2 – 3 А/мм². Напротив, спираль оголенной нихромовой проволоки в нагревательных устройствах (электрическая печь, утюг) допускает плотность тока 40 А/мм² и выше.

Таким образом, зная ток в нагрузке (приемнике), по допустимой плотности тока можно ориентировочно выбрать сечение провода или жил кабеля для питания этой нагрузки.

Для более точного определения сечения провода по нагреву пользуются приведенными в справочниках таблицами, составленными для различных сечений и марок проводов (кабелей) с указанием условий охлаждения.

1.6. Источники и приемники электроэнергии

Источники электроэнергии преобразуют механическую, тепловую, химическую и другие виды энергии в электрическую.

Наибольшее распространение получили индукционные источники электроэнергии. Независимо от принципа действия источники в общем случае обозначаются на электрических схемах кружком, который снабжается различными символами и надписями. На рис. 1.1, *а*, *б* и *в* показаны соответственно источники постоянного, переменного тока и химический источник (аккумулятор), который имеет другое обозначение.

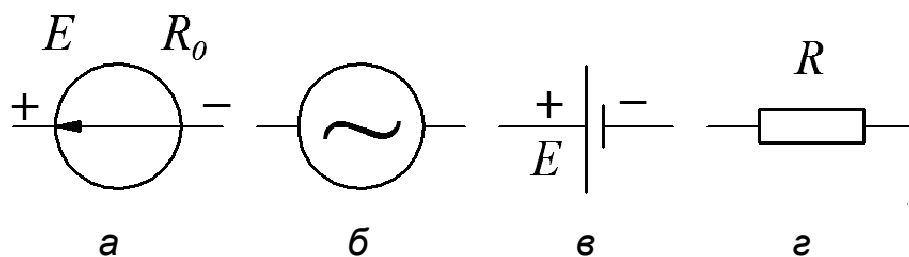


Рис. 1.1. Обозначение источников (*а*, *б* и *в*) и приемников (*г*) электроэнергии

Основной характеристикой источников и приемников электроэнергии является номинальная мощность. Номинальная мощность источника (генератора) означает, что, работая при указанной или меньшей мощности, генератор не будет перегреваться, что гарантирует указанный в паспорте срок его службы. При значительной перегрузке может не только сгореть изоляция генератора, но и сама обмотка. Однако большинство генерато-

ров, особенно если они эксплуатируются в режиме недогрузки, «безболезненно» выдерживают некоторую кратковременную перегрузку.

Другой характеристикой генератора и приемника является номинальное напряжение. Напряжение на зажимах генератора зависит от нагрузки, и с увеличением тока, отдаваемого генератором во внешнюю цепь, напряжение падает. Зависимость напряжения на зажимах генератора от нагрузки называется внешней характеристикой (рис. 1.2).

Если внешняя нагрузка отключена (режим холостого хода), то напряжение генератора максимальное, и оно равно ЭДС источника. Таким образом, ЭДС – это напряжение на зажимах источника в режиме холостого хода.

Подробнее о режимах работы генератора – в разделе 2.

При анализе работы электрической цепи удобно пользоваться расчетными параметрами: ЭДС и внутренним сопротивлением R_0 источника. Внутреннее сопротивление определяется таким образом, чтобы падение напряжения на нем в номинальном режиме было равно разности между ЭДС и номинальным напряжением: $R_0 = (E - U_H) / I_H$.

Приемники электроэнергии преобразуют электрическую энергию в другие виды энергии (тепловую, механическую, световую). Расчетным параметром приемника, удобным для анализа электрических цепей, является его сопротивление. Сопротивление приемника постоянному току можно определить по номинальным параметрам:

$$R = \frac{U_H}{I_H} = \frac{U_H U_H}{I_H U_H} = \frac{U_H^2}{P_H}.$$

На электрических схемах такой приемник обозначают прямоугольником (см. рис. 1.1, з).

В общем случае величина сопротивления приемника может изменяться в зависимости от его режима работы. Например, при увеличении тока в лампе накаливания ее сопротивление увеличивается. Сопротивление отключенной от источника тока лампы накаливания в несколько раз меньше сопротивления лампы, включенной на номинальное напряжение. Это объясняется тем, что с увеличением тока увеличивается температура нити накаливания, и ее сопротивление возрастает. Поэтому связь между током и

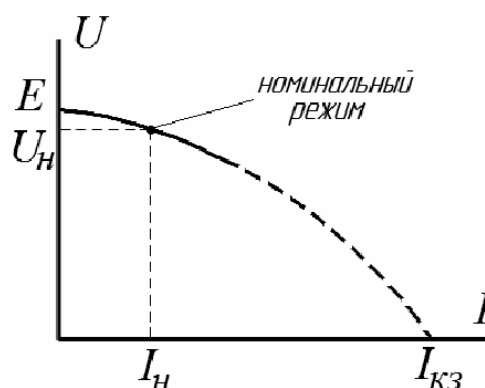


Рис. 1.2. Внешняя характеристика генератора

напряжением в таком приемнике является нелинейной. Однако для качественного анализа электрической цепи во многих случаях вольт-амперная характеристика приемника может считаться линейной.

На практике кроме термина «приемник электрической энергии» пользуются термином «нагрузка», подразумевая при этом или устройство, или величину тока.

1.7. Элементы электрической цепи

Электрической цепью называется устройство, состоящее из источников и приемников электроэнергии и соединяющих их проводов. На рис. 1.3 показана электрическая цепь, состоящая из двух источников и шести приемников электроэнергии. Соединительные провода не имеют электрического сопротивления. В том случае, если требуется учесть сопротивление проводов, их показывают на схеме в виде прямоугольников, как и нагрузку.

Рассмотрим некоторые понятия и определения, относящиеся к электрическим цепям.

Контур – замкнутый путь для электрического тока. На рис. 1.3 таких контуров шесть. Например, $abdca$, $abfgdca$ и др.

Ветвь – неразветвленная часть электрической цепи. На рис. 1.3 цепь имеет четыре ветви. Элементы, находящиеся в одной ветви, включены последовательно, и по ним протекает один и тот же ток. Например, в ветви $dgfb$ ток I_2 протекает и в нагрузке r_5 , и в источнике E_2 , и в нагрузке r_4 . Сопротивления r_5 и r_4 , а также сопротивления r_1 и r_2 включены последовательно.

Узел – точка, в которой сходятся не менее трех ветвей. Таких точек в схеме на рис. 1.3 две (b и d).

Точкой в электрической цепи называют участок, соединенный не имеющими сопротивления проводами. Внутри участка не должно быть никаких электрических элементов. Точка a – участок между плюсовой клеммой источника E и сопротивлением r_1 . Точка b одновременно является узлом и соединяет приемники с сопротивлениями r_1, r_3, r_4, r_6 .

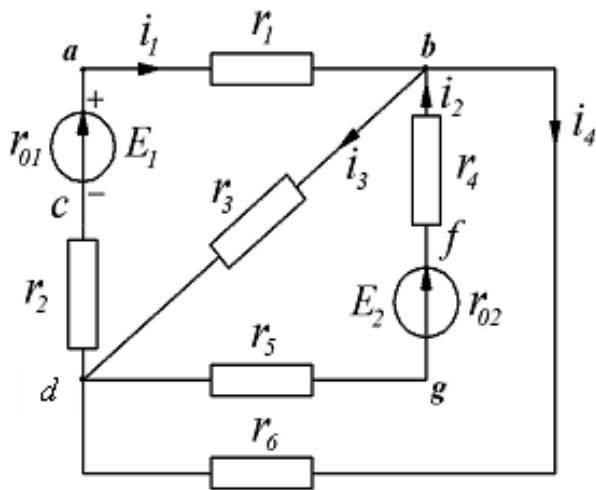


Рис. 1.3. Электрическая цепь

Источники или приемники электрической цепи, имеющие две общие точки (узла), включены параллельно и находятся под одинаковым напряжением. Сопротивления r_3 , r_6 включены параллельно, т.к. имеют два общих узла – b и d . Сопротивления r_5 , r_6 , хотя и изображены параллельно, но имеют только один общий узел d .

Потенциал. Под потенциалом точки понимают напряжение между этой точкой и точкой, потенциал которой принимают равным нулю. Следовательно, потенциал точки – понятие относительное. Потенциал одной и той же точки может принимать различные значения, в зависимости от того, потенциал какой точки принят равным нулю. Обычно за нулевой потенциал принимают потенциал заземленной точки или точки, соединенной с корпусом какой-либо схемы или электротехнического устройства.

1.8. Законы электрической цепи

Для анализа электрической цепи пользуются законом Ома и законами Кирхгофа.

Закон Ома относится к участку цепи, на котором нет источников электроэнергии. Такие участки называют пассивными. Ток пассивного участка определяется отношением напряжения на этом участке к величине его сопротивления:

$$i = u / r.$$

Например, для цепи постоянного тока (см. рис. 1.3)

$$\begin{aligned} i_4 &= u_{bd} / r_6; \\ i_2 &= u_{dg} / r_5 \text{ или } i_2 = u_{fb} / r_4. \end{aligned}$$

Ток пассивного участка течет от точки более высокого потенциала к точке низшего потенциала. Это следует из понятия напряжения как разности потенциалов: $i_2 = (\varphi_d - \varphi_g) / r_5$. Если $\varphi_d > \varphi_g$, то ток положительный и направлен от точки a к точке g .

Первый закон Кирхгофа относится к узловым точкам. **Алгебраическая сумма токов ветвей, образующих узел, равна нулю: $\sum i = 0$.** Причем знак «плюс» приписывается току, входящему в узел, знак «минус» – выходящему из узла. Например, $i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0$ (см. рис 1.3, узел b).

Второй закон Кирхгофа относится к любому контуру. **Алгебраическая сумма ЭДС, действующих в контуре, равна алгебраической сумме падений напряжения на пассивных элементах этого контура, включая и внутреннее сопротивление источника: $\sum E = \sum ri$.** Знак «плюс» при-

сваивается ЭДС, совпадающей по направлению с обходом контура, знак «минус» приписывается падению напряжения, если направление тока не совпадает с направлением обхода.

Например, для контура $abfgdca$, выбрав направление обхода по часовой стрелке (см. рис 1.3), второй закон Кирхгофа запишем так:

$$E_1 - E_2 = r_1 i_1 - r_4 i_2 - r_{02} i_2 - r_5 i_2 + r_2 i_1 + r_{01} i_1.$$

1.9. Основные характеристики магнитного поля

В пространстве вокруг тока образуется магнитное поле. Магнитное поле является особым видом материи, которая не обнаруживается нашими органами чувств. Но магнитное поле оказывает силовое воздействие на электрический ток и на постоянный магнит.

Для количественной оценки величины магнитного поля ввели понятие магнитной индукции B , которая измеряется в тесла (Т). Индукция является силовой характеристикой поля, т.е. чем больше индукция, тем больше сила, действующая на постоянный магнит, помещенный в данную точку поля.

При расчетах часто пользуются понятием напряженности магнитного поля H , которая измеряется в амперах на метр (А/м). Напряженность магнитного поля является расчетной величиной, она не имеет физического смысла и в изотропных средах пропорциональна магнитной индукции.

$$B = \mu_a H, \quad (1.6)$$

где абсолютная магнитная проницаемость среды $\mu_a = \mu \mu_0$ измеряется в генри на метр (Г/м), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Г/м – абсолютная магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная), μ – относительная магнитная проницаемость среды, величина безразмерная.

У большинства материалов (воздух, медь, алюминий, стекло, пластмасса) $\mu \approx 1$. У ферромагнитных материалов, содержащих железо, никель, кобальт, относительная магнитная проницаемость может достигать сотен тысяч.

Индукция и напряженность магнитного поля – величины векторные. Для графического изображения магнитного поля пользуются так называемыми магнитными силовыми линиями. Это такая замкнутая линия, в каждой точке которой вектор магнитной индукции совпадает с касательной к

этой линии. Например, магнитные силовые линии бесконечно длинного прямого проводника с током представляют собой окружности, плоскости которых перпендикулярны к току (рис 1.4, а). Направление тока обозначено крестиком.

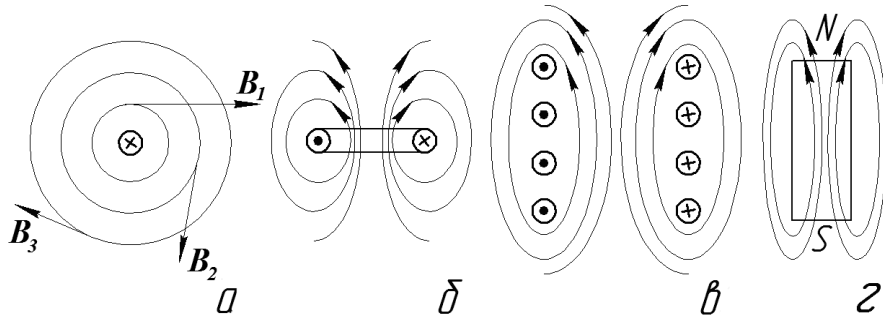


Рис. 1.4. Магнитные силовые линии: а) – прямого тока; б) – кольцевого тока; в) – катушки с током; г) – постоянного магнита

Направление вектора магнитной индукции определяется правилом правого винта. Для кольцевого тока вектор индукции совпадает с направлением линейного перемещения винта, если его вращать по направлению тока. На рис 1.4 показана картина магнитного поля для различных токов и постоянного магнита. Внутри катушки (см. рис 1.4, в) поле практически однородно.

Кроме B и H ввели понятие магнитного потока Φ , который измеряется в веберах (Вб). Если магнитное поле однородно, т.е. в каждой точке пространства индукции равны по величине и направлению, то магнитный поток сквозь площадку S , ориентированную перпендикулярно к векторам магнитной индукции B , определяется произведением BS :

$$\Phi = BS. \quad (1.7)$$

Существует еще одно понятие – потокосцепление. Если магнитный поток пронизывает катушку с числом витков w , т.е. сцепляется с током w раз, то потокосцепление

$$\Psi = w\Phi. \quad (1.8)$$

Потокосцепление также измеряется в веберах.

С увеличением тока в контуре пропорционально растет и поток сквозь этот контур. Коэффициент пропорциональности между током в контуре и потокосцеплением называется индуктивностью контура.

$$\Psi = LI. \quad (1.9)$$

Индуктивность L измеряется в генри (Г).

1.10. Закон полного тока

Если в магнитном поле взять произвольную, но замкнутую линию l , то сумма скалярного произведения вектора напряженности поля на элементарную длину dl вдоль всей замкнутой линии будет равна полному току, сцепленному с данной линией:

$$\oint_l \vec{H} dl = I_{\text{п}}. \quad (1.10)$$

Если выбрать такой контур l , в любой точке которого напряженности поля равны по величине и направлены вдоль dl , то закон полного тока запишется проще:

$$Hl = I_{\text{п}},$$

где l – длина замкнутой линии.

Если на тороид сечением S равномерно по всей длине намотать катушку с числом витков w и пропустить через нее ток I , то внутри этого тороида магнитное поле будет однородным как в прямой длинной катушке (см. рис 1.4, в), свернутой в кольцо.

Магнитные силовые линии этого поля будут представлять собой концентрические окружности с центром в точке O (рис. 1.5).

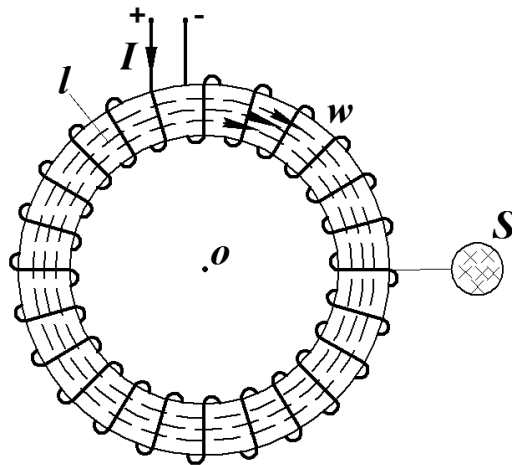


Рис. 1.5. Магнитное поля тороида

Если взять замкнутую линию l , совпадающую со средней магнитной силовой линией, то в любой точке этой линии напряженности поля будут равны и касательны к этой линии из-за симметрии этого поля. По закону полного тока $Hl = wI$, где wI – полный ток, сцепленный с данным контуром. Используя формулы (1.6) и (1.7), магнитный поток сквозь сечение S запишем

$$\Phi = BS = \mu_0 \mu HS = \mu_0 \mu \frac{wI}{e} S = \frac{wI}{\frac{1}{\mu_0 \mu} \frac{1}{S}}, \quad (1.11)$$

т.е. закон полного тока позволил рассчитать магнитное поле тороида.

1.11. Закон Ома для магнитной цепи

Тороид (см. рис 1.5) можно считать магнитопроводом, по которому проходит магнитный поток Φ . Если обозначить $F_M = wI$, а $R_M = l / \mu \mu_0 S$, то выражение (1.11) можно записать:

$$\Phi = F_M / R_M. \quad (1.12)$$

Формула (1.12) является аналогом закона Ома для магнитной цепи (сравнить $I = E / R$, где R – электрическое сопротивление всей цепи).

Магнитодвижущая сила (мдс) измеряется в амперах (А), а магнитное сопротивление R_M – в 1/генри (Γ^{-1}). Магнитное сопротивление пропорционально длине магнитопровода и обратно пропорционально его сечению. Произведение $\mu \mu_0$ играет роль удельной магнитной проводимости. Чем больше относительная магнитная проницаемость среды, тем меньше магнитное сопротивление, тем больший создается магнитный поток. Если магнитопровод состоит из нескольких последовательных участков, то общее магнитное сопротивление будет равно сумме сопротивлений отдельных участков: $R_M = R_{M1} + R_{M2} + \dots$

Чтобы создать большой магнитный поток, в качестве магнитопровода используют ферромагнитные материалы, имеющие высокую относительную магнитную проницаемость (т.е. небольшое магнитное сопротивление), которые и образуют магнитную цепь. **Магнитной цепью** называется совокупность тел, большей частью ферромагнитных, служащих для проведения магнитного потока. Для магнитных цепей существует не только аналог закона Ома, но и аналоги законов Кирхгофа.

1.12. Принцип работы электромагнитных устройств

Как известно, на ток, находящийся в магнитном поле, воздействует сила, которая стремится изменить положение тока (рис. 1.6). Элементарная работа сил поля по перемещению проводника с током в магнитном поле

$$dA = Id\psi,$$

где $d\psi$ – приращение потокосцепления сквозь данный контур.

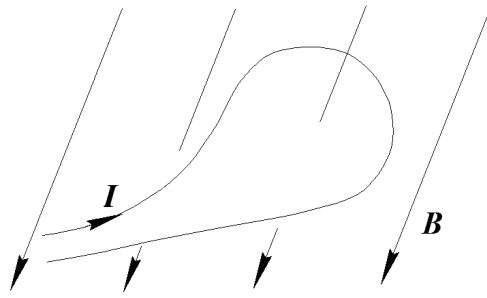


Рис. 1.6. Проводник с током в магнитном поле

Так как работа сил поля положительная, то $d\psi > 0$, т.е. конечное потокосцепление при совершении работы должно быть больше начального. Это означает, что контур с током стремится разместиться таким образом, чтобы увеличить потокосцепление сквозь этот контур. На основании этого можно сделать важный практический вывод.

Любая электромагнитная система, связанная с источником энергии, стремится расположиться так, чтобы увеличить энергию магнитного поля.

Энергия магнитного поля, естественно, будет тем больше, чем больший магнитный поток будет создаваться этой системой.

Поэтому контур с током будет стремиться увеличить магнитный поток за счет увеличения площади ($\Phi = BS$), т.е. контур с током будет стремиться принять форму окружности.

Два постоянных магнита будут притягиваться разноименными полюсами, т.к. в этом случае их потоки будут складываться и увеличиваться.

Катушка с током будет притягивать ферромагнитные материалы, которые будут стремиться втянуться внутрь катушки, где индукция магнитного поля наибольшая. Если предположить, что железные предметы будут удаляться от катушки с током, то это будет связано с увеличением магнитного сопротивления и ослаблением потока сквозь контур, что противоречит принципу работы электромагнитных устройств.

По этой же причине железные предметы прилипают к электромагниту. Действительно, магнитная цепь электромагнита состоит из двух участков: стального (ферромагнитного) и воздушного. Общее сопротивление магнитопровода равно сумме сопротивлений этих участков. Но магнитное сопротивление воздуха на несколько порядков выше сопротивления стали, поэтому система за счет заполнения ферромагнитными материалами воздушного участка уменьшает общее сопротивление и тем самым увеличивает магнитный поток.

Если катушка с током будет охвачена замкнутым ферромагнитным материалом, то магнитное поле этой катушки будет стремиться замкнуться по этому стальному магнитопроводу, где магнитное сопротивление небольшое, что позволит усилить магнитное поле.

Это свойство магнитного потока можно сформулировать шутливым правилом: магнитный поток не дурак – он замыкается по пути наименьшего сопротивления. Вот почему магнитная цепь электромагнитных устройств, аппаратов, приборов и электрических машин состоит в основном из ферромагнитных материалов. Воздушный зазор используется в качестве магнитопровода в крайнем случае, где он технологически необходим (электромагнитное реле, электрические машины, приборы магнитоэлектрической и электромагнитной системы и др.). Общий принцип работы электромагнитных систем, связанных с источником электроэнергии, объясняет принцип работы не только ранее упоминавшихся электромагнитов, но и электромагнитных аппаратов – реле, контакторов, герконовых реле, электромагнитных муфт, электроизмерительных приборов магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической систем, электрических машин постоянного тока, синхронных электродвигателей, в том числе синхронных реактивных и шаговых двигателей, электробытовых приборов (электробрита, электролобзик) и множества других устройств.

1.13. Закон Ампера. Электромагнитная сила

Как было сказано выше, основным свойством магнитного поля является его силовое действие на ток и постоянный магнит. Сила, действующая на проводник с током I длиной l , находящийся в однородном магнитном поле с индукцией B , вектор которой перпендикулярен к проводнику,

$$F = lBI. \quad (1.13)$$

Направление силы определяется правилом левой руки (рис 1.7, а). Ладонь располагается перпендикулярно к вектору магнитной индукции, четыре пальца ориентируются вдоль направления тока, тогда большой отогнутый палец покажет направление силы.

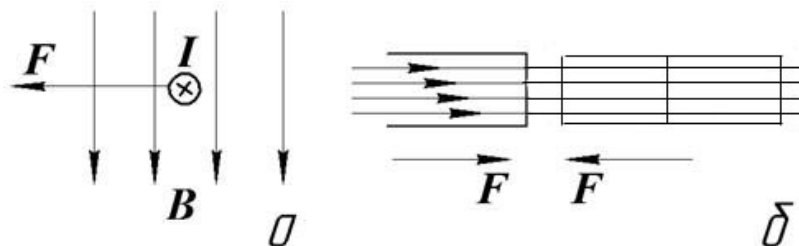


Рис. 1.7. Определение направления электромагнитной силы

Электромагнитные силы проявляются в магнитопроводе в соответствии с общим принципом работы электромагнитных устройств, стремясь уменьшить магнитное сопротивление за счет увеличения сечения магнитопровода, сокращения его длины или за счет увеличения магнитной проницаемости среды, втягивая в область наибольшего поля ферромагнитные предметы. Если бы замкнутый магнитопровод был эластичным, он раздувался бы в сечении и одновременно пытался свернуться в кольцо наименьшей длины.

Если в магнитопроводе имеется воздушный зазор (см. рис 1.7, б), то система, стремясь увеличить магнитный поток, будет стараться исключить воздушный зазор, и две части магнитопровода будут притягиваться друг к другу с силой

$$F = B_0^2 S / 2\mu_0, \quad (1.14)$$

где B_0 – индукция магнитного поля в воздушном зазоре, S – площадь сечения магнитопровода.

Формула (1.14) может быть использована для расчета подъемной силы электромагнита.

1.14. Закон электромагнитной индукции

Закон электромагнитной индукции в формулировке Фарадея говорит о том, что в проводнике, движущемся в магнитном поле, возникает электродвижущая сила. В прямом проводнике длиной l , движущемся со скоростью v в однородном магнитном поле с индукцией B , если три направления взаимно перпендикулярны, электродвижущая сила

$$e = lBv. \quad (1.15)$$

Направление ЭДС определяется правилом правой руки: ладонь располагается перпендикулярно навстречу вектору магнитной индукции, большой отогнутый палец должен быть направлен по вектору скорости движения проводника относительно поля, а четыре вытянутых пальца в этом случае будут показывать направление ЭДС (ЭДС направлена от минуса к плюсу).

В формулировке Максвелла ЭДС в замкнутом контуре возникает при всяком изменении магнитного потока сквозь этот контур.

$$e = -\frac{d\psi}{dt}. \quad (1.16)$$

Здесь $d\psi$ – приращение потокосцепления сквозь замкнутый контур за бесконечно малое время dt .

Знак «минус» в формуле означает, что ЭДС имеет такое направление, которое препятствует причине, ее вызывающей. Иначе говоря, индукционная ЭДС будет создавать ток, который в свою очередь создает свой магнитный поток, который направлен навстречу внешнему магнитному потоку, если он возрастает ($d\psi > 0$), и совпадает с внешним магнитным потоком, если он ослабевает ($d\psi < 0$), т.е. стремится поддержать уменьшающийся магнитный поток.

На рис. 1.8 замкнутый контур находится в магнитном поле постоянного магнита. Если магнитный поток сквозь контур не изменяется, то ЭДС не образуется (см. рис 1.8, а). При увеличении потокосцепления сквозь контур, когда магнит приближается к нему (см. рис 1.8, б), возникает ЭДС такого направления, при котором индуктированный ток создает магнитный поток, направленный навстречу внешнему магнитному потоку (на рисунке магнитный поток, образованный током, показан пунктиром). При удалении постоянного магнита (см. рис 1.8, в) ЭДС меняет свое направление.

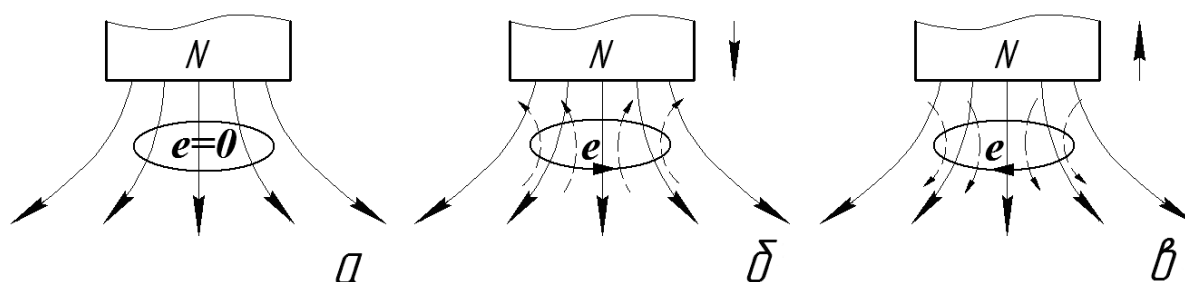


Рис 1.8. Возникновение ЭДС в замкнутом контуре:

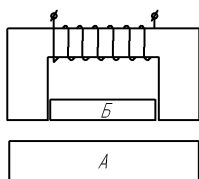
- а) – контур и постоянный магнит неподвижны; б) – магнит приближается к контуру;
- в) – магнит удаляется от контура

Итак, всякое изменение магнитного потока сквозь замкнутый проводящий контур вызывает образование ЭДС независимо от причины изменения потокосцепления. Изменение потокосцепления может быть вызвано или относительным движением контура и внешнего магнитного поля, или изменением тока в контуре за счет источника переменного тока, включенного в цепь контура (в этом случае индукционная ЭДС называется ЭДС самоиндукции), или изменением тока в цепи, расположенной вблизи контура. В этом случае образуется ЭДС взаимной индукции. Примером взаимной индукции может служить образование ЭДС во вторичной обмотке трансформатора, расположенного в поле тока первичной обмотки, которая подключена к источнику переменного тока.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Катушка с током охватывает стальной замкнутый магнитопровод. Как изменится магнитный поток электромагнита, если в его магнитопроводе выпилить воздушный зазор, а ток в катушке оставить неизменным?

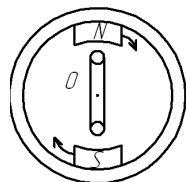
2. Как изменится индуктивность катушки, если внутрь нее поместить стальной сердечник?



3. Как изменится сила, действующая на якорь А электромагнита, если между полюсами вставить ферромагнитный брус Б (см. рис.)?

4. Почему сила притяжения якоря к сердечнику в электромагнитном реле в притянутом положении якоря значительно больше, чем в исходном?

5. Почему предотвращается залипание якоря к сердечнику электромагнитного реле, если между якорем и сердечником поместить немагнитную прокладку?



6. Будет ли изменять положение ферромагнитный сердечник, если медленно вращать внешний магнитопровод вокруг оси О, перпендикулярной к плоскости рисунка (см. рис.)?

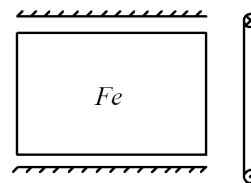
7. Будет ли изменять конфигурацию контур с током, находящийся на очень скользкой поверхности стола?

8. Почему при коротком замыкании в цепи вторичной обмотки трансформатора могут разорваться его обмотки?

9. Как ведет себя герметизированный разомкнутый контакт (геркон), если к нему поднести постоянный магнит?

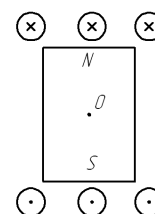
Герметизированный контакт выполнен из магнитопроводящего материала.

10. В каком положении будет находиться ферромагнитный сердечник, помещенный вблизи рамки с током, если он имеет возможность перемещаться горизонтально (см. рис.)?



Как изменится положение сердечника, если изменить направление тока в рамке?

11. Какое положение займет постоянный магнит, находящийся внутри неподвижной катушки с током и имеющий возможность поворачиваться вокруг оси O , перпендикулярной к плоскости рисунка (см. рис.)?



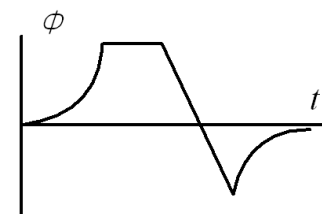
А если постоянный магнит заменить ферромагнетиком такой же формы?

12. В каком положении установится рамка с током в магнитном поле (см. рис.)?



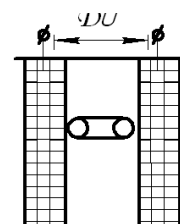
Рамка может вращаться вокруг оси O , перпендикулярной к плоскости рисунка.

13. Как будет изменяться ЭДС, возникающая в рамке, сквозь которую проходит магнитный поток, изменяющийся во времени так, как показано на рисунке?



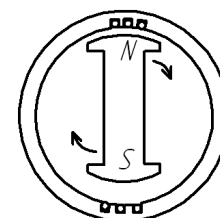
14. Будет ли возникать ток в рамке, находящейся внутри соленоида, если его включить в сеть:

- а) постоянного тока;
- б) переменного синусоидального тока (см. рис.).



15. Почему образуется ЭДС в замкнутой обмотке, расположенной на внутренней поверхности цилиндрического магнитопровода?

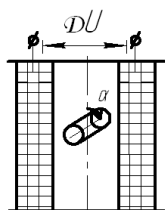
Определить направление тока в обмотке, если повернуть постоянный магнит по часовой стрелке (см. рис.).



16. Будет ли изменяться величина ЭДС, возникающей в контуре, который вращается в однородном магнитном поле вокруг оси, перпендикулярной к вектору магнитной индукции, в зависимости от частоты вращения?

17. Будет ли возникать ток в обмотке, если сквозь обмотку проходит магнитный поток:

- а) от неподвижного постоянного магнита;
- б) от приближающегося постоянного магнита;
- в) от удаляющегося постоянного магнита.

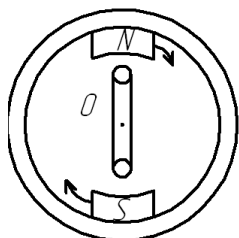


18. Какие электромагнитные процессы имеют место в рамке и что будет изменяться в зависимости от угла α , определяющего положение рамки, находящейся внутри соленоида, который включен в сеть переменного синусоидального тока (см. рис.)?

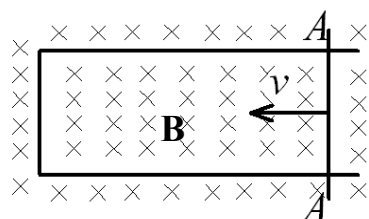
19. Почему при отключении электрической цепи в месте разрыва, т.е. на размыкающих контактах возникает электрическая искра или даже дуга?

20. Для какой цели при транспортировке приборов магнитоэлектрической системы их клеммы закорачивают? Прибор представляет собой рамку (катушку), которая находится в поле постоянного магнита.

21. Для какой цели и каким образом устанавливается короткозамкнутый виток в электромагнитах переменного тока?



22. Будет ли создаваться вращающий момент, действующий на рамку, если внешний магнитопровод вращать или поворачивать, например, по часовой стрелке (см. рис.)?



23. Какие электромагнитные процессы имеют место в замкнутом контуре, находящемся в однородном магнитном поле с индукцией B , если проводник AA перемещать влево по рельсам?

Будет ли проходить ток по рельсам? Будет ли возникать электромагнитная сила (см. рис.)?

24. Какие электромагнитные процессы будут возникать в замкнутом контуре, образованном П-образным неподвижным проводником и свободно лежащей на нем перемычкой AA (см. рис. к задаче 23), если включить источник, который создавал бы ток в контуре, направленный против часовой стрелки? Показать электромагнитные силы, действующие на стороны прямоугольного контура.

2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Расчет по законам Кирхгофа

Расчет электрического состояния цепей постоянного тока, как правило, сводится к определению токов в ветвях при известных ЭДС источников и сопротивлений нагрузки. Для определения токов в ветвях электрической цепи составляют по законам Кирхгофа столько уравнений, сколько в цепи неизвестных токов, то есть сколько ветвей в электрической цепи. Причем по первому закону Кирхгофа составляют столько уравнений, сколько в цепи узлов без одного. Остальные уравнения составляют по второму закону Кирхгофа.

Для цепи, изображенной на рис. 1.3 (см. выше), для определения токов в четырех ветвях составим 4 уравнения.

Узел b

$$i_1 + i_2 - i_3 - i_4 = 0. \quad (2.1)$$

Контур abdca

$$E_1 = (r_2 + r_{01} + r_1)i_1 + r_3i_3. \quad (2.2)$$

Контур abfgdca

$$E_1 - E_2 = (r_2 + r_{01} + r_1)i_1 - (r_4 + r_{02} + r_5)i_2. \quad (2.3)$$

Контур bdgfb

$$E_2 = (r_5 + r_{02} + r_4)i_2 + r_6i_4. \quad (2.4)$$

Решая систему 4-х уравнений с 4-мя неизвестными, определяют токи во всех ветвях. Если ток получился со знаком «минус», значит, выбранное направление тока противоположно действительному.

Для проверки расчета составляют баланс мощности. Алгебраическая сумма мощностей источников должна быть равна арифметической сумме мощностей приемников, включая и потерю мощностей в самих источниках:

$$\sum EI = \sum rI^2.$$

Если направление тока в источнике противоположно направлению ЭДС, то отрицательная мощность свидетельствует о том, что данный источник работает не в режиме генератора, а в режиме приемника.

Метод является универсальным и позволяет рассчитать любые электрические цепи. На практике рассматриваются более простые цепи.

В качестве примера рассмотрим простейшую цепь, состоящую из одного источника и одного приемника электроэнергии, сопротивление которого меняется в широких пределах.

2.2. Работа источника на переменную нагрузку

Проанализируем работу простой одноконтурной цепи, состоящей из источника с ЭДС E и внутренним сопротивлением R_0 и нагрузки, сопротивление которой может изменяться в широких пределах от бесконечности до нуля (рис. 2.1, *a*).

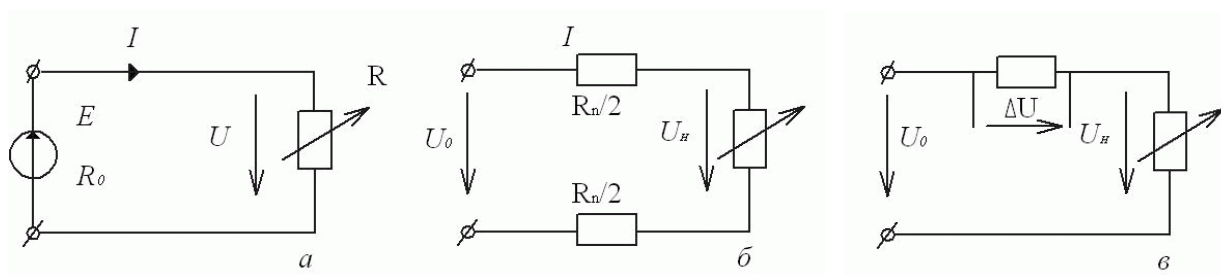


Рис. 2.1. Электрическая цепь (*a*) и ее схемы замещения (*б*, *в*)

Ток во внешней цепи течет от точки высокого потенциала («плюсовая» клемма). Внутри источника, наоборот, ток течет от «минуса» к «плюсу».

По первому закону Кирхгофа $E = R_0 I + RI$, откуда ток в цепи

$$I = \frac{E}{R_0 + R}.$$

С изменением сопротивления R от бесконечности до нуля ток в цепи будет изменяться от нуля $I_{xx} = \frac{E}{R_0 + \infty} = 0$ (режим холостого хода) до мак-

симального значения, которое может быть получено от данного источника

(режим короткого замыкания) $I_{кз} = \frac{E}{R_0 + 0} = \frac{E}{R_0}$.

В дальнейшем ток примем за независимую переменную и определим, как будут изменяться напряжение на зажимах источника U , потеря напряжения внутри источника ΔU , мощность, развиваемая приемником, $-P$, источником $-P_1$, потеря мощности внутри источника ΔP и коэффициент полезного действия η в зависимости от нагрузки. Графики этих величин показаны на рис. 2.2.

Напряжение на зажимах источника, равное напряжению на приемнике, $U = RI = E - R_0 I$ линейно зависит от нагрузки, график может быть по-

строен по двум точкам, соответствующим, например, режимам холостого хода и короткого замыкания $U_{xx} = E - R_0 \cdot 0 = E$, $U_{кз} = E - R_0 \frac{E}{R_0} = 0$. С ростом нагрузки напряжение на зажимах источника падает. Для генераторов зависимость $U = f(I)$ называется внешней характеристикой. Падающий характер внешней нагрузки характерен для источников и постоянного, и переменного тока.

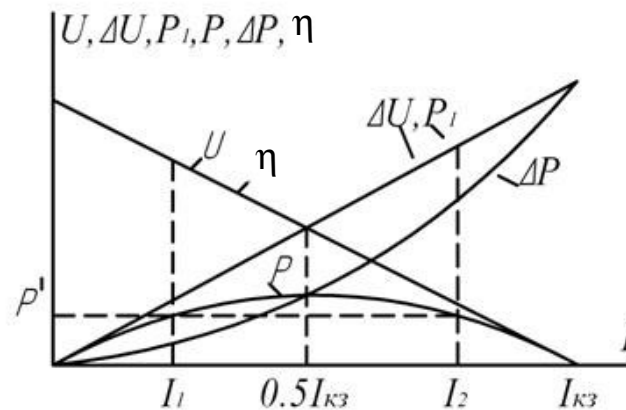


Рис. 2.2. Графики изменения величин

Наклон внешней характеристики зависит от величины внутреннего сопротивления источника R_0 .

Если напряжение на зажимах источника незначительно изменяется с ростом нагрузки, то такая характеристика является «жесткой», а внутреннее сопротивление источника небольшое.

Для абсолютно жесткой характеристики напряжение не зависит от нагрузки, т.к. при этом внутреннее сопротивление источника равно нулю. Идеальный источник, у которого внешняя характеристика параллельна оси абсцисс, называется источником бесконечно большой мощности.

Падение напряжения на нагрузке $\Delta U = R_0 I$ также линейно зависит от нагрузки, но имеет возрастающий характер.

$$\Delta U_{xx} = R_0 \cdot 0 = 0; \quad \Delta U_{кз} = R_0 \frac{E}{R_0} = E.$$

Мощность, развиваемая источником, $P_1 = EI$ с ростом нагрузки линейно возрастает, и в каком-то масштабе P_1 и ΔU будут изображены одной и той же прямой.

$$\Delta P_{1\text{ }xx} = EI_{xx} = 0; \quad \Delta P_{1\text{ }кз} = EI_{кз} = E \frac{E}{R_0} = \frac{E^2}{R_0}.$$

Мощность, теряемая внутри источника, $\Delta P = \Delta UI = R_0 I^2$ имеет параболический характер и резко возрастает с увеличением нагрузки.

$$\Delta P_{xx} = R_0 I_{xx}^2 = 0; \quad \Delta P_{кз} = R_0 I_{кз}^2 = R_0 \frac{E^2}{R_0^2} = \frac{E^2}{R_0}.$$

В режиме короткого замыкания вся мощность, развиваемая источником, теряется внутри источника, вызывая его перегрев. Этот режим опасен и для соединительных проводов.

Мощность нагрузки $P = UI = (E - \Delta U)I = P_1 - \Delta P = EI - R_0 I^2$. В крайних режимах $P_{xx} = EI_{xx} = 0$; $P_{кз} = EI_{кз} - R_0 I_{кз}^2 = \frac{E^2}{R_0} - \frac{E^2}{R_0} = 0$.

Следовательно, по теореме Ролля, если функция на концах интервала принимает равные значения, то она имеет максимум.

Определим ток, соответствующий максимальному значению мощности на нагрузке, для чего продифференцируем эту функцию по току $\frac{dP}{dI} = E - 2RI$. Максимум мощности соответствует равенству нулю ее про-

$$\text{изводной: } E - 2R_0 I_{P_{\max}} = 0; \quad I_{P_{\max}} = \frac{E}{2R_0} = \frac{1}{2} I_{кз}.$$

Ток, при котором мощность нагрузки максимальна, равен половине тока короткого замыкания.

Очевидно, это будет иметь место, когда сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника.

$R = R_0$ – условие передачи максимальной мощности для данного источника.

Коэффициент полезного действия передачи мощности от источника к нагрузке $\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E}$.

В каком-то масштабе график КПД повторяет внешнюю характеристику. В режиме холостого хода $\eta_{xx} = \frac{U_{xx}}{E} = \frac{E}{E} = 1$, в режиме короткого замыкания

$$\eta_{кз} = \frac{U_{кз}}{E} = \frac{0}{E} = 0. \quad \text{В режиме передачи максимальной мощности } \eta = 0,5.$$

Режим передачи максимальной мощности в силовых цепях не используется из-за его неэкономичности.

Однако в маломощных радиотехнических цепях, когда важно получить, например, максимальную мощность в радиоприемнике, очень важно равенство сопротивления громкоговорителя и внутреннего сопротивления питающего его усилителя. Как будет показано ниже, для этой цели в цепях переменного тока используются согласующие трансформаторы, с помощью которых можно искусственно увеличить низкоомное сопротивление громкоговорителя.

Выводы, сделанные для схемы работы источника на переменную нагрузку, можно целиком перенести на теорию линии передачи, если считать сопротивление линии электропередачи прямого и обратного провода равным внутреннему сопротивлению источника, а напряжение в начале линии U_0 – ЭДС источника (см. рис. 2.1, б, в).

На рис. 2.1, в показана расчетная схема, полностью совпадающая с расчетной схемой на рис. 2.1, а.

Потери в линии электропередачи (ЛЭП) обычно задаются в пределах 2 – 10 % от мощности нагрузки так называемым коэффициентом потерь

$$K = \frac{\Delta P}{P_H}.$$

Определим сечение S проводов ЛЭП, если известно напряжение на нагрузке U_H , мощность нагрузки P_H , коэффициент потерь K и расстояние от генератора до потребителя l .

$$\text{Потери мощности } \Delta P = R_{\text{Л}} I_H^2 = \rho \frac{2l}{S} \left(\frac{P_H}{U_0} \right)^2 = k P_H. \text{ Откуда } S = \frac{2\rho l P_H}{k U_H^2}.$$

Таким образом, мощность P' на нагрузку можно передать или током I_1 , или током I_2 (рис. 2.2). Первый режим характеризуется высоким напряжением и кпд, второй режим, напротив, – низким напряжением и кпд. Передача энергии высоким напряжением связана с упрочнением изоляции, но зато малый ток требует меньшее сечение проводов, которое, как показано, обратно пропорционально квадрату напряжения. Например, если напряжение увеличить в 10 раз, то сечение можно уменьшить в 100 раз. Таким образом, технически целесообразной и экономически выгодной является передача электроэнергии высоким напряжением.

Расчетное сечение, полученное из условия допустимой потери мощности или потери напряжения в ЛЭП, проверяют на нагрев, т.к. потери в проводах превращаются в тепло и повышают их температуру. В нормах для всех типов и стандартных сечений проводов указан максимально допустимый ток по условиям нагрева. Если ток в линии превышает допустимый, приходится выбирать большее сечение провода.

2.3. Цепь параллельно-последовательного соединения приемников. Метод преобразования

Цепь параллельно-последовательного соединения приемников удобно рассчитывать не по законам Кирхгофа, а методом преобразования.

Сущность метода заключается в том, что участки цепи с последовательным или параллельным соединением приемников заменяются одним эквивалентным приемником (сопротивлением). Такими последовательными преобразованиями приводят цепь к одноконтурной, в которой ток определяют по второму закону Кирхгофа и определяют напряжение на всех участках по закону Ома.

Затем схему разворачивают в обратной последовательности с попутным определением токов во всех ветвях и напряжений на всех приемниках.

Так, последовательное соединение резисторов R_2 и R_5 (рис. 2.3, а) можно заменить резистором $R_{23} = R_2 + R_5$ (см. рис. 2.3, б), а параллельное

соединение R_{25} и R_3 – резистором $R_{325} = \frac{R_3 R_{25}}{R_3 + R_{25}}$.

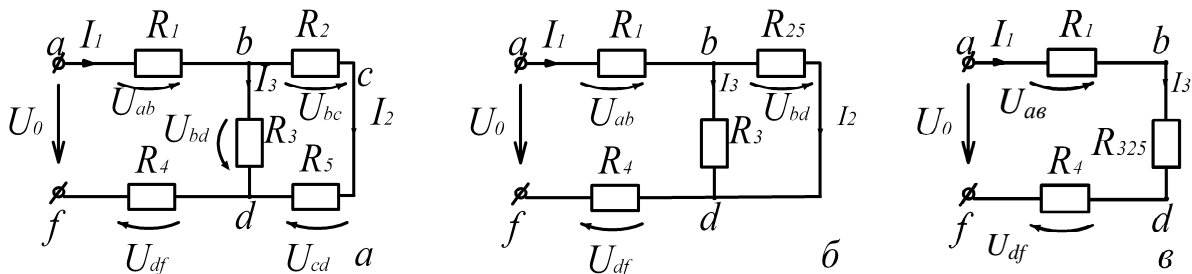


Рис. 2.3. Электрическая цепь (а), б и в – преобразованные цепи

Схема на рис. 2.3, в – одноконтурная, поэтому по закону Ома легко определить и величину тока $I_1 = \frac{U_0}{(R_1 + R_{325} + R_4)}$, и его направление. Зная величину тока, определяют напряжение на всех участках, направления которых совпадают с направлением тока:

$$U_{ab} = R_1 I_1; \quad U_{bd} = R_{325} I_1; \quad U_{df} = R_4 I_1.$$

Все эти напряжения положительные, так как потенциал точки a выше потенциала точки b , точки b – точки d и точки d – точки f .

Все найденные значения переносим на схему (см. рис. 2.3, б), где остается определить только $I_2 = U_{bd}/R_{25}$ и $I_3 = U_{bd}/R_3$.

В схеме (см. рис. 2.3, а) остается только определить напряжение на резисторах R_2 ($U_{bc} = R_2 I_2$) и R_5 ($U_{cd} = R_5 I_2$).

Если требуется определить напряжение между любыми точками схемы, например, U_{bf} , необходимо перемещаться от точки b к точке f по любому пути и сложить с учетом знаков все напряжения на этом пути:

$$U_{bf} = U_{bd} + U_{df} \quad \text{или} \quad U_{bf} = U_{ba} + U_{af} = -U_{ab} + U_0.$$

Если это напряжение положительное, то в соответствии с определением понятия напряжения $U_{bf} = \phi_b - \phi_f$ потенциал точки b выше потенциала точки f , если $U_{bf} < 0$, то $\phi_f > \phi_b$.

2.4. Цепи с несколькими источниками электроэнергии

В качестве цепи, содержащей несколько источников электроэнергии, рассмотрим цепь из двух источников, соединенных параллельно, работающих на нагрузку (см. рис. 2.4, а).

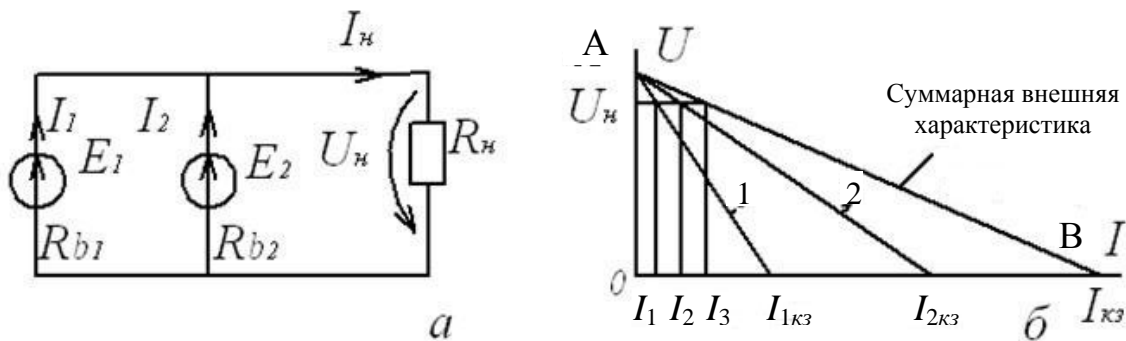


Рис. 2.4. Цепь с двумя источниками, работающими на нагрузку (а); внешние характеристики источников (б)

Важным условием включения источников на параллельную работу является равенство их ЭДС: $E_1 = E_2 = E$. В противном случае при отключенной нагрузке в контуре, где действуют ЭДС, возникает уравнительный ток $I' = (E_1 - E_2) / (R_{B1} + R_{B2})$, который может достигать большой величины.

Задачу можно решать, используя законы Кирхгофа, но решение будет наглядней, если воспользоваться внешними характеристиками источников (см. рис. 2.4). Характеристика 1 первого источника имеет более крутой характер по сравнению с характеристикой 2 второго источника. Следовательно, второй источник имеет меньшее внутреннее сопротивление, и он является более мощным.

Если два источника заменить одним, то его линейную внешнюю характеристику можно построить по двум точкам: в режиме холостого хода напряжение на зажимах источников равно ЭДС (точка А), а в режиме короткого замыкания напряжение на нагрузке равно нулю, а ток $I_{кз} = I_{1кз} + I_{2кз}$ (точка В), где $I_{1кз} = E/R_{B1}$, а $I_{2кз} = E/R_{B2}$.

При рабочем напряжении U_H , которое можно рассчитать с помощью законов Кирхгофа, ток нагрузки I_H создается двумя источниками. Ток нагрузки справедливо распределяется между источниками. Маломощный источник отдает в цепь нагрузки меньший ток I_1 , а более мощный – больший ток I_2 .

Таким образом, **на параллельную работу можно подключать источники различной мощности, но напряжения на них в режиме холостого хода должны быть одинаковыми.**

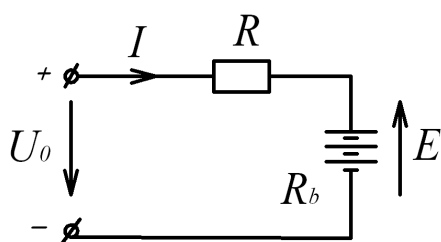


Рис. 2.5. Электрическая цепь зарядки аккумулятора

Практический интерес представляет собой электрическая цепь зарядки аккумулятора (рис. 2.5). Источник питания напряжением U_0 подключается встречно к аккумулятору через сопротивление R . При зарядке аккумулятор является нагрузкой, поэтому ток в нем должен быть направлен навстречу ЭДС. Это условие будет выполнено, если $U_0 > E$.

По второму закону Кирхгофа $U_0 - E = (R + R_b)I$, откуда $I = \frac{U_0 - E}{R + R_b}$.

Сопротивление R обычно включают для ограничения зарядного тока и его стабилизации. Действительно, без дополнительного сопротивления зарядный ток будет определяться разностью между напряжением источника и ЭДС аккумулятора и небольшим внутренним сопротивлением аккумулятора.

В этих условиях по мере зарядки аккумулятора его ЭДС возрастает и резко уменьшается зарядный ток. Поэтому для поддержания зарядного тока необходимо иметь регулируемый источник, напряжение которого U_0 необходимо постоянно повышать.

Необходимость в регулируемом источнике отпадает, если напряжение его значительно больше ЭДС и подобран резистор R , обеспечивающий требуемый зарядный ток. У кислотных аккумуляторов, например, ток зарядки выбирают равным 10 % от емкости аккумулятора в ампер-часах.

Если $U \gg E$ и $R \gg R_B$, то зарядный ток $I \approx U_0/R$ практически не зависит от изменения ЭДС аккумулятора в процессе зарядки, однако при этом КПД устройства резко падает, так как значительная часть электрической энергии затрачивается на нагрев резистора.

2.5. Нелинейные цепи

Для анализа работы приемников электрической энергии при их последовательном или параллельном соединении, как известно, пользуются понятием электрического сопротивления. Однако сопротивление приемников и приборов может изменяться в зависимости от различных параметров. Так, с увеличением напряжения на лампе накаливания температура нити повышается и растет сопротивление. Сопротивление диода резко изменяется в зависимости от полярности включения. Если потенциал анода положительный по сравнению с потенциалом катода, то его сопротивление практически равно нулю. При обратной полярности – практически бесконечно.

Сопротивление транзистора (сопротивление между коллектором и эмиттером) вообще можно изменять в любую сторону, изменяя потенциал управляющего электрода (базы).

Вольтамперная характеристика (зависимость между током и напряжением) таких элементов является нелинейной, и цепи с элементами переменного сопротивления – нелинейные.

Анализ цепей с нелинейными элементами часто проводится графически с использованием их вольтамперных характеристик.

Например, последовательное соединение нелинейных элементов заменяют эквивалентным. Вольтамперная характеристика эквивалентного элемента строится по точкам, когда напряжения на этих элементах складываются при фиксированном токе. Вольтамперная характеристика эквивалентного элемента при параллельном соединении строится также по точкам, но складываются токи при данном напряжении.

При смешанном соединении приемников и элементов последовательными преобразованиями приводит цепь к одному эквивалентному нелинейному элементу. По известному напряжению определяют ток в этом элементе, а затем схему разворачивают в обратной последовательности с попутным определением токов во всех ветвях и напряжений на всех элементах. Как видно, методики расчета нелинейных и линейных цепей совпадают, только в первом случае расчет выполняется с помощью вольтамперных характеристик (ВАХ).

В схемах промышленной электроники часто можно встретить схему последовательного соединения резистора и нелинейного элемента (транзистора), изображенную на рис. 2.6, а.

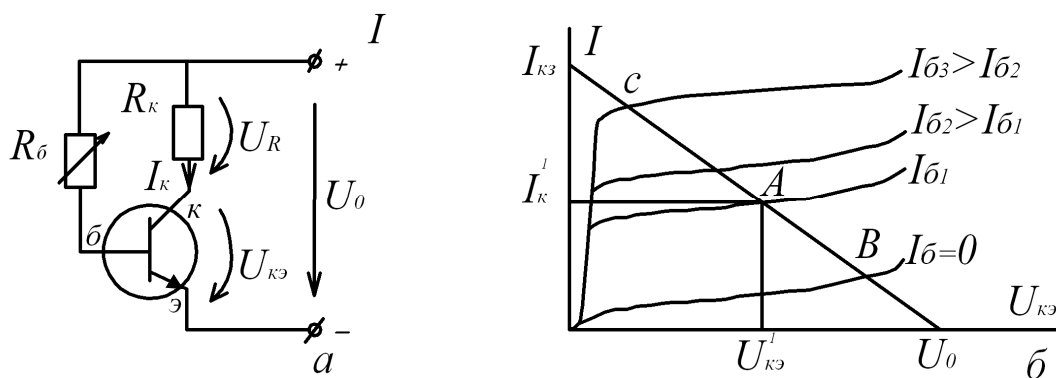


Рис. 2.6. Схема усилителя постоянного тока (а); выходные характеристики транзистора (б)

Транзистор в упрощенном представлении можно считать переменным резистором, величину сопротивления которого можно регулировать током базы.

На рис. 2.6, б показано семейство вольтамперных характеристик транзистора. Семейство таких характеристик, снимаемых при различных токах базы, называется выходными характеристиками.

Требуется определить режим работы транзистора, т.е. ток транзистора и напряжение на нем при фиксированном токе базы, который устанавливается переменным резистором R_δ .

Чтобы не делать дополнительных построений, строят не эквивалентную вольтамперную характеристику последовательного соединения, а линию нагрузки $U_{кэ} = U_0 - R_k I$, которая показывает, как может изменяться напряжение на транзисторе при любых изменениях тока в цепи. Характеристика $U_{кэ} = f(I)$ линейная, поэтому ее можно построить по двум точкам.

Если транзистор заперт, т.е. его сопротивление равно бесконечности, то тока в цепи нет ($I = 0$ – режим холостого хода) и $U_{кэ} = U_0$, т.е. все напряжение источника питания будет приложено к транзистору. Если предположить, что сопротивление будет бесконечно малым, $R_{кэ} = 0$ (транзистор полностью открыт), то ток в цепи максимальный – $I_{кэ} = U_0 / R_k$ (режим короткого замыкания), а напряжение на транзисторе $U_{кэ} = R_{кэ} I_{кэ} = 0$, так как $R_{кэ} = 0$.

С другой стороны, режим работы транзистора определяется выходной характеристикой. Поэтому рабочая точка определится на пересечении линии нагрузки с выходной характеристикой. При токе базы $I_{б1}$ рабочая точка А определит ток в цепи I'_k , напряжение на транзисторе $U'_{кэ}$ и напряжение на резисторе R_k .

При изменении тока базы от 0 до $I_{б3}$ рабочая точка будет перемещаться по линии нагрузки от точки В до точки С.

Такая схема используется в усилителях постоянного тока. При изменении тока базы (входная цепь) изменяется ток в транзисторе (выходная цепь), который в несколько десятков раз превышает управляющий входной ток базы.

Расчет и анализ нелинейных цепей можно проводить графоаналитическим методом, используя и вольтамперную характеристику нелинейного элемента, и законы Кирхгофа.

В качестве примера рассмотрим схему параметрического стабилизатора напряжения. На рис. 2.7, а показана схема стабилизатора, а на рис. 2.7, б – его вольтамперная характеристика.

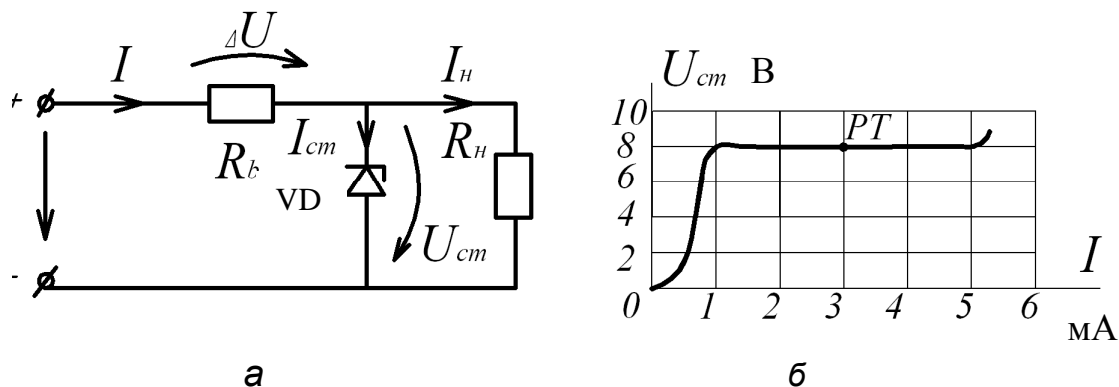


Рис. 2.7. Схема (а) стабилизатора и вольтамперная характеристика (б) стабилитрона

Задача. Определить интервал входного напряжения, при котором возможна стабилизация выходного напряжения нагрузки, если $U_{ex} = 32$ В, а ток нагрузки $I_n = 9$ мА. При заданном входном напряжении определить диапазон токовой нагрузки, в пределах которого осуществляется стабилизация.

Решение: 1. Если входное напряжение может и увеличиваться, и уменьшаться, то рабочую точку А выбираем на середине участка стабилизации, когда $I_{cm} = 3$ мА, а выходное стабилизированное напряжение равно 8 В.

2. Общий ток, соответствующий выбранной рабочей точке, $I = I_{cm} + I_n = 3 + 9 = 12$ мА.

3. Так как входное напряжение источника больше напряжения стабилизации, то разницу этих напряжений необходимо погасить балластным сопротивлением $R_{\sigma} = (U_{ex} - U_{cm}) / I = (32 - 8) / 12 = 2$ кОм.

4. Режим стабилизации соответствует интервалу тока от $I'_{cm} = 1$ мА до $I''_{cm} = 5$ мА, поэтому общий ток в режиме стабилизации может изменяться от $I' = I'_{cm} + I_n = 1 + 9 = 10$ мА до $I'' = I''_{cm} + I_n = 5 + 9 = 14$ мА.

5. Падение напряжения на балластном сопротивлении будет изменяться от $\Delta U' = R_{\sigma} I' = 2 \cdot 10 = 20$ В до $\Delta U'' = R_{\sigma} I'' = 2 \cdot 14 = 28$ В.

6. Крайние значения входного напряжения режима стабилизации $U' = \Delta U' + U_{cm} = 20 + 8 = 28$ В, $U'' = \Delta U'' + U_{cm} = 28 + 8 = 36$ В.

7. Таким образом, режим стабилизации при данной нагрузке возможен при напряжении $U = (32 \pm 4)$ В.

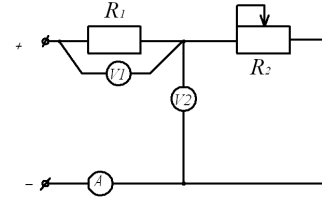
Стабилизация выходного напряжения может осуществляться не только при изменении входного напряжения, но и при изменении тока нагрузки. При заданном входном напряжении $U = 32$ В и выбранном балластном сопротивлении режим стабилизации будет иметь место только при общем токе $I = 12$ мА, а так как ток стабилитрона может изменяться от 1 мА до 5 мА, то ток нагрузки может изменяться в пределах от $I'_n = I - I'_{cm} = 12 - 1 = 11$ мА до $I''_n = I - I''_{cm} = 12 - 5 = 7$ мА, т.е. $I_n = 9 \pm 2$ мА.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Как составить из резисторов сопротивлением 10 кОм сборку 15 кОм?

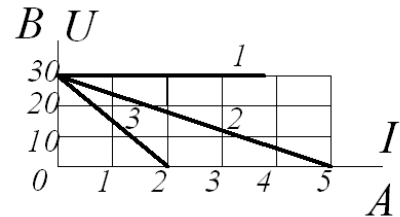
2. Электромагнитное реле рассчитано на напряжение 24 В и при этом потребляет ток 40 мА. Определить величину и мощность сопротивления, с помощью которого данное реле можно было бы включать в сеть 110 В. Составить вычисленное сопротивление из двухваттных резисторов сопротивлением $2,2 \text{ кОм} \pm 10 \%$.

3. Как изменятся показания приборов, если движок реостата сдвинуть вправо (см. рис.)?

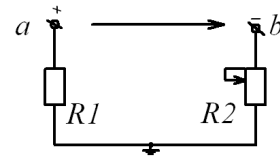


4. Что покажет вольтметр, который ошибочно включен как амперметр последовательно в цепь, состоящую из источника и приемника?

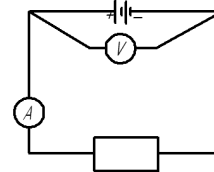
5. Определить внутренние сопротивления источников энергии, внешние характеристики которых изображены на рисунке. Какой из источников является более мощным?



6. Как изменятся потенциалы точек *a* и *b* относительно заземленной точки, если движок реостата сдвинуть вниз (см. рис.)?

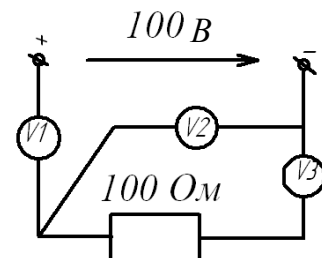


7. Определить показания вольтметра при отключенной нагрузке, если при токе нагрузки 5 А вольтметр показывал 48 В, а при токе 10 А показывал 46 В (см. рис.).

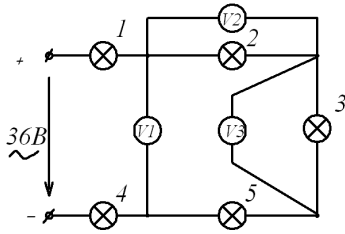


8. Как следует соединить две одинаковые спирали, чтобы получить наибольший тепловой эффект? Нарисовать схему подключения к источнику.

9. Определить и объяснить показания приборов на рисунке.



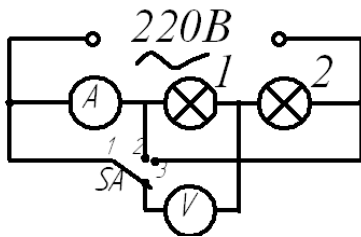
10. Сколько потребуется измерений вольтметром (указать минимальное число), чтобы определить перегоревшую лампу в гирлянде, состоящей из восьми последовательно соединенных ламп?



11. В цепи последовательного соединения пяти ламп сгорела одна из них. Чему будет равно показание 1-го вольтметра? Определить целостность всех ламп, если известны показания двух: $U_2 = 0$ В, $U_3 = 36$ В (см. рис.).

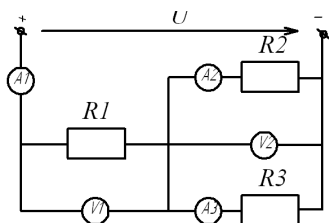
12. Как изменится ток источника и яркость лампы, если параллельно ей включить вторую лампу: 1. Сопротивление линии передачи считать равным нулю. 2. Учесть влияние сопротивления линии передачи.

13. Две одинаковые лампы накаливания номинальной мощностью 5 Вт и напряжением 110 В включены последовательно в сеть напряжением 220 В.



Определить показания приборов и напряжения на лампах при трех положениях переключателя: а) в исходной схеме; б) в схеме, в которой амперметр и вольтметр поменяли местами (см. рис.).

14. Какой величины сопротивление необходимо подобрать и как его следует включить, чтобы лампа накаливания, рассчитанная на напряжение 220 В мощностью 100 Вт горела нормально от сети 380 В?



15. Как изменятся показания всех приборов, если увеличить сопротивление R_2 (см. рис.)?

16. Вольтметр, подключенный к зажимам разряженного аккумулятора, показал 11 В, после зарядки – 14 В и в номинальном режиме после зарядки при токе 5А – 12 В. Определить напряжение источника питания, заряжающего аккумулятор, и величину балластного сопротивления, которое необходимо включить в цепь зарядки, чтобы при начальном зарядном токе 5 А в конце зарядки ток изменился не более, чем на 20 %.

3. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Электротехника в начале своего развития использовала постоянный ток, но после изобретения Доливо-Добровольским в 1891 г. системы трехфазного тока переменный синусоидальный ток получил преимущественное распространение. Электротехника сильных токов использует в основном низкие частоты. Промышленная частота в Европе – 50 Гц, в Америке – 60 Гц, в военной технике распространена частота 400 Гц, техника связи по проводам использует частоты от 100 до 10000 Гц, а радиотехника – от 100 кГц и выше.

Наиболее просто получить ток, изменяющийся по синусоидальному закону. Для синусоидального переменного тока, кроме того, разработаны простые методы расчета, подобные методам расчета цепей постоянного тока.

3.1. Получение синусоидальной ЭДС

Пусть одновитковая рамка площадью S_0 равномерно вращается с угловой скоростью ω в однородном магнитном поле с индукцией B вокруг оси, перпендикулярной к силовым линиям магнитной индукции (рис. 3.1, а).

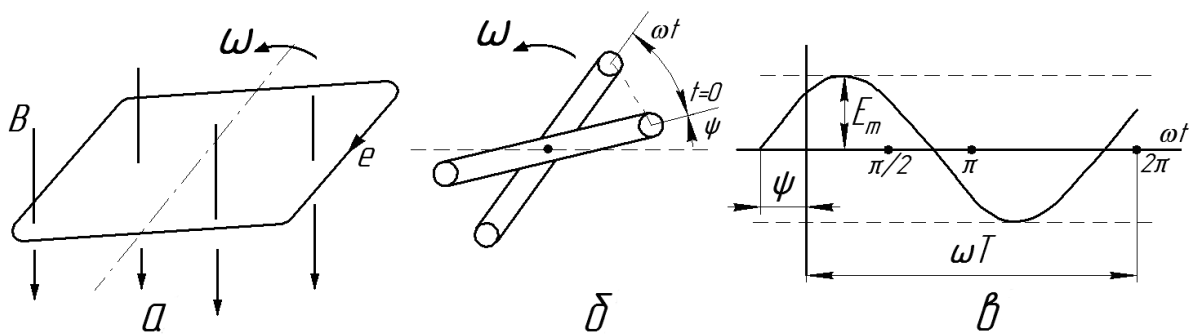


Рис. 3.1. Получение синусоидальной ЭДС:
а – схема; б – схема в разрезе; в – временная (волновая) диаграмма

Если в начальный момент времени $t = 0$ плоскость рамки составляла с горизонтом угол ψ , то за произвольное время t рамка повернется на угол ωt (см. рис. 3.1, б). Магнитный поток, пронизывающий рамку в произвольный момент времени, $\Phi = \overline{BS} = BS_0 \cos(\omega t + \psi)$.

Электродвижущая сила, возникающая в рамке в соответствии с законом электромагнитной индукции,

$$e = \frac{-d\Phi}{dt} = BS_0\omega \sin(\omega t + \psi) = E_m \sin(\omega t + \psi),$$

где $E_m = BS_0\omega$ – амплитуда синусоидальной ЭДС; e – мгновенное значение ЭДС; $(\omega t + \psi)$ – фаза ЭДС, ψ – начальная фаза.

На рис. 3.1, в показана временная диаграмма ЭДС. ЭДС будет равна нулю, если $\sin(\omega t + \psi) = 0$ или $\omega t + \psi = 0$, т.е. $-\omega t = \psi$. Следовательно, для построения синусоиды положительную начальную фазу необходимо откладывать влево от начала координат, отрицательную – вправо по оси ωt от момента $t = 0$.

По оси абсцисс на волновой диаграмме удобно откладывать не время, а фазу (угол), которая пропорциональна времени. Коэффициентом пропорциональности является угловая скорость ω .

Время полного оборота рамки T (с) называется периодом колебания, число периодов за 1 с $f = 1/T$ – частотой (Гц). За время T рамка поворачивается на угол 2π .

$$\omega T = \omega \frac{1}{f} = 2\pi, \quad \text{откуда } \omega = 2\pi f.$$

Промышленной частоте $f = 50$ Гц соответствует угловая скорость $\omega = 314$ рад/с или 314 с^{-1} .

В расчетах чаще всего используют так называемые эффективные или действующие значения синусоидальных ЭДС, токов, напряжений и т.д. Если взять два одинаковых приемника (например, резистора), один из них включить в сеть переменного синусоидального тока, а другой – в цепь постоянного тока и за одно и то же время они нагрелись одинаково, то по тепловому эффекту эти токи равны.

Эффективным (действующим) значением переменного тока называют такой постоянный ток, который оказывает такое же тепловое действие, как переменный. Можно показать, что для синусоидального переменного тока действующее значение в $\sqrt{2}$ раз меньше амплитудного: $I = I_m / \sqrt{2}$. Понятие действующего значения распространяется и на другие физические величины – ЭДС, напряжение, магнитный поток. Действующие значения обозначаются большими буквами без значков:

$$U = U_m / \sqrt{2}; \quad E = E_m / \sqrt{2}; \quad \Phi = \Phi_m / \sqrt{2}.$$

Несмотря на то, что общепотребительными являются действующие значения переменных величин, нельзя забывать о том, что амплитуды этих величин превышают действующие значения в $\sqrt{2}$. Например, если конденсатор рассчитан на напряжение 300 В, то его нельзя включать в сеть переменного тока с напряжением 220 В, так как его амплитудное значение равно 311 В, что превышает допустимое значения для конденсатора.

Другой пример. Магнитную индукцию в стальном сердечнике удобно рассчитывать не по действующему, а по амплитудному значению. Если амплитуда индукции будет соответствовать участку насыщения кривой $B = f(H)$, то резко возрастает величина тока в катушке, создающей магнитное поле, и искажается форма кривой тока. В конечном счете это приводит к перегреву катушки, хотя действующее значение магнитной индукции соответствует небольшому действующему значению тока на линейной части характеристики $B = f(H)$ до участка насыщения. Подробнее об этом – в п. 3.11.

3.2. Векторное изображение синусоидальных величин

Синусоидальную величину можно представить в алгебраической форме, например, $e = E_m \sin(\omega t + \psi)$, графически – с помощью временной диаграммы (см. рис. 3.1, в), но можно изобразить и в виде вектора, длина которого равна амплитуде или действующему значению синусоидальной величины. Обычно с помощью векторов на одном рисунке изображают несколько синусоидальных величин, относящихся к одной электрической схеме и образующих векторную диаграмму (ВД). Первый вектор направлен на плоскости произвольно, а остальные строятся с учетом фазных сдвигов между векторами.

Например, в цепи последовательного соединения двух приемников известны напряжения $u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ и $u_2 = U_{2m} \sin(\omega t + \psi_2)$ (рис. 3.2, а).

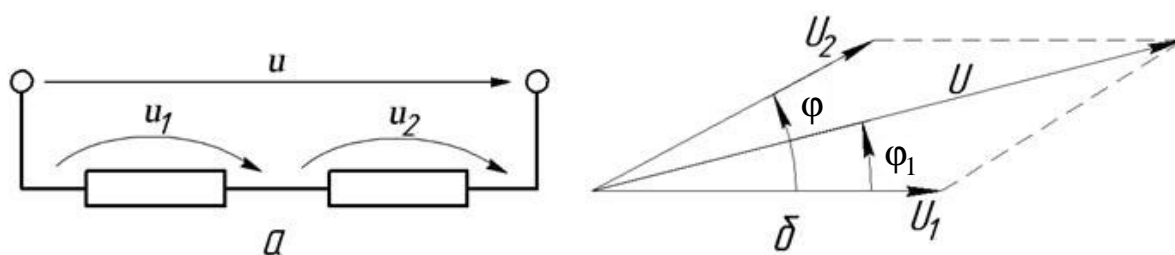


Рис 3.2. Цепь последовательного соединения двух приемников (а), ее векторная диаграмма (б)

Построим векторную диаграмму (ВД) для действующих значений синусоидальных величин. Первый вектор U_1 направляем произвольно (горизонтально). Чтобы показать второй вектор, определим его фазу относительно первого. Фазный сдвиг U_2 относительно U_1 $\varphi = (\omega t + \psi_2) - (\omega t + \psi_1) = \psi_2 - \psi_1$.

Если угол φ положительный, то его откладывают от опорного вектора U_1 в положительную сторону, т.е. против часовой стрелки. При этом вектор U_2 опережает U_1 на φ . Если угол φ отрицательный, то его откладывают от опорного вектора U_1 в отрицательную сторону, т.е. по часовой стрелке.

Векторные диаграммы удобны при сложении или вычитании синусоидальных величин. Если бы фазы этих синусоид были одинаковы ($\psi_2 = \psi_1 = \psi$), то общее напряжение (амплитудное или действующее) было бы равно арифметической сумме этих напряжений:

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2 = U_{1m}\sin(\omega t + \psi_1) + U_{2m}\sin(\omega t + \psi_2) = \\ &= (U_{1m} + U_{2m})\sin(\omega t + \psi) = U_m\sin(\omega t + \psi). \end{aligned}$$

В общем случае $\psi_2 \neq \psi_1$ и аналитический расчет суммы двух синусоид с различными фазами представляет известные трудности. Расчет значительно упрощается, если воспользоваться векторным представлением синусоид напряжений. В этом случае общее напряжение будет равно геометрической сумме напряжений U_1 и U_2 . При этом определятся не только величина напряжения, но и его фаза. Вектор общего напряжения U опережает вектор U_1 на угол φ_1 . Величину и фазу вектора U можно определить графически или графоаналитически.

Итак, сложение или вычитание синусоидальных величин необходимо выполнять не арифметически, а с учетом фазных сдвигов между ними, т.е. геометрически.

Например, при последовательном соединении двух приемников, действующие значения напряжений на которых равны 150 и 100 В, общее напряжение может изменяться в интервале от 250 В (если фазы равны) до 50 В (если напряжения находятся в противофазе). То же самое относится к сложению токов при параллельном соединении приемников.

3.3. Особенности цепей переменного тока

Анализ цепей переменного тока имеет свои особенности, хотя законы Ома, Кирхгофа, Джоуля – Ленца справедливы для мгновенных значений токов, напряжений и мощностей.

В цепях переменного тока электрические и магнитные поля также будут переменными, и, следовательно, в самой цепи будут создаваться внутренние ЭДС, которые следует учитывать при анализе цепей.

Кроме того, в цепях переменного тока напряжения и токи непрерывно изменяют свое направление, но для правильного учета знаков при составлении уравнения по законам Ома и Кирхгофа следует задаваться условными положительными направлениями токов и напряжений, как и в цепях постоянного тока.

В цепях переменного тока различают 3 вида нагрузки.

В **активной нагрузке** электрическая энергия преобразуется в другие виды энергии (тепловую, механическую и др.). Активная нагрузка характеризуется активным сопротивлением r , мало чем отличающимся от омического сопротивления постоянному току. Реальными устройствами, соответствующими активной нагрузке, являются электронагревательные приборы.

В **индуктивной нагрузке** электрическая энергия преобразуется в энергию магнитного поля. Индуктивная нагрузка характеризуется индуктивностью L . Катушка, в которой отсутствует активное сопротивление, является идеальной индуктивной нагрузкой.

В **емкостной нагрузке** электрическая энергия преобразуется в энергию электрического поля. Параметром емкостной нагрузки является емкость C , а реальным устройством, соответствующим идеальной емкости, является конденсатор.

3.4. Цепи с идеальными элементами

3.4.1. Цепь с активным сопротивлением

Пусть к нагрузке, имеющей чисто активный характер, приложено синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$ (рис. 3.3, *a*). По закону Ома мгновенное значение тока в любой момент времени $i = \frac{u}{r} = \frac{U_m}{r} \sin \omega t = I_m \sin \omega t$,

где амплитудное значение тока $I_m = \frac{U_m}{r}$. Разделив левую и правую части на $\sqrt{2}$, получим аналог закона Ома для действующих значений синусоидальных величин: $I = \frac{U}{r}$.

Фазный сдвиг напряжения относительно тока $\varphi = \omega t - \omega t = 0$, т.е. фазы тока и напряжения равны, и на векторной диаграмме действующие значения напряжения и тока параллельны (см. рис. 3.3, б).

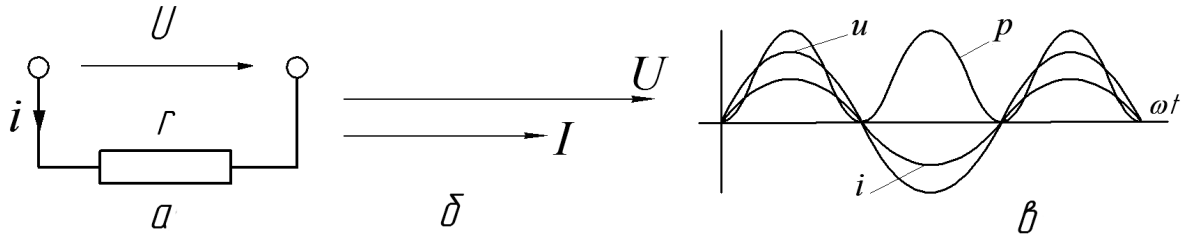


Рис. 3.3. Цепь с активным сопротивлением:
 а – электрическая схема; б – векторная диаграмма; в – волновая диаграмма

Мгновенная мощность $p = ui = U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin \omega t = U_m I_m \sin^2 \omega t = U_m I_m (0,5 - 0,5 \cos 2\omega t)$ изменяется также по синусоидальному закону, но с двойной частотой (см. рис. 3.3, в). При этом в любой момент времени мощность положительна. Это означает, что в любой момент времени приемник забирает энергию из сети.

3.4.2. Цепь с индуктивностью

Предположим, что под действием синусоидального напряжения в индуктивности протекает ток $i = I_m \sin \omega t$. ЭДС, возникающая в индуктивности, $e = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di}{dt} = -L\omega I_m \cos \omega t$. Для правильного учета знаков ЭДС следует направлять по выбранному направлению тока (рис. 3.4, а).

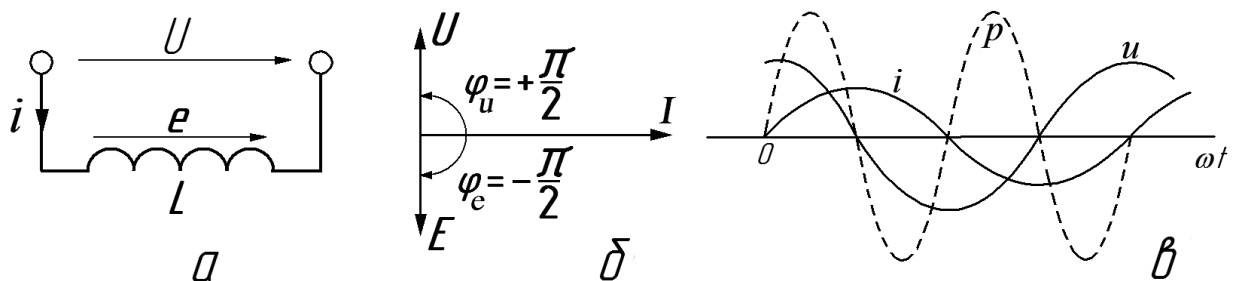


Рис. 3.4. Цепь с индуктивностью:
 а – схема; б – векторная диаграмма; в – волновая диаграмма

По второму закону Кирхгофа $e = -u$, т.е.

$$u = L\omega I_m \cos \omega t = \omega L I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = U_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

где $U_m = \omega L I_m$ – амплитуда напряжения. Разделив левую и правую части на $\sqrt{2}$, получим аналог закона Ома для действующих значений тока и напряжения: $U = \omega L I$ или $I = \frac{U}{\omega L} = \frac{U}{x_L}$, где $x_L = \omega L = 2\pi f L$ называется индук-

тивным сопротивлением и измеряется в омах. Например, индуктивность $L = 0,1$ Г переменному току частотой 50 Гц оказывает сопротивление $x_L = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,1 = 31,4$ Ом.

Фазный сдвиг напряжения относительно тока $\varphi = (\omega t + \frac{\pi}{2}) - \omega t = +\frac{\pi}{2}$,

т.е. напряжение опережает ток на 90° (см. рис. 3.4, б и в), а фазный сдвиг ЭДС относительно тока равен -90° . Таким образом, ЭДС, возникающая в индуктивности, находится в противофазе с приложенным напряжением.

Сопротивление, которое оказывает индуктивность переменному току, по характеру отличается от омического сопротивления постоянному току. Если включить индуктивность в цепь постоянного тока, то это будет равносильно короткому замыканию. Сопротивление индуктивности переменному току не равно нулю благодаря возникновению противо-ЭДС, которая создает эффект сопротивления. Индуктивное сопротивление, называемое реактивным, смещает фазу тока относительно приложенного напряжения в сторону отставания.

Мгновенная мощность $p = ui = UI \sin 2\omega t$ изменяется по синусоидальному закону с двойной угловой частотой. Как видно из графика, в первую четверть периода мощность положительна, т.е. индуктивность потребляет энергию из сети и запасает ее в виде энергии магнитного поля, во вторую четверть периода мощность отрицательная, а запасенная энергия возвращается в сеть.

Таким образом, в цепи с индуктивностью происходит непрерывная «перекачка» энергии от генератора к потребителю и обратно.

При этом тепловой энергии в индуктивности не выделяется, т.е. реальная катушка с очень малым активным сопротивлением практически не нагревается несмотря на то, что через эту катушку протекает значительный ток.

3.4.3. Цепь с емкостью

При включении емкости на синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$ возникает ток, обусловленный изменением заряда q ,

$I = dq/dt = d(Cu)/dt = Cdu/dt = \omega CU_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$, где амплитудное значение тока

$$I_m = \omega CU_m = \frac{U_m}{1/\omega C}.$$

Величина $1/\omega C$ называется емкостным сопротивлением, измеряется в омах. Например, емкость $C = 40$ мкФ переменному току частотой 50 Гц оказывает сопротивление

$$x_c = 1/\omega C = 1/2\pi fC = 1/2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 40 \cdot 10^{-6} = 79,6 \text{ Ом.}$$

Аналог закона Ома для действующих значений тока и напряжения

$$I = U/x_c.$$

Фазный сдвиг напряжения относительно тока $\varphi = \omega - (\omega + \frac{\pi}{2}) = -\frac{\pi}{2}$,

что означает отставание напряжения относительно тока на 1/4 периода.

На рис. 3.5, *a* и *б* показаны схема включения и ВД цепи с емкостью.

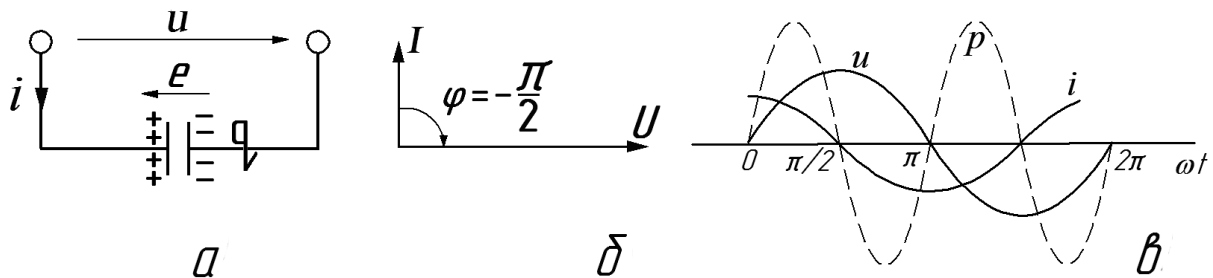


Рис 3.5. Цепь с емкостью: *a* – схема; *б* – векторная диаграмма; *в* – временная (волновая) диаграмма

Ток в цепи с емкостью, обусловленный изменением заряда во времени, называется током смещения, который по характеру отличается от тока проводимости. Реальным устройством, эквивалентным емкостной нагрузке, является конденсатор.

Если включить конденсатор в цепь постоянного тока, то установившееся значение тока будет равно нулю, т.к. между обкладками конденсатора находится изолятор, оказывающий постоянному току бесконечно большое сопротивление.

Если включить конденсатор в сеть переменного тока, то на обкладках конденсатора появится заряд $q = cu$, который будет «следить» за изменением напряжения, т.е. будет пропорционален напряжению. Этот заряд создает внутреннюю ЭДС, которая, подобно ЭДС самоиндукции в катушке, препятствует нарастанию тока. Этот процесс формально учитывается так называемым емкостным сопротивлением. Емкостное сопротивление, называемое реактивным, смещает фазу тока относительно напряжения в сторону опережения.

Мгновенная мощность $p = ui = UI \sin 2\omega t$, потребляемая емкостью, – синусоидальная, т.е. знакопеременная (см. рис 3.5, в). Как и в цепи с индуктивностью, происходит непрерывный обмен энергиями между сетью и нагрузкой (емкостью), но средняя мощность за период равна нулю, и конденсатор как устройство, близко соответствующее идеальной емкости, практически не нагревается.

3.5. Цепи последовательного соединения элементов

В качестве примера рассмотрим цепь последовательного соединения активного сопротивления и индуктивности (рис. 3.6, а).

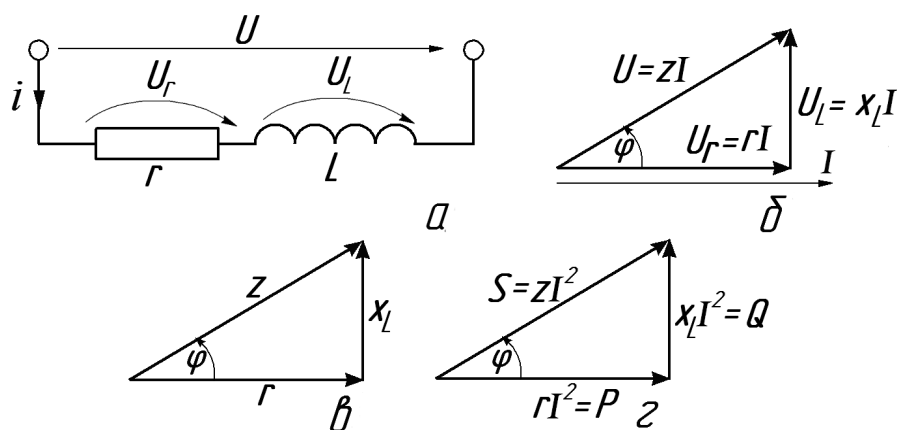


Рис 3.6. Цепь последовательного соединения r и L :

а – схема; б – векторная диаграмма; в – треугольник сопротивлений;
г – треугольник мощностей

Пусть под действием приложенного напряжения U (действующее значение) в цепи установился ток I . В дальнейшем анализ цепи будем вести для действующих значений синусоидальных величин. Построим векторную диаграмму тока и напряжений (см. рис. 3.6, б).

Первый вектор, например, ток направим на плоскости произвольно (горизонтально). Этот ток протекает и по активному сопротивлению, вызывая падение напряжения $U_r = rI$, и по индуктивности – $U_L = x_L I$. Но в активном сопротивлении U_r совпадает по фазе с током (направим его параллельно вектору тока), а в индуктивности U_L опережает вектор тока на четверть периода, т.е. на 90° . Общее напряжение определится геометрической суммой U_r и U_L : $\overline{U} = \overline{U}_r + \overline{U}_L$.

Введем понятие полного сопротивления цепи z как отношение действующего значения напряжения к току в этой цепи.

$$z = \frac{U}{I}, \text{ откуда } U = zI.$$

Если разделить каждый вектор напряжения на величину тока, то получим подобный треугольник сопротивления (см. рис 3.6, в).

По известным параметрам r и x_L легко определить величину полного сопротивления последовательного соединения $z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$, а зная величину приложенного напряжения, определяем ток в цепи $I = U / z$.

Таким образом, полное сопротивление последовательно соединенных элементов, имеющих различный характер (активный и реактивный), не равно арифметической сумме этих сопротивлений. Например, $r = 40$ Ом, $x_L = 30$ Ом, тогда $z = 50$ Ом, а не 70 Ом.

С помощью треугольника сопротивлений легко можно определить фазный сдвиг напряжения относительно тока по тригонометрическим функциям этого угла: $\operatorname{tg} \varphi = x_L / r$; $\sin \varphi = x_L / z$, $\cos \varphi = r / z$.

Если в треугольнике напряжений каждый вектор умножить на величину тока I , то получим подобный треугольник мощностей (см. рис 3.6, г).

Величина rI^2 называется активной мощностью, измеряется в ваттах (Вт) и обозначается буквой P , величина $x_L I^2$ называется реактивной мощностью, измеряется в вольт-амперах реактивных (вар) и обозначается буквой Q , величина zI^2 называется полной мощностью, измеряется в вольт-амперах (ВА) и обозначается буквой S .

Так как $U = zI$, то полная мощность $S = UI$.

Полная мощность является характерной величиной для различных электротехнических устройств: генераторов, трансформаторов, электрических аппаратов, линий электропередач и т.д., так как сечение проводов этих устройств рассчитывается по току, а изоляция – по напряжению.

Активная мощность $P = UI \cos \varphi$ в общем случае меньше полной мощности из-за сдвига фаз между током и напряжением. Она пропорциональна тепловой и механической энергии, потребляемой приемником.

Реактивная мощность $Q = UI \sin \varphi$ пропорциональна той энергии, которая непрерывно «перекачивается» от генератора к потребителю и обратно. Эта энергия идет на создание электромагнитного поля приемников и не преобразуется ни в тепловую, ни в механическую энергию.

Величина $\cos \varphi$ называется коэффициентом мощности, который показывает, какая часть полной мощности источника питания расходуется на нагрев приемника и механическую работу.

Пользуясь векторной диаграммой, легко подсчитать полное сопротивление последовательного соединения активного сопротивления и емкости $z = \sqrt{r^2 + x_C^2}$ или полное сопротивление последовательного соединения активного сопротивления, индуктивности и емкости $z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}$.

На рис. 3.7, а и в показаны схемы, а на рис. 3.7, б и г – векторные диаграммы токов и напряжений, соответствующих этим схемам.

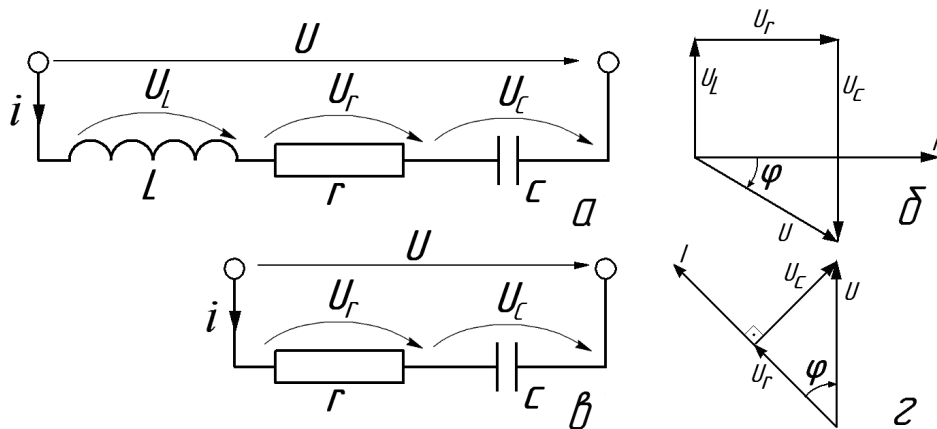


Рис 3.7. Последовательное соединение элементов (а и в) и векторные диаграммы токов и напряжений (б и г)

Фазный сдвиг напряжения относительно тока $\varphi = \arctg(U_L - U_C) / U_r = \arctg(x_L - x_C) / r$ – для схемы на рис. 3.7, а и $\varphi = \arctg(-x_C / r)$ – для схемы на рис. 3.7, в.

В обоих случаях угол φ отрицательный (напряжение отстает от тока). В схеме, изображенной на рис. 3.7, а это будет иметь место, если $x_C > x_L$.

Следует обратить внимание на то, что в цепях, содержащих индуктивность и емкость, напряжения на реактивных элементах могут превышать напряжение источника питания.

3.6. Параллельное соединение приемников

При параллельном соединении приемников по закону Ома определяют действующее значение тока в каждой ветви, его фазный сдвиг относительно приложенного напряжения и с помощью ВД геометрическим суммированием определяют общий ток параллельного соединения.

На рис. 3.8, а изображена схема параллельного соединения двух приемников: первый имеет активно-индуктивный характер, второй – активно-емкостный.

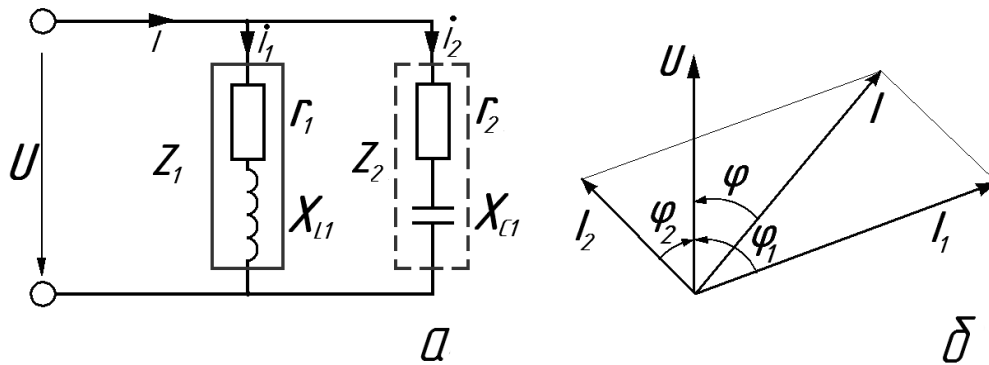


Рис. 3.8. Параллельное соединение приемников: а – схема; б – векторная диаграмма

Графоаналитический расчет предполагает определение полного сопротивления каждой ветви ($z_1 = \sqrt{r_1^2 + x_{L1}^2}$, $z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_{c2}^2}$), тока в каждой ветви ($I_1 = U/z_1$, $I_2 = U/z_2$), фазного сдвига напряжения относительно тока ($\varphi_1 = \arctg x_{L1}/r_1$, $\varphi_2 = \arctg -x_c/r_2$), построение ВД. При построении ВД цепи параллельного соединения приемников вначале произвольно направляют на плоскости вектор общего напряжения и определяют общий ток $\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2$. Величину тока I и фазный сдвиг φ напряжения относительно тока можно определить, разложив все векторы по взаимно перпендикулярным осям, например, вдоль напряжения и перпендикулярно к нему.

Из расчета видно, что общая нагрузка параллельного соединения носит активно-индуктивный характер, так как общий фазный сдвиг получился положительным. Величину полного сопротивления можно определить по закону Ома: $z = U/I$.

3.7. Понятие о символическом методе расчета цепей переменного тока

Символический метод (метод комплексных чисел) предполагает разложение всех векторов токов и напряжений, относящихся к какой-либо схеме, по двум взаимно перпендикулярным составляющим: оси действительных и оси мнимых. Например, цепи последовательного соединения r и L (рис. 3.9, а) соответствует ВД, изображенная на рис. 3.9, б, в которой напряжение опережает ток на угол φ . (Принято векторы синусоидальных величин на комплексной плоскости обозначать точкой над соответствующим символом).

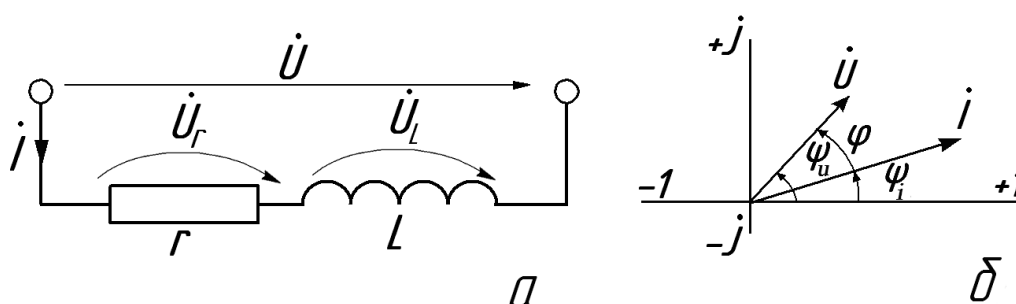


Рис. 3.9. Схема последовательного соединения r , L (а) и векторная диаграмма (б)

Эти векторы в тригонометрической форме запишутся следующим образом:

$$\dot{U} = U \cos \psi_u + jU \sin \psi_u;$$

$$\dot{I} = I \cos \psi_i + jI \sin \psi_i.$$

Здесь U и I – модули (величины) действующих значений напряжения и тока; ψ_u и ψ_i – углы между соответствующими векторами и осью действительных.

Введем понятие комплексного сопротивления как отношение комплексного напряжения к комплексному току $Z = \dot{U} / \dot{I}$. (Сопротивление в комплексной форме принято обозначать большой буквой).

Можно показать, что для цепи последовательного соединения r и x_L комплексное сопротивление $Z = r + jx_L$, т.е. действительная часть комплексного числа равна активному сопротивлению, а мнимая – реактивному.

Аналогично для цепи последовательного соединения r и C $Z = r - jx_c$, а для последовательного соединения r , L , C $Z = r + jx_L - jx_c = r + j(x_L - x_c)$. При

последовательном соединении двух комплексных сопротивлений общее сопротивление в комплексной форме $Z = Z_1 + Z_2$, а при параллельном

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} \text{ или } Z = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Как видно, комплексное сопротивление для любой цепи переменного тока определяется как и сопротивление для цепи постоянного тока. По определению комплексного сопротивления $\dot{I} = \dot{U}/Z$, что является аналогом закона Ома в символической форме.

Таким образом, расчет цепей переменного тока формально не отличается от расчета цепей постоянного тока, хотя более трудоемким является символический метод, который предполагает арифметические действия над комплексными числами.

В качестве примера рассчитаем простейшую цепь последовательного соединения активного сопротивления и индуктивности (см. рис. 3.9), в которой $r = 40$ Ом, $x_L = 30$ Ом, $U = 100$ В.

Комплексное сопротивление цепи $Z = r + jx_L = 40 + j30$ Ом. Первый вектор (заданный вектор напряжения) направляют на комплексной плоскости произвольно, например, по оси мнимых $\dot{U} = jU = j100$ В (Обычно направляют по оси действительных $\dot{U} = U = 100$ В).

Ток в цепи

$$\dot{I} = \dot{U}/Z = j100/(40 + j30) = 1,2 + j1,6 \text{ А.}$$

Напряжение на отдельных элементах

$$\dot{U}_r = r\dot{I} = 40(1,2 + j1,6) = 48 + j64 \text{ В;}$$

$$\dot{U}_L = jx_L\dot{I} = j30(1,2 + j1,6) = -48 + j36 \text{ В.}$$

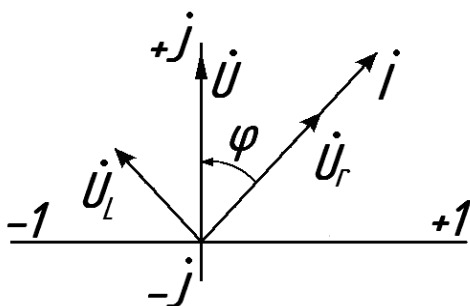


Рис. 3.10. Векторная диаграмма на комплексной плоскости

Изобразим в масштабе вектор тока и векторы напряжений (рис. 3.10). По ВД определяется фазный сдвиг φ между током и напряжением, а также модули (абсолютные значения) тока и напряжения.

$$I = \sqrt{1,2^2 + 1,6^2} = 2 \text{ А;}$$

$$U_r = \sqrt{48^2 + 64^2} = 80 \text{ В;}$$

$$U_L = \sqrt{48^2 + 36^2} = 60 \text{ В.}$$

Мощность цепи переменного тока определяется произведением комплекса напряжения на сопряженный комплекс тока (мнимая часть берется с обратным знаком и обозначается символом тока со «звездочкой»):

$$S = U I^* .$$

При этом действительная часть полной мощности равна активной мощности, мнимая – реактивной; знак «плюс» указывает на индуктивный характер нагрузки, «минус» – на емкостный.

В нашем примере $S = j100(1,2 - j1,6) = 160 + j120$. Следовательно, $P = 160$ Вт, $Q = 120$ вар, $S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{160^2 + 120^2} = 200$ В·А. Характер нагрузки индуктивный.

Итак, изображения векторов синусоидальных величин в комплексной плоскости и запись их комплексными числами позволяют использовать законы Ома и Кирхгофа для расчета цепей переменного тока в той же форме, что и для цепей постоянного тока. Символический метод позволяет формализовать расчет любой сложной электрической цепи переменного синусоидального тока.

3.8. Схема замещения электрических приемников

Анализ работы реальных электротехнических устройств в различных режимах удобно проводить, если эти устройства заменить электрической схемой, состоящей из активных и реактивных элементов и их соединений.

Параметры схемы замещения можно определить по показаниям амперметра, вольтметра и ваттметра (рис. 3.11, а).

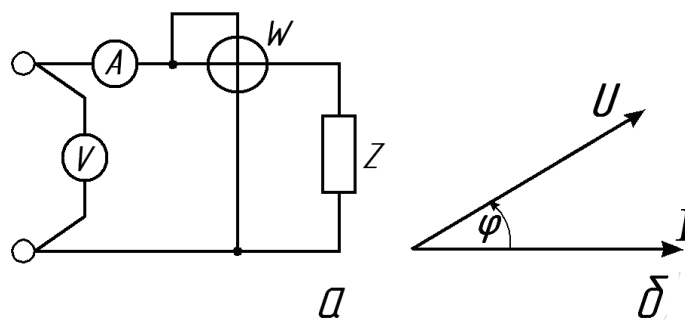


Рис. 3.11. Схема для определения параметров нагрузки (а), векторная диаграмма (б)

Полное сопротивление цепи $z = U/I$, фазный сдвиг напряжения относительно тока $\varphi = \arccos P/UI$. При этом необходимо знать характер нагрузки. На ВД (см. рис. 3.11, б) угол φ положительный, т.е. характер нагрузки активно-индуктивный.

Если разложить вектор напряжения на две составляющие – U_a направить вдоль вектора тока, а U_p – перпендикулярно к нему (рис. 3.12, а), то данной ВД соответствует схема последовательного соединения r и L (см. рис. 3.12, б).

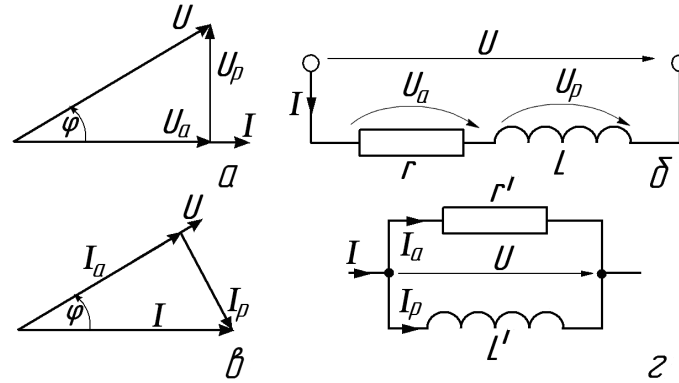


Рис. 3.12. Электрические цепи (б, г) и соответствующие им ВД (а, в)

Параметры r и L можно определить по показаниям приборов:

$$r = U_a / I = U \cos \varphi / I = z \cos \varphi, \text{ где } \cos \varphi = P / UI ;$$

$$x_L = U_p / I = U \sin \varphi / I = z \sin \varphi, \text{ где } \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} ;$$

$$L = x_L / \omega.$$

Если разложить вектор тока на две составляющие – вдоль вектора напряжения – I_a и перпендикулярно к напряжению – I_p (см. рис. 3.12, в), то этой ВД соответствует схема параллельного соединения r' и L' (см. рис. 3.12, г). Значения r' и L' можно определить следующим образом:

$$r' = U / I_a = U / I \cos \varphi = z / \cos \varphi ;$$

$$x'_L = U / I_p = U / I \sin \varphi = z / \sin \varphi ;$$

$$L' = x'_L / \omega.$$

Схемы замещения электродвигателей, генераторов, трансформаторов имеют более сложную конфигурацию соединений активных и реактивных элементов.

3.9. Резонанс в электрических цепях

Резонансом в электрических цепях, содержащих индуктивность и емкость, называется явление совпадения по фазе общего напряжения и тока. Резонанс в неразветвленной последовательной цепи называется резонансом напряжений, резонанс в разветвленной параллельной цепи – резонансом токов (рис. 3.13).

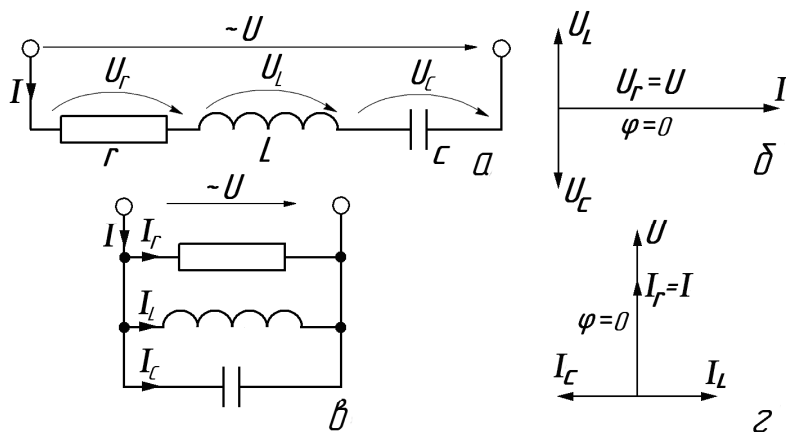


Рис. 3.13. Схемы последовательного (а) и параллельного (в) соединения r, L, C и векторные диаграммы (б и г) при резонансе

В цепи последовательного соединения r, L, C (см. рис. 3.13, а) резонанс напряжений имеет место при $U_L = U_C$ или $x_L = x_C$. Полное сопротивление цепи $z = \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2} = r$. Следовательно, цепь последовательного соединения L, C не оказывает сопротивление переменному току $z = x_L - x_C = 0$, что равносильно короткому замыканию.

В цепи параллельного соединения r, L, C резонанс токов наступит при $I_C = I_L$, т.е. $x_L = x_C$ и общий ток параллельного соединения $\bar{I} = \bar{I}_r + \bar{I}_L + \bar{I}_C = I_r$.

Очевидно, что при параллельном соединении L, C при резонансе $I_C = I_L$ и $\bar{I} = \bar{I}_L + \bar{I}_C = 0$. (Токи равны по величине и противоположны по фазе). Это означает, что данная цепочка имеет бесконечно большое сопротивление $z = U/I = \infty$ (т.к. $I = 0$).

Явление резонанса часто используется в радиотехнике, например, в схемах фильтров, колебательных контурах и т.д., в электротехнике – для повышения коэффициента мощности.

3.10. Повышение коэффициента мощности

Большинство приемников электрической энергии имеет активно-индуктивный характер нагрузки, в которой ток отстает от приложенного напряжения на угол φ_n . Схему замещения такой нагрузки можно представить, например, параллельным соединением r, L (рис. 3.14, а).

Ток нагрузки состоит из активной составляющей $I_a = I_n \cos \varphi_n$ и реактивной составляющей $I_p = I_n \sin \varphi_n$. Активная мощность нагрузки

$P_H = UI_H \cos \varphi_H$ пропорциональна активной составляющей тока нагрузки, а реактивная составляющая тока нагрузки пропорциональна реактивной мощности $Q = UI_H \sin \varphi_H$.

Для питания этой нагрузки источник питания должен быть рассчитан на полную мощность $S_1 = UI_H$, которая превышает активную мощность нагрузки.

Если включить параллельно нагрузке конденсатор, ток в котором опережает приложенное напряжение по фазе на $1/4$ периода (90°), то общий ток в линии I не увеличивается, а уменьшается (см. рис. 3.14, б). Хотя ток в нагрузке остался неизменным, ток, потребляемый системой нагрузка – конденсатор, уменьшился. Следовательно, уменьшаются потери в линии и главное – разгружается источник питания. Его мощность $S_2 = UI < S$ благодаря уменьшению фазного сдвига между током и напряжением, т.е. повышению коэффициента мощности в системе нагрузка – конденсатор.

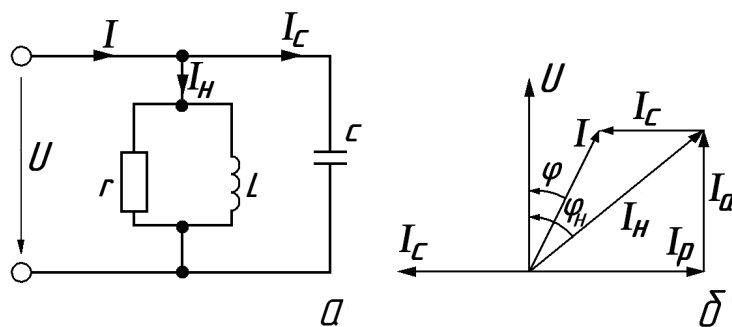


Рис. 3.14. Схема (а) и векторная диаграмма (б) при повышении коэффициента мощности

Можно подобрать такой конденсатор, при котором $I_C = I_p$. При этом $\varphi = 0$ и для питания нагрузки мощностью P_H потребуется генератор, рассчитанный на полную мощность S , равную P_H . То есть реактивная индуктивная мощность нагрузки будет скомпенсирована емкостной реактивной мощностью.

Очевидно, проблема повышения $\cos \varphi$ имеет народнохозяйственное значение, для повышения $\cos \varphi$ можно использовать не только батареи конденсаторов, но и, как будет показано ниже, – перевозбужденный синхронный двигатель или синхронный компенсатор.

Кроме того, на $\cos \varphi$ влияет величина нагрузки двигателя. С уменьшением нагрузки падает и $\cos \varphi$, т.к. уменьшается активная составляющая тока нагрузки при неизменной реактивной. Поэтому электродвигатели к различным нагрузкам следует подбирать так, чтобы они работали в режиме, близком к номинальному.

3.11. Катушка со сталью в цепи переменного тока

Ферромагнитные материалы широко используются в электрических устройствах переменного тока: трансформаторы, электрические машины, дроссели, магнитные усилители и др.

Особенностью электрических цепей со сталью является нелинейная зависимость магнитного тока от тока в катушке.

Кроме того, переменный магнитный поток, пронизывая ферромагнитный сердечник, создает в нем вихревые токи, которые нагревают этот сердечник. Дополнительный нагрев сердечника вызывается его циклическим перемагничиванием.

Пусть катушка с числом витков w охватывает замкнутый стальной магнитопровод сечением S и включена в сеть синусоидального переменного тока. Под действием переменного напряжения в катушке возникает переменный ток I , создающий магнитное поле, замыкающееся по стальному сердечнику (рис. 3.15, а).

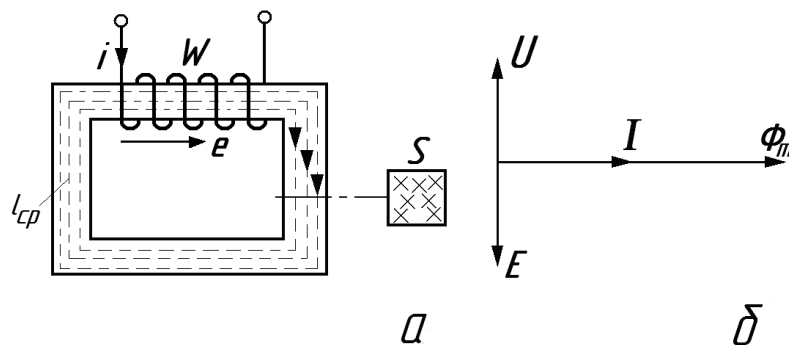


Рис. 3.15. Катушка со стальным сердечником (а) и упрощенная векторная диаграмма синусоидальных величин (б)

Предположим, что магнитный поток изменяется по синусоидальному закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Этот поток создает в катушке ЭДС

$$e = -d\psi/dt = -w d\Phi/dt = -w\Phi_m \cos \omega t \cdot \omega = E_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

где $E_m = w\omega\Phi_m$ – амплитуда ЭДС.

Как видно, ЭДС отстает от магнитного потока на угол 90° .

Если пренебречь падением напряжения на активном сопротивлении катушки и рассеянием магнитного потока, то по второму закону Кирхгофа

$$u = -e, \text{ т.е. } u = E_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right).$$

Напряжение тоже изменяется по гармоническому закону, но находится в противофазе с ЭДС.

Действующее значение ЭДС

$$E = E_m / \sqrt{2} = \omega 2\pi f \Phi_m / \sqrt{2} = 4,44\omega f \Phi_m.$$

С учетом равенства ЭДС и напряжения ($E \approx U$)

$$U = 4,44\omega f \Phi_m.$$

Отсюда амплитудное значение магнитного потока

$$\Phi_m = U / 4,44\omega f.$$

Ток в катушке совпадает по фазе с магнитным потоком и отстает от напряжения на 90° , как в идеальной индуктивной катушке.

Как ни странно, магнитный поток не зависит от качества стали. Более того, если даже убрать сталь, то магнитный поток не должен измениться. Следовательно, индукция магнитного поля внутри стали также не изменится: $\Phi_m = B_m S$.

Однако напряженность магнитного поля зависит от качества стали: $H_m = B_m / \mu_a$, и если сталь имеет высокую абсолютную магнитную проницаемость, то напряженность магнитного поля будет небольшая. В соответствии с законом полного тока напряженность магнитного поля пропорциональна потребляемому току:

$$H_m l_{cp} = I_m \omega,$$

где l_{cp} – средняя длина магнитной силовой линии по стали; I_m – амплитудное значение тока, создающего магнитный поток.

Таким образом, магнитный поток зависит от приложенного напряжения и не зависит от качества стали. Но чтобы создать этот магнитный поток в стали с низкой магнитной проницаемостью или в магнитопроводе, в котором имеется воздушный зазор, катушка будет потреблять значительно больший ток.

Это можно пояснить с помощью вольтамперной характеристики (ВАХ) катушки со сталью. Действительно, магнитная индукция и магнитный поток пропорциональны приложенному напряжению, а ток пропорционален напряженности магнитного поля. Следовательно, ВАХ повторяет кривую намагничивания $B = f(H)$ (рис. 3.16).

Если амплитудное значение напряжения U_{1m} находится в пределах линейного участка ВАХ, то ток i небольшой. Но если напряжение несколько увеличить (U_2), так что оно будет создавать индукцию, соответствующую участку насыщения, то амплитуда тока i_2 резко возрастет (см. рис. 3.16). При этом искажается и форма тока, которая будет отлична от синусоиды. Все это вызывает повышенный нагрев катушки.

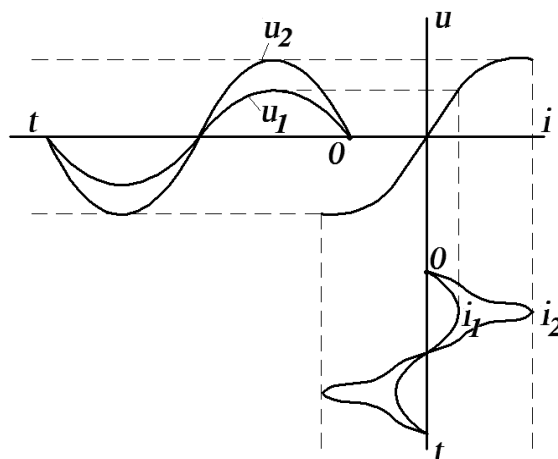


Рис. 3.16. Синусоиды напряжения и кривые тока в катушке со стальным сердечником

Вот почему в электротехнических устройствах число витков катушки и номинальное напряжение выбираются с таким расчетом, чтобы амплитудное значение индукции магнитного поля было меньше индукции насыщения, потому что даже незначительное повышение напряжения может вызвать перегрев катушки и стального сердечника.

3.12. Магнитные усилители

Магнитные усилители (МУ) широко применяются в схемах регулирования скорости электродвигателя, измерения постоянных токов, для плавного регулирования освещения и т.д.

Основным элементом МУ является дроссель, т.е. катушка со стальным сердечником. Как было показано выше, ВАХ катушки со сталью нелинейна. Идеальную катушку со сталью можно рассматривать как реактивный элемент, величина сопротивления которого $X_L = \omega L$ непостоянна.

МУ выполняется на Ш-образном сердечнике, на который наматываются две обмотки. Рабочая обмотка (РО) состоит из двух половин, каждая из которых располагается на крайних стержнях. Рабочая обмотка включается в сеть переменного тока последовательно с нагрузкой (рис. 3.17, а). Обмотка управления (ОУ) располагается на среднем стержне и включается в сеть постоянного тока последовательно с реостатом r_y , служащим для регулировки тока управления i_y .

Принцип усиления заключается в том, что с изменением величины постоянного тока в цепи управления изменяется ток в рабочей, силовой цепи нагрузки.

Действительно, РО формально можно рассматривать как реактивную катушку (индуктивность), сопротивление которой $X_L = \omega L$ зависит от индуктивности катушки. Но индуктивность, в свою очередь, зависит от напряженности магнитного поля.

При отсутствии тока в ОУ магнитная система МУ не насыщена и индуктивность L , и индуктивное сопротивление ωL РО очень велики и, следовательно, ток в нагрузке мал.

С ростом подмагничивающего тока i_y магнитная система насыщается, индуктивность и сопротивление переменному току рабочей обмотки падают, уменьшается падение напряжения на РО и увеличиваются напряжение и ток в нагрузке. Таким образом, изменяя ток в маломощной цепи управления, можно регулировать ток, напряжение, мощность нагрузки.

Коэффициент усиления по мощности МУ может достигать нескольких десятков тысяч.

Если нагрузка рассчитана на питание постоянным током, то ее включают через выпрямитель. На рис. 3.17, б показана схема включения обмотки якоря машины постоянного тока с возможностью изменения напряжения на ее зажимах с помощью магнитного усилителя.

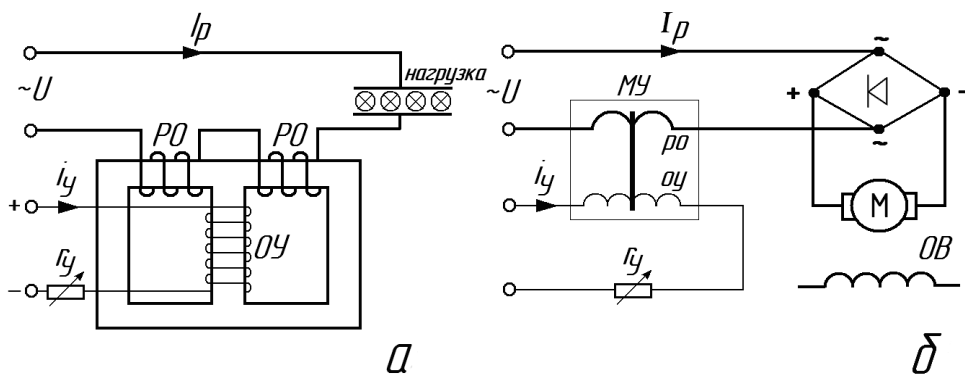


Рис. 3.17. Схема регулирования напряжения с помощью магнитного усилителя в нагрузке переменного тока (а) и постоянного тока (б)

Магнитный усилитель может иметь несколько обмоток управления, например, обмотку смещения для того чтобы он реагировал на полярность управляющего тока или обмотку обратной связи для повышения коэффициента усиления.

Высокий коэффициент усиления, большой срок службы обеспечивают МУ широкое применение в системах автоматического регулирования, измерения, контроля и управления. К недостаткам МУ следует отнести инерционность, что отрицательно сказывается на его быстродействии.

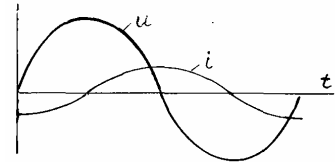
КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Рамка размером 10×10 см вращается со скоростью 3000 об/мин в однородном магнитном поле с индукцией 1 Т вокруг оси, проходящей через середину рамки и перпендикулярной к вектору магнитной индукции.

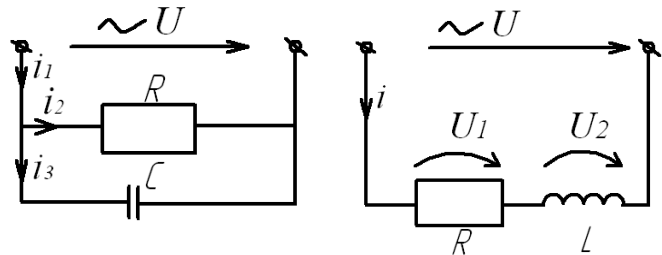
Определить амплитудное значение ЭДС, возникающей в рамке. Сколько витков должна иметь рамка, чтобы действующее значение ЭДС было равно 220 В?

2. Как записать в аналитической форме напряжение сети $U = 100$ В частотой 50 Гц?

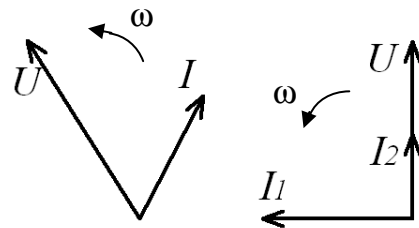
3. Построить качественно векторную диаграмму двух синусоидальных величин (см. рис.).



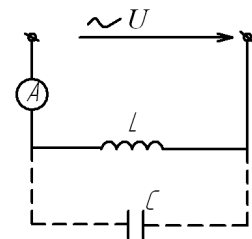
4. Построить качественно векторную диаграмму четырех обозначенных на рисунках синусоидальных величин.

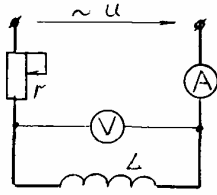


5. Составить электрическую цепь, соответствующую заданной векторной диаграмме (см. рис.).

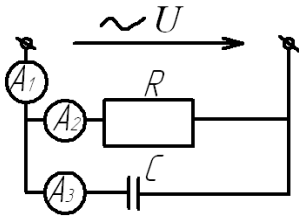


6. Как изменится показание прибора, если параллельно индуктивности включить емкость равного сопротивления (см. рис.)?

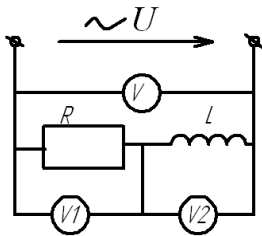




7. Как изменятся показания приборов, если сдвинуть движок реостата вниз (см. рис.)?



8. Чему равно показание третьего амперметра, если известны показания двух остальных (см. рис.)?
 $I_1 = 5 \text{ A}$, $I_2 = 4 \text{ A}$.



9. Чему равно показание третьего вольтметра, если показания двух $U_1 = U_2 = 100 \text{ В}$ (см. рис.)?

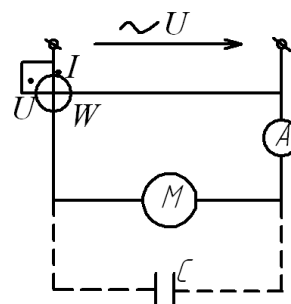
10. Как практически определить индуктивность реальной катушки?

11. Реальная катушка индуктивности подсоединена к генератору синусоидального напряжения. Изменится ли нагрев катушки, если увеличить частоту синусоидального напряжения без изменения амплитуды?

12. Как определить фазный сдвиг напряжения относительно тока в неизвестной нагрузке с помощью конденсатора и амперметра?

13. Как с помощью ваттметра и амперметра определить фазный сдвиг напряжения относительно тока в нагрузке с известным номинальным напряжением? Нарисовать схему эксперимента.

14. Как изменятся показания приборов, если параллельно электродвигателю подключить емкость? При этом ток конденсатора не превышает ток электродвигателя (см. рис.).



15. При включении реальной катушки индуктивности, конденсатора или их параллельного соединения ток синусоидального источника питания во всех трех случаях был одинаков. При каких условиях это возможно? Дать ответ с помощью векторной диаграммы.

16. Реальная катушка индуктивности включена в сеть переменного тока. Как изменится показание амперметра и ваттметра, если внутрь катушки вставить стальной сердечник? Потерями в стальном сердечнике пренебречь. Нарисовать схему включения катушки и приборов и дать краткое пояснение.

17. Катушка электромагнитного реле включается в сеть переменного тока. Будет ли отличаться ток в катушке в первоначальный момент времени по сравнению с током, установившимся после срабатывания реле?

18. Катушка со сталью включена в сеть синусоидального тока. Как изменится ток, потребляемый катушкой, и магнитный поток, если:

- 1) увеличить число витков катушки;
- 2) увеличить частоту питающего напряжения;
- 3) уменьшить сечение стали;
- 4) убрать стальной сердечник.

4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ

В 1981 г. русским ученым М.О. Доливо-Добровольским была создана трехфазная система. Он изобрел и разработал все звенья этой системы – генераторы, трансформаторы, двигатели и линии электропередачи. Трехфазная система токов имеет два основных преимущества по сравнению с однофазной:

1. Возможность получить вращающееся магнитное поле в неподвижной системе токов, благодаря чему трехфазные электрические машины просты по устройству, дешевы и надежны в эксплуатации.

2. При передаче электрической энергии трехфазная система наиболее экономична.

4.1. Получение трехфазной ЭДС

Трехфазной системой называют совокупность трех электрических цепей, называемых фазами, в которых действуют равные синусоидальные напряжения одной частоты, сдвинутые во времени на треть периода (т.е. по фазе на 120°). (Слово «фаза» имеет два различных смысла: как угол сдвига фаз между синусоидальными величинами, а в трехфазной системе чаще всего – как электрическая цепь).

Симметричную трехфазную систему ЭДС можно получить подобно однофазной, вращая три одинаковые рамки, сдвинутые в пространстве на 120° , с угловой скоростью ω в однородном магнитном поле (рис. 4.1).

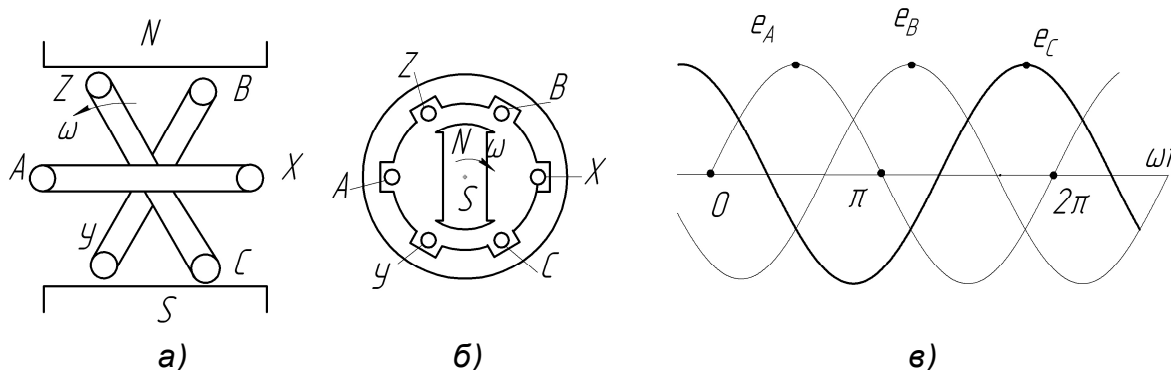


Рис. 4.1. Схемы для получения трехфазной ЭДС(а и б);
временная диаграмма (в)

В синхронном генераторе трехфазная ЭДС создается в обмотках, расположенных в пазах по внутренней поверхности статора, находящихся в переменном магнитном поле, создаваемом вращающимся электромагнитом.

том или постоянным магнитом (см. рис. 4.1, б). На рисунке для простоты катушки (фазы) показаны одним витком. А, В, С – начала фаз, X, Y, Z – концы соответствующих фаз.

Если начальную фазу (угол) ЭДС фазы А (обмотки) принять равной нулю, то ЭДС во второй фазе (В) будет повторять ЭДС фазы А с отставанием на треть периода, т.е. 120° . В свою очередь, ЭДС фазы С будет отставать от ЭДС фазы А на 240° или опережать ЭДС фазы А на 120° .

$$I_A = E_m \sin \omega t; \quad I_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ);$$

$$I_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ) \quad (\text{см. рис. 4.1, в}).$$

Условное графическое изображение обмоток (фаз) генератора показано на рис. 4.2, а и б. Они могут быть расположены или под углом 120° , или параллельно друг другу.

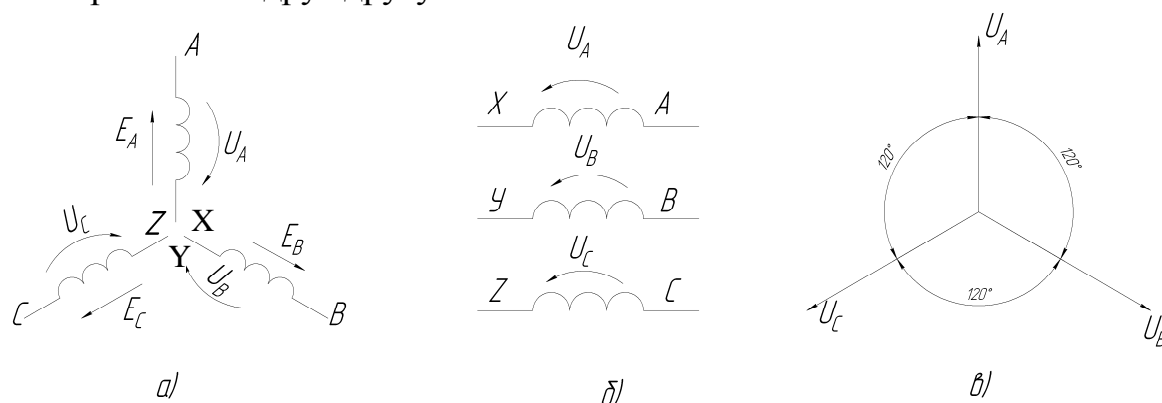


Рис. 4.2. Схемное обозначение фаз генератора (а, б) и векторная диаграмма напряжений на фазах (в)

Направления ЭДС в фазах выбирают произвольно, но единообразно, например, от конца обмотки к началу, считая, что потенциалы точек А, В и С больше потенциалов соответствующих концов обмоток X, Y и Z. В действительности такой ситуации быть не может (см. рис. 4.1, в), но для получения симметричных соотношений между напряжениями и токами во всех фазах такая условность является обязательной.

Направление первого вектора (напряжение U_A фазы А) выбирают на плоскости произвольно (вертикально вверх), а фазы напряжений U_B и U_C направляются в соответствии с их начальными фазами.

Если каждая фаза генератора питает свою нагрузку, то такая трехфазная система называется несвязанной. Такая шестипроводная трехфазная система не имеет преимуществ по сравнению с тремя однофазными системами, поэтому она не применяется. На практике трехфазный генератор и приемник связывают или звездой, или треугольником. Благодаря

этому трехфазный генератор и приемник соединяются не 6-ю, а 4-мя или 3-мя проводами, что является экономически более целесообразным.

Широко применяется схема соединения звезда – звезда с нулевым проводом.

4.2. Соединение генератора и приемника звездой

При соединении генератора звездой концы фаз (X, Y, Z) объединяют в одну точку, называемую нейтральной точкой или нейтралью. Аналогично соединяют приемник, а нейтральные точки генератора и приемника соединяют нейтральным проводом $N - N'$. Остальные три точки соединяют так называемыми линейными проводами $A - A'$, $B - B'$ и $C - C'$ (рис. 4.3).

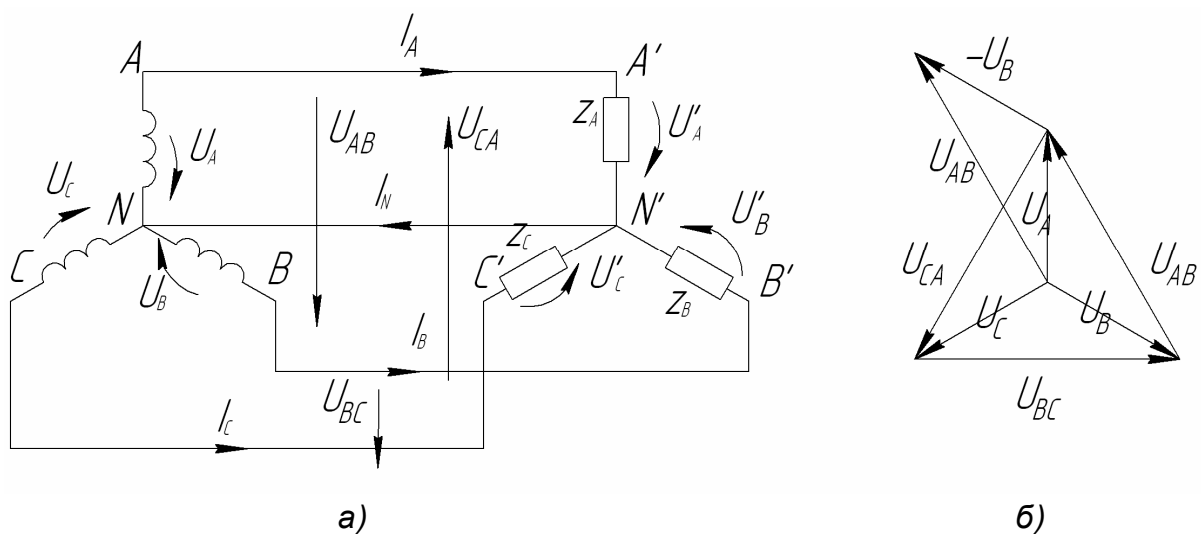


Рис. 4.3. Четырехпроводная трехфазная сеть

В трехфазных сетях различают фазные напряжения генератора (напряжения на обмотках, фазах) U_A, U_B, U_C , фазные напряжения приемника U'_A, U'_B, U'_C , линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} – напряжения между линейными проводами, фазные токи генератора, приемника и линейные токи. Как видно из рисунка, в схеме звезда – звезда фазные токи генератора равны соответствующим фазным токам приемника и линейным токам I_A, I_B, I_C .

Обычно пренебрегают падением напряжения в проводах, поэтому фазные напряжения генератора будут равны соответствующим фазным напряжениям приемника

$$\ddot{U}_A = \ddot{U}'_A, \quad \ddot{U}_B = \ddot{U}'_B, \quad \ddot{U}_C = \ddot{U}'_C.$$

Чтобы определить линейные напряжения, например, U_{AB} , необходимо геометрически сложить два напряжения – U_{AN} и U_{NB} , то есть $\underline{U}_{AB} = \underline{U}_{AN} + \underline{U}_{NB} = \underline{U}_A - \underline{U}_B$. На рис. 4.3, б показано сложение этих векторов, а суммарный вектор U_{AB} перенесли параллельно, соединив концы векторов \underline{U}_A и \underline{U}_B . Аналогично строятся векторы других линейных напряжений $\underline{U}_{BC} = \underline{U}_B - \underline{U}_C$ и $\underline{U}_{CA} = \underline{U}_C - \underline{U}_A$.

По векторной диаграмме легко вычислить величину линейных напряжений – они будут в $\sqrt{3}$ раз больше фазных напряжений.

Итак, при соединении генератора звездой

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

Принято при обозначении линейных напряжений индекс «л» опускать. И когда говорят о напряжении трехфазной сети, например, 380 или 660 В, то имеют в виду линейное напряжение.

Токи в фазах (они же являются линейными токами) легко определить по известным фазным напряжениям приемника и величинам сопротивлений фаз приемника

$$\dot{I}_A = \underline{U}_A / Z_A, \quad \dot{I}_B = \underline{U}_B / Z_B, \quad \dot{I}_C = \underline{U}_C / Z_C.$$

Ток в нулевом проводе по первому закону Кирхгофа определяется геометрической суммой линейных токов

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

Если нагрузка симметричная (токи в фазах равны и сдвинуты по отношению к своим напряжениям на одинаковый угол), то геометрическая сумма трех одинаковых векторов, сдвинутых между собой на 120° , будет равна нулю. То есть тока в нейтральном проводе не будет, следовательно, нулевой провод можно убрать. При этом напряжения на фазах приемника не изменятся и будут оставаться такими же, как на генераторе.

Таким образом, при симметричной нагрузке в схеме звезда – звезда нулевой провод не нужен. Например, все трехфазные двигатели, которые представляют собой типичную симметричную нагрузку, подключаются к трехфазной сети с помощью 3-х проводов. Обычно 4-й провод кабеля подключают не к нейтрали приемника, а к корпусу электродвигателя для безопасности обслуживающего персонала.

В этом случае, когда из-за повреждения изоляции какая-либо фаза будет касаться корпуса, то в цепи возникает короткое замыкание, срабатывает защита и отключается источник питания.

При несимметричной нагрузке, если фаза нагружена однофазными приемниками, например, осветительная сеть, нулевой провод необходим, чтобы все три фазы работали независимо друг от друга. Если в этом случае убрать нулевой провод, то возникает напряжение между нулем генератора и приемника $U_{N'N}$ и напряжения на фазах приемника искажаются. Возникает так называемый перекося фаз, когда уменьшается напряжение на наиболее нагруженной фазе и, напротив, увеличивается напряжение на слабо нагруженной фазе. Из-за перенапряжения возникает опасность выхода из строя приемников. При предельной перегрузке одной из фаз (короткое замыкание фазы нагрузки) на двух других фазах напряжение увеличивается до линейного значения, т.е. повышается напряжение на приемниках в $\sqrt{3}$ раз.

4.3. Соединение треугольником

При соединении генератора треугольником конец предыдущей фазы соединяют с началом последующей. В этом случае образуется сеть, линейное напряжение которой будет равно фазному напряжению $U_{AB} = U_A$; $U_{BC} = U_B$; $U_{CA} = U_C$; $U = U_\phi$.

Если приемник соединен треугольником (рис. 4.4, б), то все фазы приемника будут находиться под линейным напряжением.

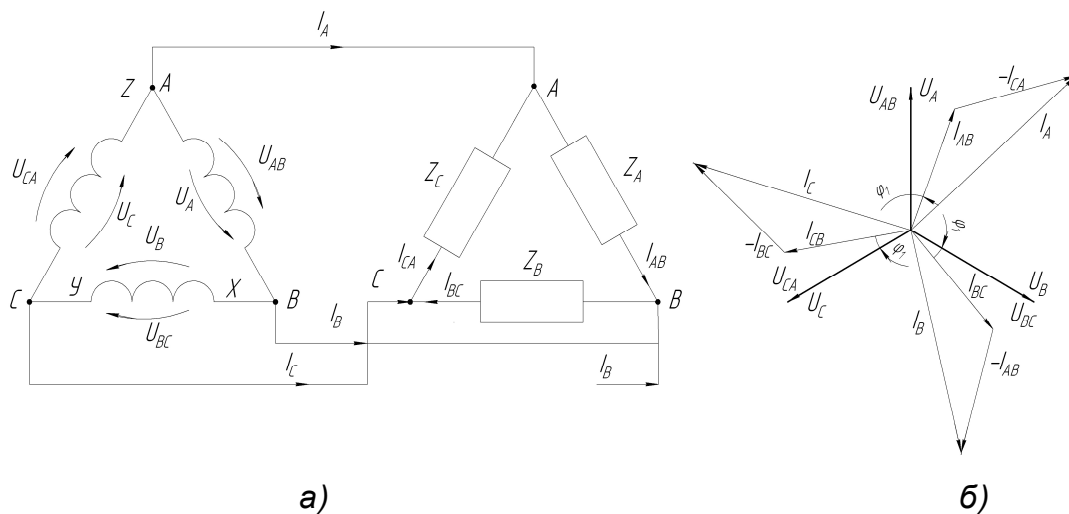


Рис. 4.4. Соединение треугольником: а – схема; б – векторная диаграмма

Зная напряжения на фазах и сопротивление нагрузки, легко подсчитать фазные токи нагрузки

$$\dot{I}_{AB} = \dot{U}_{AB}/Z_A; \quad \dot{I}_{BC} = \dot{U}_{BC}/Z_B; \quad \dot{I}_{CA} = \dot{U}_{CA}/Z_C.$$

Как видно, токи в каждой фазе не зависят от нагрузки в других фазах. Таким образом, соединение нагрузки треугольником обеспечивает независимую работу фаз.

Линейные токи можно определить по первому закону Кирхгофа для узловых точек А, В и С

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{CA}; \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{AB}.$$

На рис. 4.4, б показаны фазные токи нагрузки I_{AB} , I_{BC} и I_{CA} , которые отстают от приложенного к ним напряжения на углы φ_A , φ_B и φ_C , если нагрузка несет активно-индуктивный характер. Геометрическим построением определяют линейные токи.

Очевидно, если нагрузка симметрична ($I_{AB} = I_{BC} = I_{CA}$ и $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$), то линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше фазных.

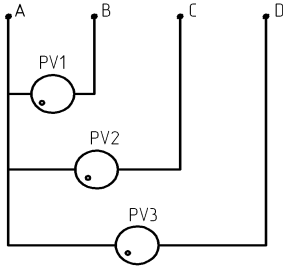
Итак, при симметричной нагрузке

$$I = \sqrt{3}I_\phi.$$

Схема соединения трехфазной цепи может быть не только звезда – звезда или треугольник – треугольник, но и звезда – треугольник или треугольник – звезда. Во всяком случае, схема соединения генератора и приемника должна обеспечить номинальное фазное напряжение приемника. Например, если фазное напряжение генератора равно 220 В, а номинальное фазное напряжение приемника 127 В, то генератор должен быть соединен треугольником, а приемник звездой.

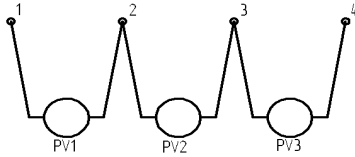
Если фазные напряжения генератора и приемника соответственно равны 127 и 220 В, то схема соединения должна быть звезда – треугольник. Если фазные напряжения одинаковы, то можно соединять по схеме или звезда – звезда, или треугольник – треугольник. В этом случае предпочтение отдают первой схеме, так как, передавая мощность при более высоком линейном напряжении, уменьшаем линейный ток, следовательно, эту же мощность можно передать на нагрузку проводом меньшего сечения.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

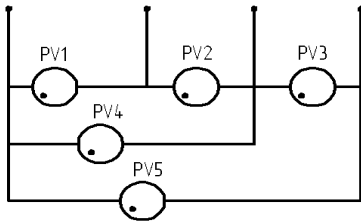


1. Определить показания вольтметров PV2 и PV3, подключенных к трехфазной сети, если вольтметр PV1 показал 220 В (см. рис.).

2. Какое минимальное количество измерений необходимо выполнить с помощью вольтметра, чтобы определить нейтральный провод и величину фазного и линейного напряжения трехфазной сети? Пояснить.



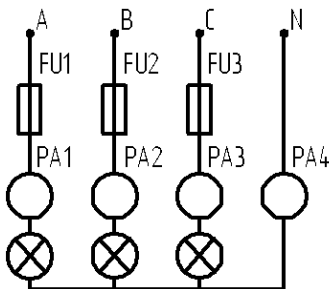
3. Определить нейтраль трехфазной сети по показанию трех приборов: PV1 – 220 В, PV2 – 220 В, PV3 – 380 В (см. рис.).



4. Определить показания приборов PV2 и PV3, включенных в трехфазную сеть, если показания остальных трех одинаковые и равны 380 В (см. рис.).

5. Как практически промаркировать 6 выводов трехфазного генератора (определить начала и концы всех обмоток) с использованием вольтметра и различных схем соединения этих обмоток?

6. Как следует соединить обмотки трехфазного генератора, чтобы получить наибольшее напряжение? Показать схему соединения и пояснить векторной диаграммой.



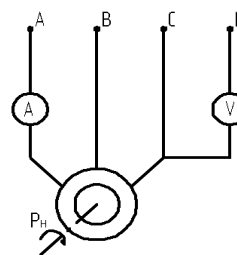
7. Какие последствия вызовет соединение обмоток генератора треугольником, если в одной из фаз перепутаны начало и конец обмотки?

8. Определить показание 4-го амперметра при симметричной нагрузке ($I_A = I_B = I_C = 1$ А) и показание всех четырех, если сгорел предохранитель фазы В (см. рис.).

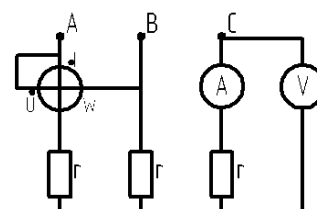
9. Как следует включить лампы накаливания с номинальным напряжением 220 В и вторичные обмотки трехфазного трансформатора, питающего эту нагрузку, с фазным напряжением 380 В, чтобы лампы горели нормально?

10. При соединении трехфазной симметричной нагрузки звездой линейный ток был равен 3 А. Как изменится линейный ток, если эту нагрузку соединить треугольником?

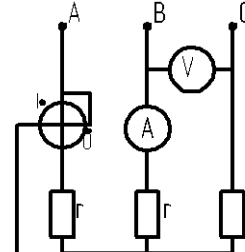
11. Чему равно показание амперметра, если мощность трехфазной симметричной нагрузки $P_H = 3$ кВт, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$, а показание вольтметра – 380 В (см. рис.)?



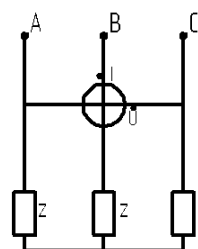
12. Что покажет ваттметр при симметричной активной нагрузке, если показания двух других приборов равны 10 А и 220 В (см. рис.)?



13. Что покажет ваттметр при симметричной активной нагрузке, если показания двух других приборов равны 10 А и 220 В (см. рис.)?



14. Почему показание ваттметра будет пропорционально реактивной мощности симметричной нагрузки, точнее, в $\sqrt{3}$ раз меньше реактивной мощности всей цепи (см. рис.)?



15. Фазное напряжение трехфазного генератора, соединенного звездой, равно 220 В. Чему будут равны линейные напряжения, если нейтраль образуют концы двух фаз и начало третьей? Решение пояснить векторной диаграммой.

16. Активная симметричная нагрузка, соединенная треугольником, потребляет линейный ток 52 А. Как изменятся фазные и линейные токи, если:

- а) отключить одну из фаз нагрузки;
- б) перегорел предохранитель в одной из линий.

Нарисовать обе схемы, обозначить и подписать числовые значения всех токов.

17. Трехфазный генератор и равномерная активная нагрузка соединены по схеме звезда – звезда без нулевого провода. Какое напряжение было до и стало после на фазах нагрузки, если:

- а) произошел обрыв одного из линейных проводов;
- б) произошло короткое замыкание фазы.

Линейное напряжение 380 В. Сделать рисунки и подписать числовые значения требуемых напряжений.

18. Какое напряжение создается на крайних клеммах, если все три обмотки трехфазного генератора соединены:

- 1) последовательно и согласно, т.е. конец 1-й фазы – с началом 2-й, конец второй – с началом 3-й;
- 2) любым другим способом.

19. Шесть непромаркированных выводов обмоток трехфазного генератора необходимо соединить треугольником. Как, пользуясь вольтметром, правильно соединить обмотки генератора? Какие последствия вызовет неправильное соединение обмоток трехфазного генератора треугольником?

20. Измерение напряжения между проводами трехпроводной трехфазной сети во всех трех случаях дало одинаковый результат – 380 В. Можно ли в эту сеть включить 3 лампы, рассчитанные на напряжение 220 В?

21. Три одинаковых резистора включены в трехпроводную цепь треугольником. Как изменятся фазные и линейные токи:

- 1) при обрыве одного из проводов;
- 2) если сгорел один из резисторов.

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И СХЕМЫ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ

Электрические аппараты – это устройства для управления, регулирования, контроля и защиты электрических цепей. С помощью аппаратов устанавливаются различные режимы работы технологического оборудования.

Аппараты рассчитаны на определенное напряжение, ток, мощность. По способу управления различают аппараты неавтоматического, ручного управления и аппараты автоматического управления. К первым относятся выключатели, переключатели, кнопки, реостаты, дроссели и др., а ко вторым – плавкие предохранители, различные реле, контакторы, автоматические воздушные выключатели (автоматы), электромагниты, электромагнитные муфты и прочие устройства.

5.1. Аппараты ручного управления

Рубильники служат для включения и отключения электрических цепей постоянного и переменного тока напряжением до 500 В. Рубильники могут быть одно-, двух- и трехполосными. Одной из разновидностей рубильников является совмещенный рубильник-предохранитель, у которого контактные ножи заменены предохранителями. Рубильники, изготавливаемые на большие токи, снабжаются специальными дугогасящими приспособлениями. В станкостроении рубильники изредка употребляют лишь в качестве вводных выключателей (разъединителей). Этот вводный рубильник не предназначен для отключения рабочего тока электродвигателя, а служит лишь для снятия напряжения со схемы станка, например, в случае длительного перерыва в работе.

Пакетный выключатель представляет собой малогабаритный отключающий аппарат для цепей переменного тока до 380 В и постоянного тока 220 В, рассчитанный на токи от 4 до 160 А. Он используется для пуска небольших двигателей в силовых цепях, а также применяется во вспомогательных цепях управления и сигнализации. Схемы кулачковых переключателей снабжают таблицами переключений. В них для каждого положения аппарата указано, какие контакты замкнуты.

Контроллеры применяются для переключений в силовых цепях электроприводов, содержащих большое число переключаемых цепей, и при большой частоте переключений (например, для управления крановыми двигателями). Каждому положению барабана, т.е. каждому углу поворота рукоятки соответствует своя схема соединения контактов.

Тумблеры – малогабаритные одно- или двухполосные переключатели, которые используются в слаботочных цепях, в частности, в цепях электрического освещения станка.

Кнопки являются слаботочными коммутационными аппаратами и могут иметь различные контакты: замыкающие, размыкающие или те и другие. Кнопки часто используются для включения и отключения силовых аппаратов, контакторов. Для управления электродвигателями из отдельных кнопок комплектуют кнопочные посты (станции).

Путевой переключатель – аппарат, замыкающий или размыкающий цепи управления, когда движущийся элемент машины достигает определенной точки пути. Когда путевые переключатели установлены на концах пути, их называют конечными выключателями. Путевые переключатели, снабженные пружиной, возвращающей контакты переключателя в исходное положение после прекращения воздействия упора, называют переключателями с самовозвратом. Переключатели, отличающиеся малыми габаритами, называют микропереключателями.

5.2. Аппараты автоматического управления

Тепловое реле. Тепловое реле предназначено для защиты электродвигателя от недопустимого перегрева, вызванного сравнительно небольшой по величине, но продолжительной перегрузкой.

В тепловом реле (рис. 5.1) контролируемый ток двигателя в какой-либо фазе, проходя по резистору 1, нагревает его, и эта теплота передается биметаллической пластинке 2. При перегрузке эта пластинка сильно нагревается, прогибается вверх и освобождает рычаг 3, который под действием растянутой пружины 4 поворачивается против часовой стрелки. В результате разрывается размыкающий контакт 5 под действием сжатой пружины 6 и выдвигается вверх кнопка 7, положение которой свидетельствует о срабатывании теплового реле. Контакт теплового реле должен подавать сигнал на выключение силовой цепи. После остывания биметаллической пластинки (около 1,5 мин) нажатием на кнопку 7 приводят реле в исходное положение. В некоторых реле возврат в исходное положение осуществляется самопроизвольно. Выдержка времени теплового реле зависит от степени перегрузки и температуры окружающей среды, если в реле не предусмотрена температурная компенсация.

Для защиты трехфазной нагрузки используются двухполосные или трехполосные реле, имеющие два или три резистора-нагревателя. Так как

резисторы включаются последовательно с нагрузкой, они должны иметь очень маленькое сопротивление, чтобы не изменять величину тока в силовой цепи. Буквенное обозначение теплового реле – КК.

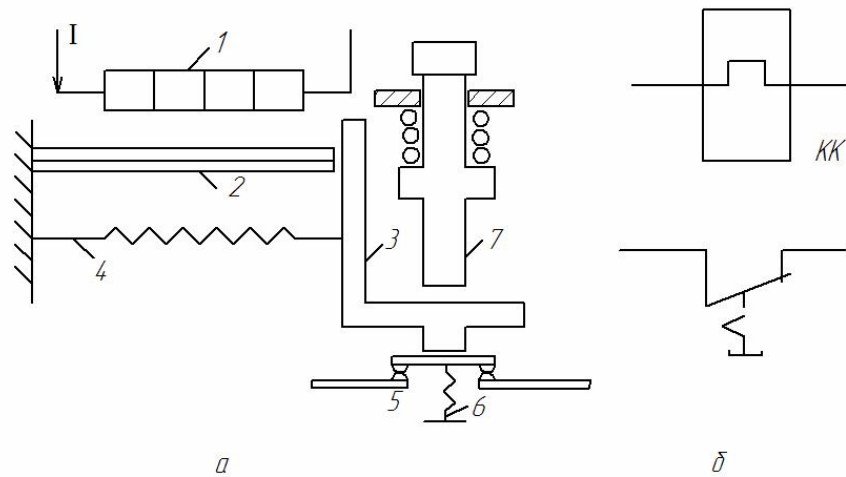


Рис. 5.1. Тепловое реле:
а – устройство; *б* – условное графическое обозначение

Электромагнитные реле. Реле – аппарат, служащий для коммутации (включения, отключения, изменения режима работы) электрической нагрузки небольшой мощности. Реле относятся к аппаратам автоматики и коммутируют небольшие токи (до единиц ампер) при невысоком напряжении (до сотен вольт). На рис. 5.2 схематически показано устройство электромагнитного реле.

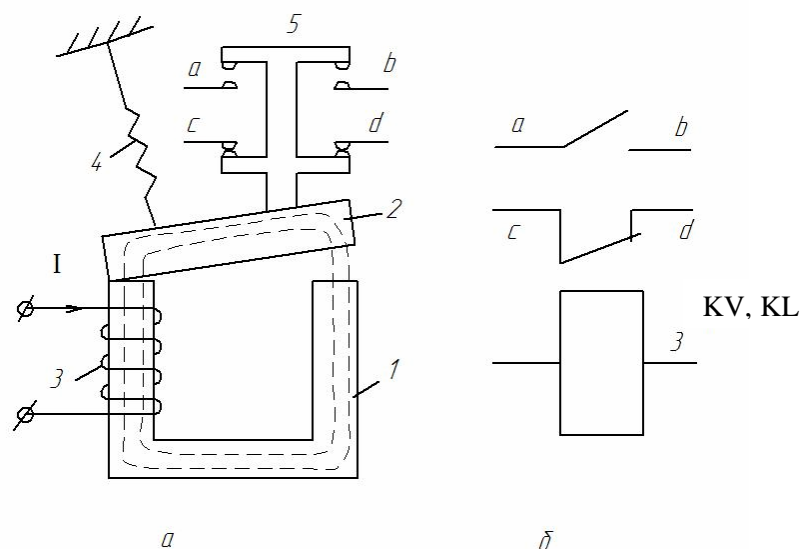


Рис. 5.2. Электромагнитное реле:
а – устройство; *б* – условное графическое обозначение

Если через обмотку 3 проходит ток I , то создается магнитный поток, замыкающийся по стальному сердечнику 1 и якорю 2. При достаточно большом токе I (точнее, мдс Iw) якорь, преодолевая действие растянутой пружины 4, притягивается к сердечнику и с помощью контактных мостиков, жестко связанных с якорем, замыкаются контакты $a - b$ и размыкаются контакты $c - d$. На схемах показывают условное графическое изображение элементов реле – катушку 3 и его контакты в исходном состоянии реле, то есть при обесточенной катушке (см. рис. 5.2, б).

В зависимости от электрического сопротивления и соответственно способу включения катушки различают **реле напряжения** и **реле тока**.

Катушка реле напряжения имеет большое число витков, следовательно, высокое омическое сопротивление и должна быть включена на указанное в паспорте номинальное напряжение, при котором реле срабатывает. Потребляемый ток катушки небольшой, до 1 А.

Реле напряжения могут быть использованы в качестве промежуточных реле, когда возникает необходимость «размножения» контактов какого-либо аппарата, а также для усиления маломощных сигналов. Этот сигнал подается в слаботочную цепь катушки реле, контакты которого могут коммутировать значительно бóльшие токи.

Катушка реле тока имеет небольшое число витков, выполняется проводом достаточно большого сечения, имеет небольшое по сравнению с нагрузкой сопротивление и включается последовательно с ней.

По роду цепи, в которую включается катушка, различают реле постоянного и переменного тока. Реле переменного тока имеет шихтованный магнитопровод подобно трансформатору, т.е. сердечник и якорь для уменьшения потерь на вихревые токи набираются из листов электротехнической стали. Кроме того, для исключения вибрации реле часть магнитопровода охватывается медным короткозамкнутым витком.

Реле тока и напряжения – это реле мгновенного действия. Время от момента включения катушки до срабатывания его контактов составляет несколько миллисекунд.

В частности, для уменьшения инерционности реле тока его подвижную систему стремятся сделать очень легкой. При этом понятно, что контакты реле тока могут быть выполнены только слаботочными. Буквенное обозначение реле тока – КА, промежуточного реле – КЛ.

По времени действия различают реле мгновенного действия и реле времени, контакты которого срабатывают с выдержкой времени.

Электромагнитное реле времени постоянного тока. Выдержка времени (около 5 с) создается обычно при отпускании якоря за счет массивной медной трубки, насаженной на магнитопровод реле. При отключении катушки реле, когда магнитный поток уменьшается, в медной трубке возникает ток, создающий свой магнитный поток. По закону Ленца он будет стремиться поддержать спадающий поток, и якорь отойдет от сердечника не сразу, а с выдержкой времени.

Пневматическое реле времени. Реле имеет электромагнитный привод с воздушным замедлителем. Выдержку времени реле, т.е. величину промежутка времени с момента включения электромагнита до срабатывания контактной системы можно плавно регулировать винтом, изменяя сечение канала, по которому проходит воздух. Выдержка времени пневматического реле регулируется в пределах от 0,4 до 180 с и может быть создана в различных типах реле как при включении катушки, так и при отключении электромагнита.

Реле времени с часовым механизмом. Замедление срабатывания контактов после включения обмотки реле или после ее выключения обеспечивается часовым механизмом, запускающимся в работу подвижной частью электромагнита. Выдержка времени при этом имеет такой же порядок, как и в пневматических реле времени.

Электронное реле времени. Время с момента подачи сигнала до срабатывания реле регулируют, как правило, временем заряда или разряда конденсатора с помощью электронной схемы. Выдержку времени в зависимости от типа реле можно получить от 1 с до 15 мин. Буквенное обозначение реле времени – КТ.

Контакты. Контакт – это электромагнитный аппарат, предназначенный для частых дистанционных включений и отключений силовой электрической цепи при нормальном режиме работы. Принцип действия контактора аналогичен работе электромагнитного реле. Контактors различаются: по роду тока – постоянного и переменного тока; по числу главных контактов – одно-, двух- и многополосные; по конструкции электромагнита – с якорем клапанного типа и с прямоходовым якорем; по способу гашения дуги – с магнитным гашением и дугогасительной решеткой.

Кроме главных, силовых контактов контактор может иметь несколько вспомогательных, или блокировочных, слаботочных замыкающих и размыкающих контактов, предназначенных для работы в цепях управления, например, в цепи катушек аппаратов управления.

Контакторы постоянного тока изготавливаются с одним или двумя полюсами на номинальные токи от несколько единиц до 2500 А. Главные контакты способны отключать токи перегрузки до 10-кратных от номинального тока. Катушки контакторов постоянного тока имеют большое число витков и обладают значительной индуктивностью, что является причиной возникновения дуги при размыкании цепей этих катушек. Номинальное напряжение катушек контакторов постоянного тока – 110, 220 В.

Контакторы переменного тока имеют магнитопровод, который набирается из листов электротехнической стали. Для уменьшения гудения и вибрации, также как и в реле, применяется медный короткозамкнутый виток, охватывающий часть сечения магнитопровода. Как правило, контактор переменного тока трехполосный. Катушка контактора при включении потребляет начальный ток, в 8 – 15 раз превышающий рабочий ток при втянутом якоре. Это обусловлено значительной зависимостью индуктивного сопротивления катушки от величины воздушного зазора в магнитной системе контактора. При отключенном контакторе зазор большой, поэтому индуктивное сопротивление мало и полное сопротивление катушки определяется в основном ее активным сопротивлением. Когда контактор включен, зазор минимальный, индуктивное сопротивление становится намного больше активного, поэтому полное сопротивление катушки значительно возрастает и ток уменьшается. Контакторы переменного тока изготавливаются на номинальные токи до 600 А с числом полюсов от одного до пяти.

Все контакторы постоянного и переменного тока должны четко включаться и надежно работать при изменениях напряжения сети от 85 до 105 %.

Буквенное обозначение контактора – КМ.

Автоматические воздушные выключатели (автоматы). Автоматы предназначены для защиты электрооборудования и приборов при коротких замыканиях и перегрузках. В установках трехфазного переменного тока применяются трехполосные автоматы, в установках однофазного переменного или постоянного тока – двухполосные и однополосные.

Принципиальная схема однополосного автомата показана на рис. 5.3.

Автомат изображен во включенном состоянии. В защищаемую цепь с током I через главный контакт 1 включены последовательно два реле – тепловое и максимальное токовое, называемые соответственно тепловым и электромагнитным расцепителями автомата.

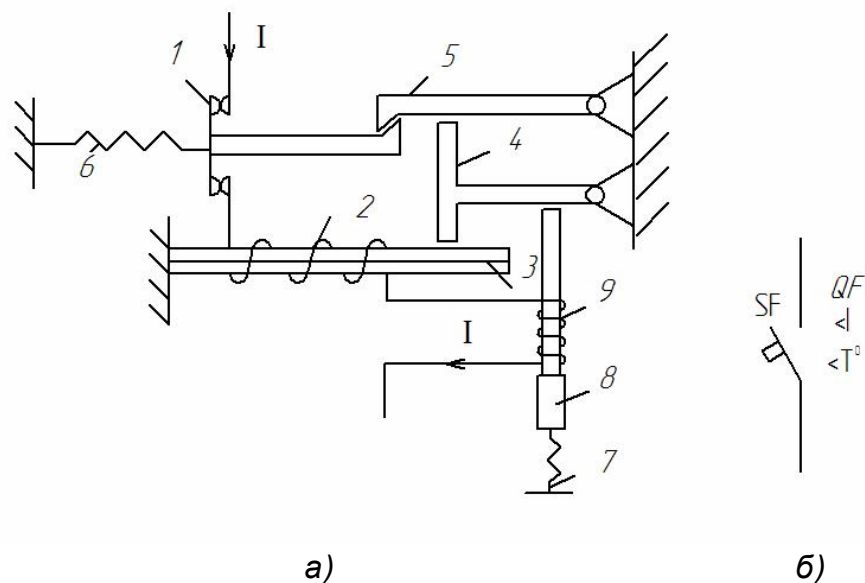


Рис. 5.3. Автоматический воздушный выключатель:
 а – устройство; б – условное графическое изображение

Когда в цепи возникает незначительная перегрузка, в нагревательном элементе 2 теплового реле выделяется больше теплоты, в результате чего биметаллическая пластинка 3 перегревается и прогибается вверх, поворачивая рычаг 4, который приподнимает защелку 5. При этом растянутая пружина 6 размыкает главный контакт. Аналогично действует электромагнитный токовый расцепитель, но при значительной перегрузке, например, при коротком замыкании. Электромагнитная сила от тока, во много раз превышающего номинальное значение, преодолевая усилие растянутой пружины 7, втягивает ферромагнитный сердечник 8 внутрь катушки 9, что влечет за собой поворот рычага 4 по часовой стрелке, и таким образом вызывает срабатывание автомата, т.е. размыкание главных контактов. Кроме главных контактов автоматы могут иметь и слаботочные блок-контакты, используемые в схеме сигнализации или автоматики.

Включается автомат вручную, кнопкой или рукояткой; вручную он может быть и отключен. Двух- или трехполосные автоматы снабжаются расцепителями в каждом полюсе и отключают одновременно все цепи при срабатывании любого из расцепителей. Некоторые автоматы не имеют тепловых расцепителей.

Буквенное обозначение силовых автоматов – QF, а автоматов, работающих в слаботочных цепях (цепях управления, защиты), – SF.

5.3. Максимальная токовая защита электрических цепей

Одной из основных задач электротехники является обеспечение нормальных условий работы системы «источник питания – нагрузка». Большую часть электрической нагрузки составляют электродвигатели. В процессе эксплуатации возможны различные режимы работы нагрузки, которые влияют не только на работу нагрузки, но и на все звенья электрической цепи – источник питания и линию передачи.

Токовая перегрузка вызывает нагрев изоляции электрооборудования свыше допустимого значения, преждевременное ее старение и, как следствие, резкое сокращение срока службы оборудования. Значительные перегрузки и токи короткого замыкания вызывают не только тепловое разрушение изоляции обмоток электрических машин и подводных проводов, но и непосредственное разрушение обмоток и проводов.

Для защиты от токовых перегрузок используют предохранители, тепловые реле, токовые реле, автоматические воздушные выключатели (автоматы).

Как известно, тепловые реле инерционны и срабатывают не мгновенно с возникновением перегрузки, а с задержкой во времени, величина которой обратно пропорциональна степени перегрузки. Такая инерционность удобна для цепи, в которой возникают незначительные кратковременные перегрузки, не вызывающие перегрев изоляции и, тем более, не угрожающие целостности электрической цепи. Мгновенное отключение в этом случае было бы нецелесообразным. Длительные, даже незначительные перегрузки являются опасными практически для всех приемников, и защита электрической цепи в этом режиме может быть обеспечена тепловым реле.

При значительных, пусть даже кратковременных токовых перегрузках, угрожающих целостности обмоток приемника, защита, основанная на использовании теплового реле, в силу своей инерционности не сможет своевременно сработать и отключить источник питания до выхода из строя того или иного электрооборудования. В этом случае используется токовое реле – аппарат практически мгновенного действия, работающий на электромагнитном принципе.

Если значительная перегрузка кратковременна и не угрожает целостности цепи, то дополнительно к токовому реле необходимо в схему защиты включить реле времени, которое бы не позволяло сработать защите мгновенно, а создавало выдержку времени для устранения перегрузки.

Например, для изготовления щебня используется дробилка, представляющая собой два массивных барабана, которые мощным двигателем вращаются в противоположные стороны. В щель между барабанами сверху поступают камни, которые дробятся, превращаясь в щебенку.

Если между валками попадает массивный металлический предмет, создающий большой тормозной момент, то двигатель, стремясь создать такой же вращающий момент, будет потреблять большой ток из сети. Преодолевая действие сжимающих валки пружин, из-за возросшего вращающего момента валки расходятся, металлический предмет проваливается, и пружины вновь устанавливают прежний зазор.

В этом случае мгновенное отключение двигателя при перегрузке нежелательно из-за проблем, связанных с остановкой и пуском мощного электродвигателя. Кроме того, прерывается технологический процесс дробления.

Простейшая схема защиты нагрузки с помощью теплового реле показана на рис. 5.4, а.

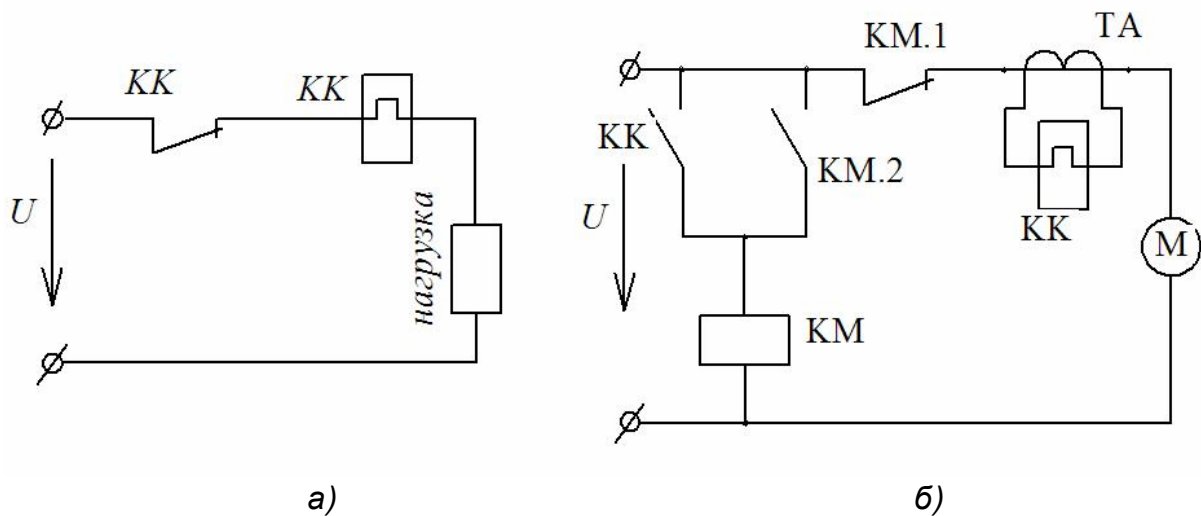


Рис. 5.4. Тепловая защита электрических цепей:
а – для маломощной нагрузки; *б* – для силовых цепей

Воспринимающая часть аппарата защиты – нагревательный элемент (обмотка) – должен контролировать величину тока, следовательно, должен включаться последовательно с нагрузкой. Чтобы нагревательная обмотка не изменяла ток в цепи, ее сопротивление должно быть минимальным. Исполнительная часть теплового реле – размыкающий контакт – также включен последовательно с нагрузкой.

Когда ток в цепи относительно длительное время превышает номинальный ток теплового реле, последнее срабатывает и размыкает свой контакт КК, обесточивая нагрузку. После остывания нагревательного элемента контакт теплового реле вновь замыкается, и снова включается нагрузка. В таком циклическом режиме работает утюг.

В большинстве случаев после срабатывания защиты необходимо выявить и устранить причины ненормального режима. В этом случае, чтобы исключить самопроизвольное включение нагрузки после срабатывания защиты, можно использовать тепловое реле с контактом без самовозврата (см. рис. 5.1, б).

Контакты теплового реле, как правило, рассчитаны на ток до 5 А. Если требуется организовать тепловую защиту более мощных цепей, то включение и отключение таких цепей может осуществляться силовыми контактами контактора. Схема тепловой защиты мощных цепей показана на рис. 5.4, б. Она состоит из двух цепей: силовой – цепи питания нагрузки и слаботочной – цепи управления. Если обмотка теплового реле не рассчитана на большой ток, то ее можно включить через трансформатор тока ТА, ток вторичной обмотки которого будет в K (коэффициент трансформации трансформатора тока) раз меньше первичного.

Так, если номинальный ток двигателя равен 40 А, а токового реле 2 А, то первичный ток следует уменьшить в $\frac{40}{2} = 20$ раз. Если вторичная обмотка трансформатора тока рассчитана на 5 А, то первичная обмотка должна быть рассчитана на $5 \cdot 20 = 100$ А. В этом случае необходимо выбрать трансформатор тока ТА 100/5.

Напряжение источника питания в цепи управления должно соответствовать номинальному напряжению обмотки контактора КМ. Если номинальные напряжения двигателя и обмотки контактора совпадают, то обе схемы могут питаться от одного источника.

При перегрузке силовой цепи срабатывает тепловое реле КК, которое своим замыкающим контактом включает питание обмотки контактора в цепи управления. После срабатывания контактора размыкается контакт КМ.1 в силовой цепи и обесточивается нагрузка. Второй слаботочный контакт КМ.2 шунтирует контакт КК. В этом случае питание обмотки КМ происходит по двум цепям: через контакт КК и контакт КМ.2. Если после остывания биметаллической пластинки контакт КК разомкнется, то кон-

тактор будет оставаться в сработанном состоянии, так как обмотка питается через свой контакт КМ.2. Говорят, обмотка включена на самопитание.

Разорвать эту цепочку невозможно, так как для этого надо разомкнуть контакт КМ.2, а для того, чтобы разомкнуть этот контакт, необходимо обесточить катушку – замкнутый круг. Цепочку можно разорвать только отключением напряжения в цепи управления.

Рассмотренные схемы не обладают нулевой защитой, то есть защитой от самозапуска, так как при исчезновении напряжения питания по какой-либо причине, когда оно вновь восстанавливается, нагрузка вновь будет самопроизвольно включаться.

Токковую защиту можно организовать, например, по схеме на рис. 5.4, б, заменив в ней обмотку и контакт теплового реле КК на обмотку и контакт реле тока КА.

На рис. 5.5, а приведена схема питания электродвигателя М с максимальной токовой защитой, срабатывающей с выдержкой времени.

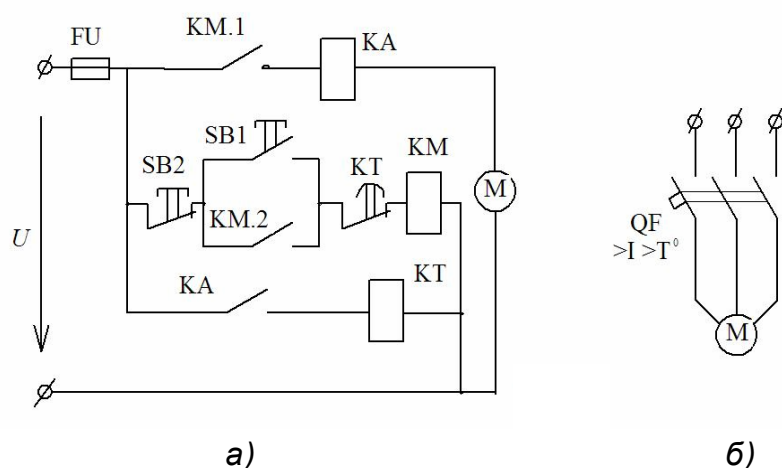


Рис. 5.5. Схема максимальной токовой защиты электродвигателя:
а – с помощью реле тока; б – с помощью автоматического воздушного выключателя

При нажатии на кнопку «Пуск» SB1 получает питание обмотка контактора КМ, который срабатывает и замыкает свои контакты КМ.1 и КМ.2. Первый подает питание на электродвигатель М, второй шунтирует кнопку SB1, и обмотка контактора включается на самопитание (кнопку можно отпустить). В нормальном режиме двигатель будет работать, пока не будет нажата кнопка «Стоп» SB2. В этом случае прерывается цепь питания обмотки контактора КМ, силовой контакт которого КМ.1 размыкается и обесточивает электродвигатель.

Значительная токовая перегрузка (например, заклинивание двигателя) вызывает срабатывание реле тока КА, контакт которого включает обмотку КТ. Реле срабатывает мгновенно, но контакт КТ размыкается с выдержкой времени. Если в течение этого времени перегрузка не снята, то контакт КТ размыкается и подобно кнопке «Стоп» размыкает цепь питания контактора, питание двигателя прерывается разомкнувшимся контактом КМ.1.

Предохранитель FU мгновенно отключает питание всей цепи при коротком замыкании.

Кроме того, данная схема предусматривает нулевую защиту, так как при кратковременном отключении питания двигатель не включается при появлении напряжения независимо от того, сохраняется ли перегрузка в цепи или нет. Для включения двигателя необходимо нажать на кнопку «Пуск».

Защита нагрузки (электродвигателя) может быть организована с помощью автоматического воздушного выключателя QF, снабженного тепловым и электромагнитным расцепителями (см. рис. 5.5, б). В других автоматах может отсутствовать тот или иной расцепитель.

В качестве примера организации максимальной токовой защиты трехфазной нагрузки рассмотрим схему пуска в ход асинхронного электродвигателя с помощью магнитного пускателя, в состав которого кроме контактора КМ и кнопочной станции с кнопками SB1 («Пуск») и SB2 («Стоп») входит тепловое реле КК и токовые реле КА (рис. 5.6).

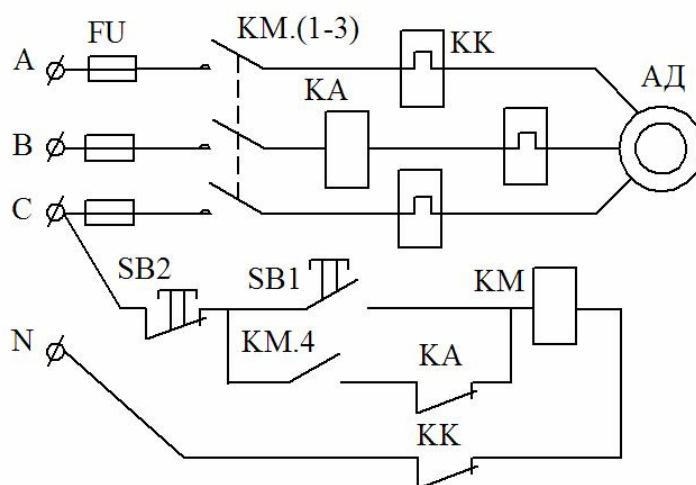


Рис. 5.6. Схема пуска в ход асинхронного электродвигателя с помощью магнитного пускателя, снабженного тепловой и токовой защитой

Воспринимающая часть реле защиты (обмотки) включена в силовую часть цепи последовательно с нагрузкой, а исполнительная часть – размыкающие контакты КК и КА – включены последовательно с цепью питания обмотки контактора.

Запуск двигателя. При нажатии на кнопку SB1 «Пуск» получает питание обмотка контактора КМ от фазного напряжения U_{CN} трехфазной цепи. Ток обмотки контактора проходит через размыкающий контакт SB2 кнопки «Стоп», замкнувшийся от нажатия контакт SB1 и размыкающий контакт КК теплового реле. При срабатывании контактора замыкаются его три силовых контакта КМ. (1 – 3) и получает питание обмотка статора асинхронного двигателя. Двигатель включается. Кроме того, замыкается контакт КМ.4 в цепи управления, обмотка контактора КМ становится на самопитание и кнопку SB1 можно отпустить, но питание обмотки контактора не прервется, так как кнопка SB1 будет зашунтирована замкнувшимся контактом КМ.4 и замкнутым контактом КА.

Выключение двигателя. Работу двигателя можно прервать, обесточив цепь питания обмотки контактора. Для этого достаточно разомкнуть контакт SB2, т.е. нажать на кнопку «Стоп». Но в данной схеме предусмотрено автоматическое отключение электродвигателя при аварийных режимах работы. Например, если увеличить механическую нагрузку на валу двигателя, при которой он будет потреблять ток выше номинального значения, срабатывает тепловое реле с некоторой выдержкой времени от начала перегрузки. При этом размыкается контакт КК, обесточивается обмотка контактора, его контакты устанавливаются в исходное разомкнутое положение.

Аналогично выключается двигатель при значительной токовой перегрузке. В этом случае срабатывает токовое реле КА и размыкает цепь питания обмотки контактора. В отличие от тепловой инерционной защиты реле тока является аппаратом мгновенного действия.

От токов короткого замыкания предусмотрена защита с помощью предохранителей FU. Перегорание плавкой вставки предохранителя непосредственно обесточивает цепь питания электродвигателя.

6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

6.1. Общие сведения

Измерением называется процесс сравнения заданной физической величины с некоторым ее значением, принятым за единицу. Измерение производится с помощью **измерительной аппаратуры**, включающей меры, измерительные приборы и измерительные преобразователи.

Меры – устройства, воспроизводящие единицы измерения тока, напряжения, сопротивления, емкости и т.д.

Измерительные приборы – устройства, при помощи которых производится сравнение измеряемой величины с мерами.

Измерительные преобразователи – устройства, служащие для расширения возможностей электроизмерительных приборов. К ним относятся шунты, добавочные сопротивления, усилители, измерительные трансформаторы и т.д.

Различают **рабочие меры и измерительные приборы**, которые используются для измерения в производственных условиях и **образцовые меры и измерительные приборы**, служащие для градуировки и периодической поверки рабочих мер и измерительных приборов.

Эталоны являются образцовыми мерами, выполненными с наиболее возможной точностью, они служат для воспроизведения и хранения единиц измерения.

В зависимости от способа измерения измерительные приборы делятся на **показывающие** (стрелочные приборы и счетчики) и **приборы сравнения** (мосты, потенциометры).

Как бы тщательно не проводили измерение, всегда имеется разница между измеренным значением физической величины A_x и ее действительным значением A .

Различают **абсолютную погрешность** $\Delta A = A_x - A$, **относительную погрешность** $\gamma = \frac{\Delta A \cdot 100}{A} \%$ (приблизительно $\gamma \approx \frac{\Delta A \cdot 100}{A_x} \%$), **приведенную погрешность** $\gamma_{пр} = \frac{\Delta A \cdot 100}{A_n} \%$. Здесь A_n – верхний предел измерения измерительного прибора. Абсолютная погрешность на разных участках шкалы не одинакова. Обычно прибор имеет наименьшую абсолютную по-

грешность в середине шкалы. Класс точности прибора оценивается по наибольшей приведенной погрешности $\gamma_{np \max} = \frac{\Delta A_{\max}}{A_n} \cdot 100\%$.

Образцовые и рабочие измерительные приборы делятся на следующие классы точности: 0,01; 0,02; 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1; 1,5; 2,5.

Задача. Определить, в каких пределах лежит истинное значение измеряемого тока, если амперметр класса точности 2,5, рассчитанный на 10 А, показал 4 А.

Решение

Наибольшая относительная погрешность амперметра

$$\Delta I_{\max} = \frac{\gamma_{np \max} I_n}{100} = \frac{2,5 \cdot 10}{100} = 0,25 \text{ А}.$$

Считая, что наибольшая абсолютная погрешность может быть на любом участке шкалы, $I = 4 \pm 0,25 \text{ А}$. Истинное значение тока лежит в пределах от 3,75 А до 4,25 А.

Очевидно, что относительная погрешность тем меньше, чем больше измеряемый ток. Так, если прибором, рассчитанным на 10 А, измерять значительно меньшие токи, например, 0,5 А, то относительная погрешность

$$\gamma = \frac{\Delta I \cdot 100}{I_x} = \frac{0,25 \cdot 100}{0,5} = 50 \%, \text{ то есть может достигать } 50 \%. \text{ Вот почему}$$

при выборе прибора стремятся, чтобы предполагаемое значение измеряемой величины соответствовало положению стрелки прибора за серединой шкалы.

6.2. Принцип действия и устройство приборов

Наиболее употребительны приборы магнитоэлектрической, электромагнитной, электродинамической и индукционной систем. Принцип работы этих приборов подчиняется общему закону.

Любая электромагнитная система, связанная с источником энергии, стремится занять положение, соответствующее наибольшей энергии магнитного поля.

6.2.1. Приборы магнитоэлектрической системы

На рис. 6.1 показаны основные детали прибора магнитоэлектрической системы.

Постоянный магнит 1 служит для создания магнитного поля, замыкающегося по магнитопроводу 2 и воздушному зазору, где располагается из-

мерительная рамка 3. Рамка вместе с цилиндрической частью магнитопровода может вращаться вокруг оси цилиндра. Стрелка прибора жестко связана с подвижной частью прибора и вместе со шкалой представляет собой отсчетное устройство 4. Пружина 5 создает противодействующий момент.

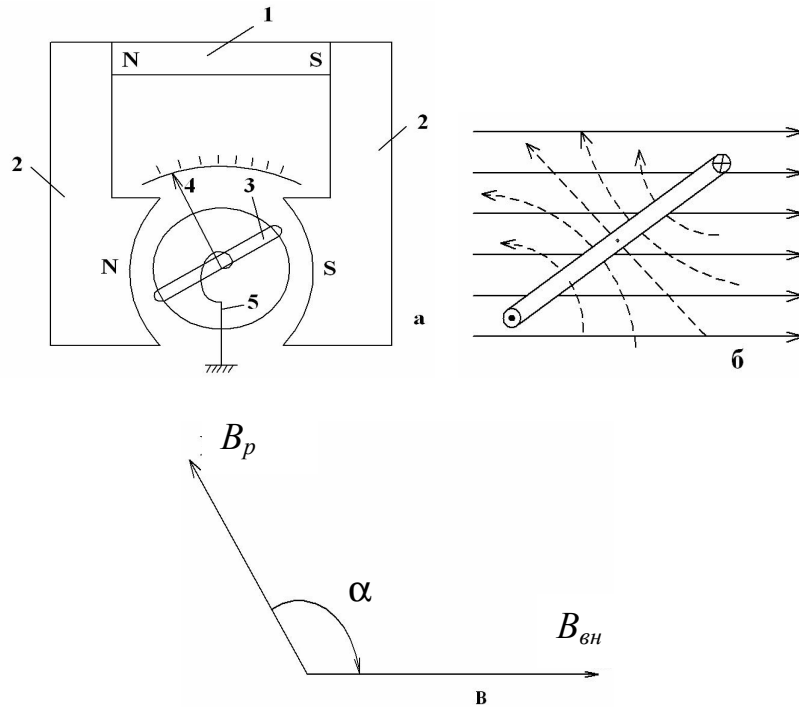


Рис. 6.1. Прибор магнитоэлектрической системы:
 а – устройство; б и в – направление магнитного потока и индукции

Если через рамку пропустить измеряемый ток в направлении, показанном на рис. 6.1, б, то сквозь рамку будут проходить два магнитных потока: внешний с индукцией $B_{вн}$ и поток, образованный током рамки, с индукцией B_p в центре рамки.

Чтобы общая энергия магнитного поля была наибольшей, эти потоки должны быть однонаправленными. Поэтому подвижная рамка будет стремиться повернуться на угол α (см. рис. 6.1, в), создавая вращающий момент $M_{вр}$. Если бы не было пружины, рамка поворачивалась бы на угол α независимо от величины измеряемого тока и соответственно вращающегося момента, пропорционального величине этого тока. Пружина создает противодействующий момент $M_{пр}$, пропорциональный углу закручивания рамки. Поэтому рамка будет поворачиваться на такой угол, при котором $M_{вр} = M_{пр}$. Следовательно, стрелка прибора будет поворачиваться на угол, пропорциональный току рамки (вращающему моменту) (рис. 6.2).

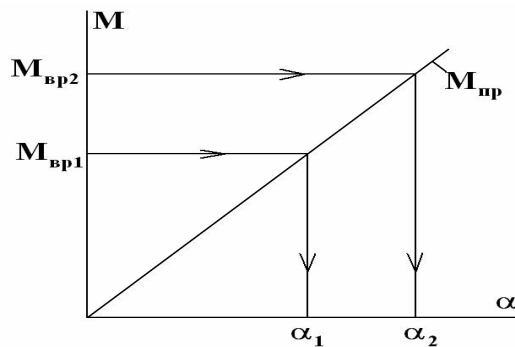




Рис. 6.2. Зависимость угла поворота рамки от величины вращающего момента

Приборы магнитоэлектрической системы имеют равномерную шкалу и применяются для измерения постоянных токов в качестве амперметров, вольтметров, гальванометров.

Приборы магнитоэлектрической системы обозначают буквой М, а графически  или .

Второе обозначение относится к **логометрам** – приборам, у которых противодействующий момент создается не пружиной, а дополнительной катушкой с током.

Основными достоинствами приборов магнитоэлектрической системы является высокая точность и чувствительность (прибор реагирует на малые токи), небольшое потребление энергии и равномерность шкалы.

6.2.2. Приборы электромагнитной системы

Устройство прибора и принцип действия можно пояснить по рис. 6.3. Если пропустить ток через неподвижную катушку, то создаваемое им магнитное поле может быть усилено за счет ферромагнитного якоря, который, имея возможность перемещаться вокруг оси, будет втягиваться внутрь катушки, где наиболее сильное магнитное поле. Как и в приборах магнитоэлектрической системы, с подвижной частью прибора связана стрелка, а для создания противодействующего момента используется или пружина, или дополнительная рамка с током (логометры) (см. рис. 6.3, а и б).

Втягивание якоря внутрь катушки будет происходить независимо от направления тока в обмотке, поэтому приборы электромагнитной системы могут работать в цепях и постоянного, и переменного тока. Буквенное обозначение приборов – Э. Шкалы приборов – неравномерные, и начальная их часть является нерабочей, поскольку из-за низкой чувствительности при

малых токах вращающий момент небольшой. Приборы просты, надежны в эксплуатации и недороги. Применяются в качестве амперметров и вольтметров в цепях постоянного и переменного тока, а логометры – как фазометры, фарадометры, герцметры. Большинство приборов электромагнитной системы относятся к рабочим и имеют класс точности 1,5 и 2,5.

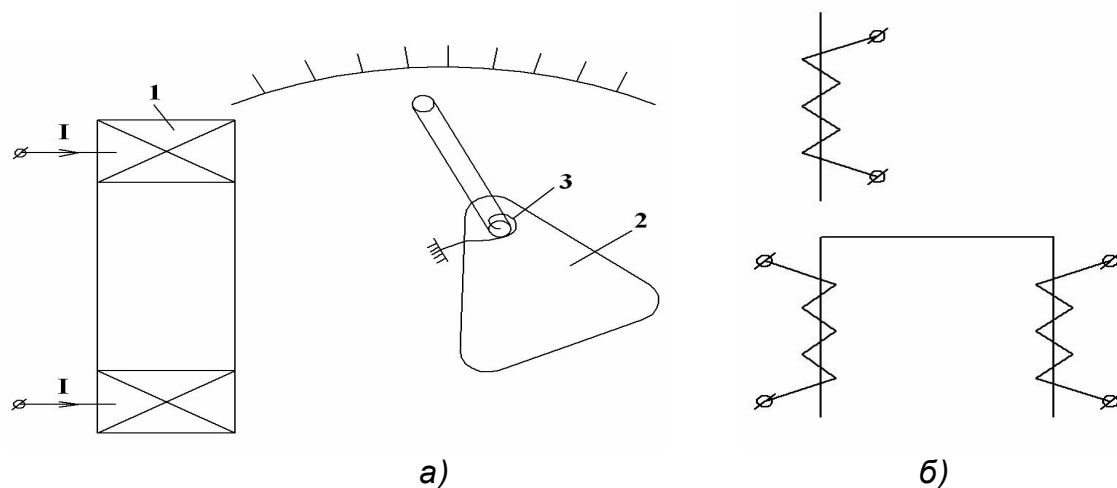


Рис. 6.3. Прибор электромагнитной системы:
а – устройство; б – графическое изображение

6.2.3. Приборы электродинамической системы

По принципу действия приборы электродинамической системы аналогичны приборам магнитоэлектрической системы, только здесь внешний магнитный поток создается не постоянным магнитом, а дополнительной неподвижной катушкой (рис. 6.4).

В этом случае угол отклонения стрелки прибора пропорционален произведению токов неподвижной и подвижной катушек $\alpha = kI_1I_2$. В цепи переменного тока на показание прибора влияет фазный сдвиг ψ между этими токами: $\alpha = kI_1I_2 \cos \psi$. Приборы используются в основном как ваттметры.

Неподвижную катушку выполняют из толстого медного провода (токовая катушка). Она практически не имеет сопротивления, и ее включают последовательно с нагрузкой как амперметр.

Подвижная катушка имеет большое число витков и выполняется из тонкого медного провода. Ее сопротивление значительное, и она включается параллельно нагрузке подобно вольтметру.

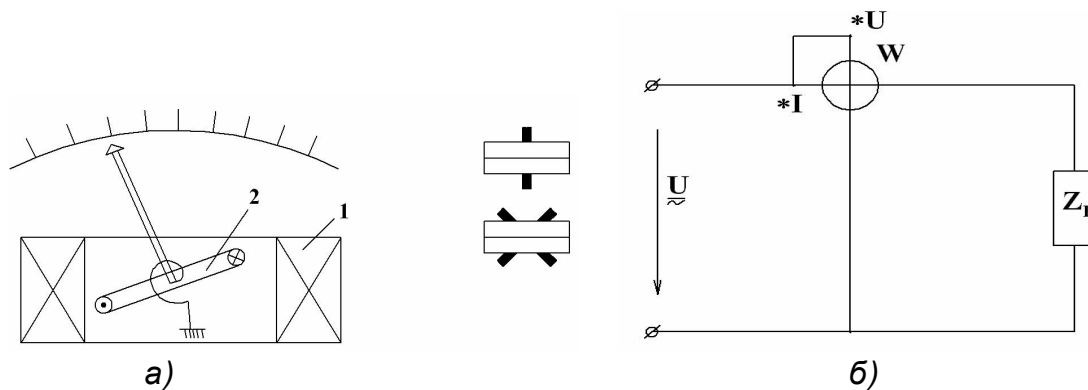


Рис. 6.4. Прибор электродинамической системы:
 а – устройство и графическое обозначение; б – схема включения

Если угол ψ будет равен фазному сдвигу φ между током и напряжением, то отклонение стрелки прибора будет пропорционально мощности: $\alpha = kIU \cos \varphi \equiv P$. На рис. 6.4, б показана схема включения прибора для измерения мощности.

Если прибор многопредельный и рассчитан на различные токи и напряжения, то цену деления определяют как $\frac{I_n U_n}{\alpha_n} \frac{\text{Вт}}{\text{дел}}$, т.е. предельное от-

клонение стрелки соответствует произведению номинальных значений тока и напряжения. Например, токовая обмотка рассчитана на 5 А, а обмотка напряжения – на 300 В. Если прибор имеет 150 делений, то одно деление соответствует $\frac{5 \cdot 300}{150} = 10 \frac{\text{Вт}}{\text{дел}}$.

Направление отклонения стрелки прибора зависит от направления токов. Если поменять зажимы или токовой обмотки, или обмотки напряжения, то стрелка прибора будет отклоняться в противоположную сторону. Поэтому начальные (входные) зажимы катушек обозначают звездочкой (*) и, как правило, соединяют между собой.

Буквенное обозначение приборов электродинамической системы – Д. Они применяются не только как ваттметры, но и в качестве образцовых амперметров и вольтметров.

6.2.4. Приборы индукционной системы

В приборах индукционной системы вращающий момент возникает за счет взаимодействия между магнитными потоками, создаваемыми токовой катушкой, катушкой напряжения и вихревыми токами, индуцированными в подвижном алюминиевом диске этими же токами. Устройство, схема включения и графическое изображение прибора показаны на рис. 6.5.

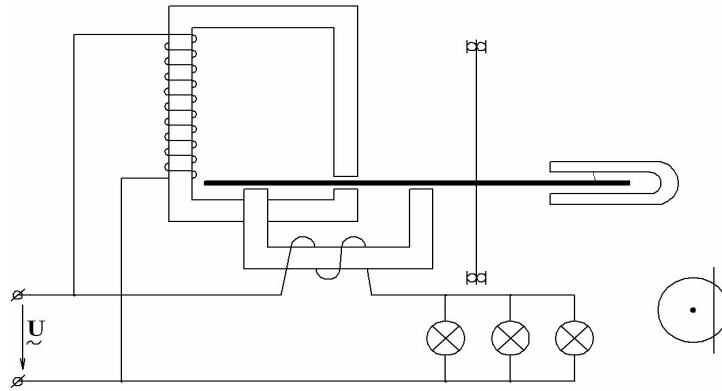


Рис. 6.5. Прибор индукционной системы

Как и в приборах электродинамической системы, вращающий момент пропорционален активной мощности $M_{вр} \equiv P$, а противодействующий момент, создаваемый постоянным магнитом, пропорционален скорости вращения диска $M_{пр} \equiv n$. Установившаяся скорость диска соответствует равенству $M_{вр} = M_{пр}$. Поэтому скорость вращения диска также будет пропорциональна активной мощности $n = kP$. Если скорость вращения диска измерять в оборотах в секунду, то за произвольное время t диск совершит $n \cdot t$ оборотов ($nt = kPt = kW$), которые будут пропорциональны энергии W , потребляемой нагрузкой.

Приборы индукционной системы применяются в качестве счетчиков электрической энергии в цепях однофазного и трехфазного тока.

6.3. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов

На шкалах приборов обозначают характер измеряемой величины – А, V, mA, μ A, W, Wh, Ω , Hz, φ , $\cos \varphi$, F, H (амперметр, вольтметр, миллиамперметр, микроамперметр, ваттметр, счетчик электрической энергии, омметр, герцметр, фазометр, прибор для измерения коэффициента мощности, фарадометр, генриметр); класс точности прибора (например, 1,5); рабочее положение шкалы (\neg , \perp , $\angle 30^\circ$ – горизонтальное, вертикальное, под углом 30° к горизонту); род измеряемого тока ($-$, \sim , \approx – постоянный, переменный, трехфазный); область частот, при которых измерительный прибор соответствует данному классу точности (например, 40 – 500 Hz); приводят условное графическое изображение системы прибора и другие обозначения, необходимые при эксплуатации.

6.4. Измерение электрических величин

В электрических цепях постоянного и переменного тока часто возникает необходимость измерять напряжение сети, ток в проводах или нагрузке, мощность нагрузки, электрическую энергию за какой-либо промежуток времени и т.д.

При выборе того или иного прибора необходимо учитывать следующее. Для того чтобы прибор не искажал истинное значение измеряемой величины, необходимо, чтобы потребляемая им мощность при измерении была минимальной. Например, если измерять маломощную ЭДС термопары обычным милливольтметром магнитоэлектрической системы, то его показание не будет соответствовать действительному значению термо-ЭДС, так как сопротивление вольтметра может быть значительно меньше внутреннего сопротивления источника термо-ЭДС. Такое непосредственное включение прибора для маломощного источника равносильно короткому замыканию. При этом напряжение на зажимах вольтметра будет значительно меньше ЭДС термопары. В этом случае говорят, что прибор «подсаживает» источник. Для измерения ЭДС слабых источников можно воспользоваться, например, электронным вольтметром, имеющим высокое внутреннее сопротивление, или компенсационным методом измерения (см. ниже), при котором практически не потребляется энергия.

6.4.1. Измерение тока и напряжения

В цепях постоянного тока в качестве амперметров и вольтметров могут применяться приборы различных систем (электромагнитной, электродинамической), но чаще всего магнитоэлектрической.

Амперметр включается последовательно с нагрузкой. Чтобы амперметр сам не искажал величину измеряемого им тока, его сопротивление r_A должно быть намного меньше сопротивления нагрузки. Действительно, при включении нагрузки сопротивлением r_H на напряжение U ток в цепи

$I = \frac{U}{r_H}$. Если последовательно с нагрузкой включить амперметр, то ток

уменьшится $I' = U(r_H + r_A)$. Измеренный ток I' будет равен действительному току I , если $r_A = 0$. В этом случае падение напряжения на приборе $\Delta U = r_A I' = 0$ и мощность, потребляемая амперметром, $P_A = I \Delta U = 0$, то есть прибор не потребляет энергию.

Вольтметр же подключается параллельно нагрузке или сети и для того чтобы он сам не изменял величину измеряемого напряжения, необходимо, чтобы его сопротивление $r_V \rightarrow \infty$. Действительно, до подключения вольтметра напряжение на нагрузке было $U = r_H I$. После параллельного включения вольтметра напряжение $U' = \left(\frac{r_V r_H}{r_V + r_H} \right) I$ несколько уменьшится. Теоретически оно не изменится, если $r_V = \infty$.

Для расширения предела измерения амперметра применяются шунты (рис. 6.6). Сопротивление шунта r_{III} , как правило, значительно меньше сопротивления прибора r_A . Шунты включаются параллельно амперметру.

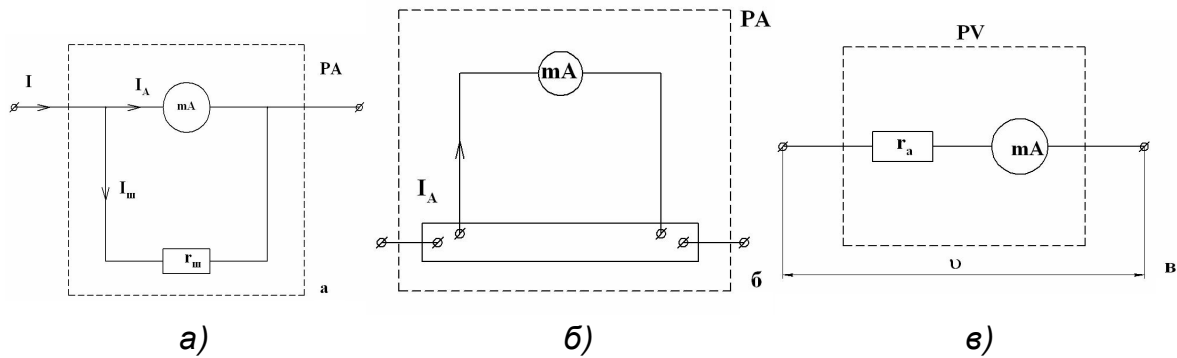


Рис. 6.6. Схема подключения шунта (а и б) и добавочного сопротивления (в)

Пусть, например, прибором, рассчитанным на 5 мА и имеющим сопротивление 200 Ом, необходимо измерять ток до 2 А. Следовательно, при номинальном токе $I = 2$ А через прибор должен проходить ток $I_A = 5$ мА, а остальной ток должен проходить через шунт $I_{III} = I - I_A = 2 - 0,005 = 1,995$ А. Падение напряжения на миллиамперметре при номинальном токе $U_{12} = I_A r_A = 0,005 \cdot 200 = 1$ В. Такое же напряжение будет и на шунте, сопротивление которого легко определить: $r_{III} = \frac{U_{12}}{I_{III}} = \frac{1}{1,995} \approx 0,5$ Ом.

В общем случае при расширении предела измерения амперметра в n раз сопротивление шунта $r_{III} = \frac{r_A}{(n-1)}$. Чтобы переходное сопротивление контакта не влияло на показание прибора, шунт имеет две пары зажимов: силовые токовые зажимы и слаботочные потенциальные зажимы, к которым подключается прибор.

Для расширения пределов измерения вольтметра применяются добавочные сопротивления, которые включаются последовательно с прибором (см. рис. 6.6, в).

Пусть, например, этим же прибором, предельное отклонение стрелки которого соответствует напряжению $U_{12} = r_A I_A = 200 \cdot 0,005 = 1 \text{ В}$, требуется измерять напряжение до $U = 300 \text{ В}$. Понятно, что прямое включение этого прибора вызовет ток $I' = \frac{U}{r_A} = \frac{300}{200} = 1,5 \text{ А}$, что значительно превышает

номинальный ток прибора $I = 5 \text{ мА}$. Чтобы при этом напряжении ток не превышал допустимое значение прибора, необходимо подключить добавочное сопротивление, величина которого определяется уравнением

$$r_{\partial} + r_v = \frac{U}{I_A} = \frac{300}{0,005} = 60 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 60 \text{ кОм}.$$

Следовательно, добавочное сопротивление должно быть равным

$$r_{\partial} = \frac{U}{I_A} - r_v = 60 \cdot 10^3 - 200 = 59,8 \cdot 10^3 \text{ Ом} = 59,8 \text{ кОм}.$$

При этом мощность, которая будет выделяться в добавочном сопротивлении, $P_{\partial} = r_{\partial} I_A^2 = 59,8 \cdot 10^3 \cdot (5 \cdot 10^{-3})^2 \approx 1,5 \text{ Вт}$.

Итак, добавочный резистор должен иметь сопротивление $r_{\partial} = 59,8 \text{ кОм}$ мощностью не менее 1,5 Вт.

Легко подсчитать, что для расширения предела измерения вольтметра в n раз необходимо добавочное сопротивление $r_{\partial} = (n - 1)r_v$.

В цепях переменного тока в качестве амперметра и вольтметра применяются чаще всего приборы электромагнитной системы. Для расширения пределов измерения приборов в цепях переменного тока применяются измерительные трансформаторы тока и напряжения. Шунты и добавочные сопротивления вносят большую погрешность в этом случае, и из-за низкого класса точности они не применяются. На рис. 6.7, а показана схема включения амперметра и вольтметра через измерительные трансформаторы тока ТА и напряжения ТВ.

При выборе трансформатора тока необходимо, чтобы ток ни в первичной обмотке (клеммы Л1, Л2), ни во вторичной обмотке (клеммы И1, И2), ни в амперметре не превышал номинальные значения. Если, например, требуется подобрать трансформатор тока для измерения в двигателе

тока, не превышающего 35 А, с помощью амперметра, рассчитанного на 2 А, то трансформатор тока ТА 40/5 не годится, хотя первичная и вторичная обмотки не будут перегружены. Действительно, по первичной обмотке трансформатора будет проходить ток $35 < 40$ А, по вторичной обмотке $35/8 = 4,375 < 5$ А, а амперметр будет перегружен, т.к. $4,375 > 2$ А. Поэтому коэффициент трансформации трансформатора тока должен быть не $\frac{40}{5} = 8$, а не менее $\frac{35}{2} = 17,5$. Если принять его равным 20, то следует выбрать трансформатор тока ТА 100/5.

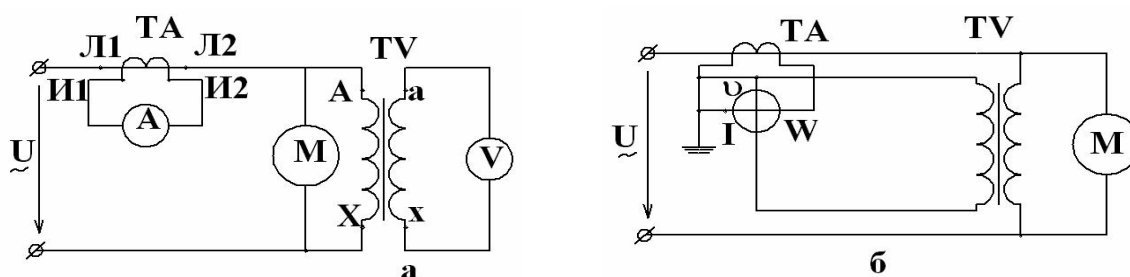


Рис. 6.7. Измерение тока, напряжения (а) и мощности (б) с помощью измерительных трансформаторов

Аналогично при выборе трансформатора напряжения ТВ необходимо учитывать номинальные значения не только трансформатора, но и вольтметра, с помощью которого измеряется напряжение. Таким образом, истинное значение измеряемого тока или напряжения равно показанию прибора, умноженному на коэффициент трансформации соответствующего трансформатора.

6.4.2. Измерение мощности и энергии

Мощность в цепях постоянного и переменного тока измеряется электродинамическим ваттметром. Для этого токовую катушку включают последовательно с нагрузкой, как и амперметр, а катушку напряжения – параллельно нагрузке. На рис. 6.7, б показано включение ваттметра с помощью измерительных трансформаторов для измерения мощности, потребляемой двигателем. Измерительные трансформаторы расширяют пределы измерения ваттметра.

Задача. Для измерения мощности электродвигателя М (при работе его в различных режимах), кпд которого в номинальном режиме равен 0,8 (рассчитан двигатель на 10 кВт и напряжением $U = 220$ В), используется ваттметр с номинальным током $I_n = 2$ А, номинальным напряжением $U_n = 50$ В и шкалой на 200 делений. Подобрать измерительный трансформатор тока, первичный ток которого выбрать из ряда 10, 50, 100, 150, 200 А, и трансформатор напряжения (или TV 220/100, или TV 380/100, или TV 500/100. Определить показание прибора в делениях при номинальной мощности электродвигателя.

Решение

Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме,

$$I = \frac{P_{эл}}{U} = \frac{P_n}{\eta_n U} = \frac{10 \cdot 10^3}{0,8 \cdot 220} = 56,8 \text{ А}.$$

Так как ток прибора равен 2 А, то коэффициент трансформации трансформатора тока должен быть не менее $\frac{I}{I_n} = \frac{56,8}{2} = 28,4$. Вторичный ток ТА равен 5 А, поэтому его первичная обмотка должна быть рассчитана на ток не менее $28,4 \cdot 5 = 142$ А. Выбираем трансформатор тока ТА 150/5, коэффициент трансформации которого $K_I = 30$.

Коэффициент трансформации трансформатора напряжения должен быть не менее $\frac{U}{U_n} = \frac{220}{50} = 4,4$. Так как номинальное вторичное напряжение TV равно 100 В, то первичное напряжение должно быть не менее $100 \cdot 4,4 = 440$ В. Следовательно, из трех трансформаторов подходит только TV 500/100 с коэффициентом трансформации $K_U = 5$.

Цена деления ваттметра без измерительных трансформаторов

$$\frac{I_n U_n}{200 \text{ делений}} = \frac{2 \cdot 50}{200} = 0,5 \frac{\text{Вт}}{\text{дел}}.$$

Цена деления ваттметра с измерительными трансформаторами

$$\frac{K_I I_n K_U U_n}{200} = \frac{30 \cdot 2 \cdot 5 \cdot 50}{200} = 75 \frac{\text{Вт}}{\text{дел}}.$$

Показание прибора, если измеряемая мощность равна 10 кВт,
 $\frac{10000}{75} = 133,3$ дел.

Итак, если измерение производится с помощью измерительных трансформаторов, то фактическая мощность равна показанию прибора P_W , умноженному на произведение коэффициентов трансформации трансформаторов $P = K_I K_U P_W$.

В трехфазных цепях, если нагрузка симметрична, можно измерить мощность одной фазы, а показание утроить. В четырехпроводной цепи при несимметричной нагрузке для измерения мощности необходимо включить 3 ваттметра (рис. 6.8, а).

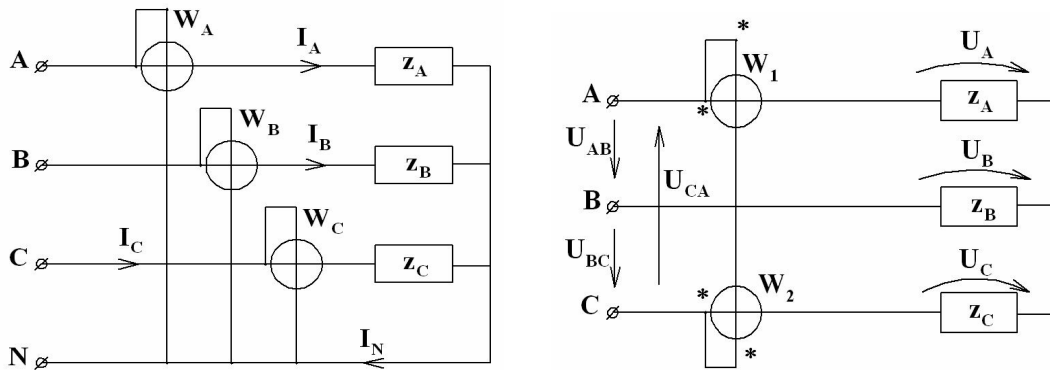


Рис. 6.8. Измерение мощности в трехфазных цепях:
а – четырехпроводной; б – трехпроводной

В трехпроводной сети при любой несимметричной нагрузке трехфазную мощность можно измерить двумя ваттметрами. Действительно, активная мощность трехфазной цепи равна арифметической сумме мощностей отдельных фаз

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C,$$

где $I_A, I_B, I_C, U_A, U_B, U_C$ – фазные токи и напряжения.

Так как эти токи и напряжения могут быть представлены векторами, то правая часть представляет собой сумму скалярных произведений векторов:

$$P = \bar{U}_A \bar{I}_A + \bar{U}_B \bar{I}_B + \bar{U}_C \bar{I}_C.$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа один из токов можно выразить через два других. Например, $\bar{I}_B = -\bar{I}_A - \bar{I}_C$, поскольку $\bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 0$. Подставим ток \bar{I}_B в выражение мощности:

$$\begin{aligned} P &= \bar{U}_A \bar{I}_A + \bar{U}_B (-\bar{I}_A - \bar{I}_C) + \bar{U}_C \bar{I}_C = (\bar{U}_A - \bar{U}_B) \bar{I}_A + (\bar{U}_C - \bar{U}_B) \bar{I}_C = \\ &= \bar{U}_{AB} \bar{I}_A + \bar{U}_{CB} \bar{I}_C = U_{AB} I_A \cos(U_{AB} I_A) + U_{CB} I_C \cos(U_{CB} I_C) = P_1 + P_2. \end{aligned}$$

Это означает, что мощность трехфазной трехпроводной цепи можно измерить двумя ваттметрами (см. рис. 6.8, б), только обмотки напряжения необходимо включить на линейное напряжение \bar{U}_{AB} и \bar{U}_{CB} (а не \bar{U}_{BC}), т.е. начало обмотки напряжения второго ваттметра необходимо подключить к фазе С.

Величину угла между соответствующим током и напряжением определяют по векторной диаграмме.

На рис. 6.9 показана векторная диаграмма напряжений и токов при активно-индуктивной нагрузке, где фазные токи I_A, I_B, I_C , которые при соединении звездой являются также линейными, отстают от соответствующих фазных напряжений на углы φ_A, φ_B и φ_C . Если, например, измеряется мощность двумя ваттметрами, а нагрузка симметричная с коэффициентом мощности $\cos \varphi = 0,5$ (т.е. фазный сдвиг между фазными значениями тока и напряжения равен 60°), то угол между векторами \bar{I}_A и \bar{U}_{AB} будет равен 90° и первый ваттметр покажет 0, а второй – мощность всей трехфазной цепи.

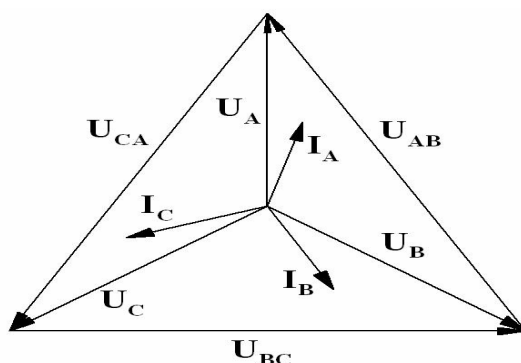


Рис. 6.9. Векторная диаграмма токов и напряжений при активно-индуктивной нагрузке

Другой пример. Если в схеме на рис. 6.8, а обмотку напряжения ваттметра W_A включить не на фазное напряжение U_{AN} , а на линейное напряжение U_{BC} , то показание этого ваттметра будет равно

$$I_A \cdot U_{BC} \cos(I_A U_{BC}) = I_A U_{BC} \cos(90 - \varphi) = I_A U_{BC} \sin \varphi,$$

а показание этого ваттметра будет пропорционально реактивной мощности, точнее, в $\sqrt{3}$ раз превышать реактивную мощность фазы А, так как линейное напряжение в $\sqrt{3}$ раз больше фазного.

Необходимо помнить, что показание ваттметра равно произведению тока, проходящего через токовую обмотку, напряжения на обмотке напряжения и $\cos \varphi$ между этими величинами.

На практике мощность трехфазной цепи измеряют одним ваттметром, трехэлементным или двухэлементным, схемы подключения которого не отличаются от схем на рис. 6.8.

Эти приборы представляют собой сочетание двух или трех ваттметров в одном корпусе. Эти приборы непосредственно измеряют общую мощность в трехфазной сети.

Для измерения электрической энергии применяются счетчики, схемы включения которых в трехфазную сеть ничем не отличаются от схем включения ваттметров.

6.4.3. Компенсаторы

Компенсатором называется прибор, служащий для измерения ЭДС или величин, функционально с ней связанных (ток, сопротивление, напряжение), с высокой степенью точности – до 0,01 %.

Принцип компенсационного метода измерения можно пояснить по рис. 6.10.

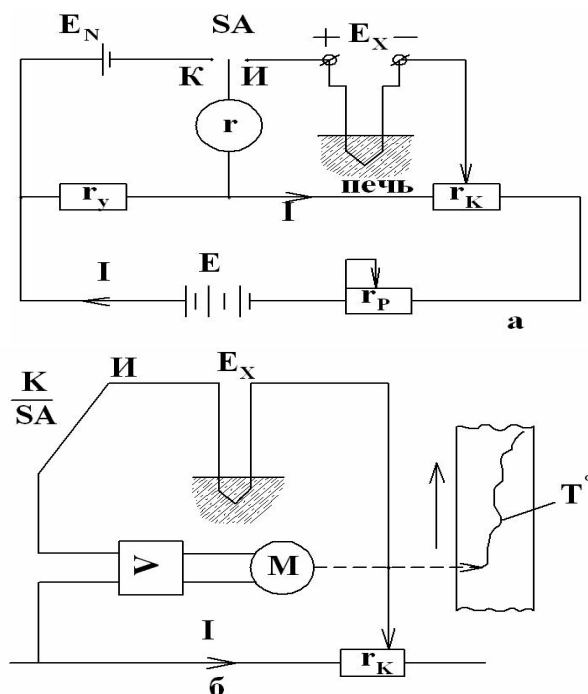


Рис. 6.10. Компенсационный метод измерения:
 а – схема измерения; б – автоматический компенсатор (фрагмент)

Схема содержит источник E_p , служащий для создания рабочего тока, $E_N = 1,01865$ В – ЭДС нормального элемента, E_x – измеряемая ЭДС, например, термопары, r_y и r_k – установочное и компенсационное сопротивления.

Для измерения ЭДС E_x вначале устанавливают рабочий ток I . При этом переключатель SA ставят в положение К (калибровка) и, изменяя величину сопротивления резистора r_p , добиваются нулевого показания гальванометра. В этом случае падение напряжения на установочном резисторе будет скомпенсировано ЭДС нормального элемента $E_N = r_y I$ и рабочий ток $I = \frac{E_N}{r_y}$.

После установки рабочего тока ставят переключатель SA в положение И (измерение). Перемещая движок резистора r_k , снова добиваются нулевого показания гальванометра. В этом случае $E_x = r_k I = \frac{E_N r_k}{r_y}$. Так как тока в цепи измеряемой ЭДС нет, то рабочий ток останется неизменным независимо от положения движка резистора r_k .

При известных E_N , r_k и r_y измеряемую ЭДС определяют с помощью вычислений. Однако компенсационное сопротивление (резистор) можно непосредственно проградуировать в вольтах.

Высокая точность компенсационного метода измерения обеспечивается за счет высокой чувствительности гальванометра, высокой стабильности ЭДС нормального элемента и высокой точности изготовления компенсационного резистора r_k . Следует отметить, что при измерении не потребляется мощность от измеряемой ЭДС.

Для измерения тока с помощью компенсатора его пропускают через резистор r_u , величина сопротивления которого известна с высокой степенью точности, и измеряют падение напряжения на нем $U_x = r_u I_x$. Отсюда вычисляют неизвестный ток $I_x = \frac{U_x}{r_u}$.

Компенсаторы, кроме того, применяются для проверки приборов высокого класса точности.

Автоматические компенсаторы служат для непрерывного измерения и записи на диаграмме значения ЭДС или неэлектрических величин, которые преобразуются в ЭДС, например, температуры печи (см. рис. 6.10, б).

В процессе измерения, когда компенсация не достигнута, разность напряжения между E_x и падением напряжения в компенсационном сопротивлении усиливается электронным усилителем и подается на реверсивный двигатель М. Вал двигателя механически связан с движком r_k и пером самописца. Двигатель будет вращаться до тех пор, пока разностный сигнал не будет равен нулю. Это положение фиксируется на бумаге, перемещающейся с помощью лентопротяжного механизма, и таким образом отмечается температура в данный момент времени.

6.5. Электрические измерения неэлектрических величин

Измерение различных неэлектрических величин (линейных и угловых перемещений, температуры, скорости, давление и др.) электрическими методами получило широкое распространение благодаря целому ряду преимуществ: возможность дистанционного измерения, автоматизации и управления технологическим процессом, практически безынерционность процесса измерения, высокая чувствительность, точность процесса измерения.

Для измерения неэлектрической величины необходимо преобразовать ее в электрическую, которую можно измерять электроизмерительными приборами. При этом шкалу прибора градуируют в единицах измеряемой неэлектрической величины.

Преобразователи неэлектрической величины в электрическую (датчики) разделяются на 2 вида: **параметрические** и **генераторные**. Первые воздействуют неэлектрической величиной на электрические параметры (активное сопротивление, индуктивность, емкость). Они нуждаются в постороннем источнике энергии. Генераторные датчики преобразуют неэлектрическую величину в зависимую от нее ЭДС (термоэлектрические, индукционные, фотоэлектрические и др.). Эти датчики могут обойтись и без посторонних источников, если при этом не требуется усиления полученных электрических сигналов.

6.5.1. Параметрические преобразователи

Большую группу параметрических преобразователей составляют **резистивные** датчики, с помощью которых изменение неэлектрической величины преобразуется в изменение электрического сопротивления. Они используются для измерения линейных и угловых перемещений, температуры, давления.

Рассмотрим несколько примеров преобразования неэлектрической величины в электрическую с помощью резистивных преобразователей.

На рис. 6.11, а показан простейший датчик перемещения. Ток в цепи резистора контролируется, например, миллиамперметром. При перемещении движка потенциометра изменяется его сопротивление, а, следовательно, ток в цепи. Таким образом, прибор можно отградуировать в миллиметрах.

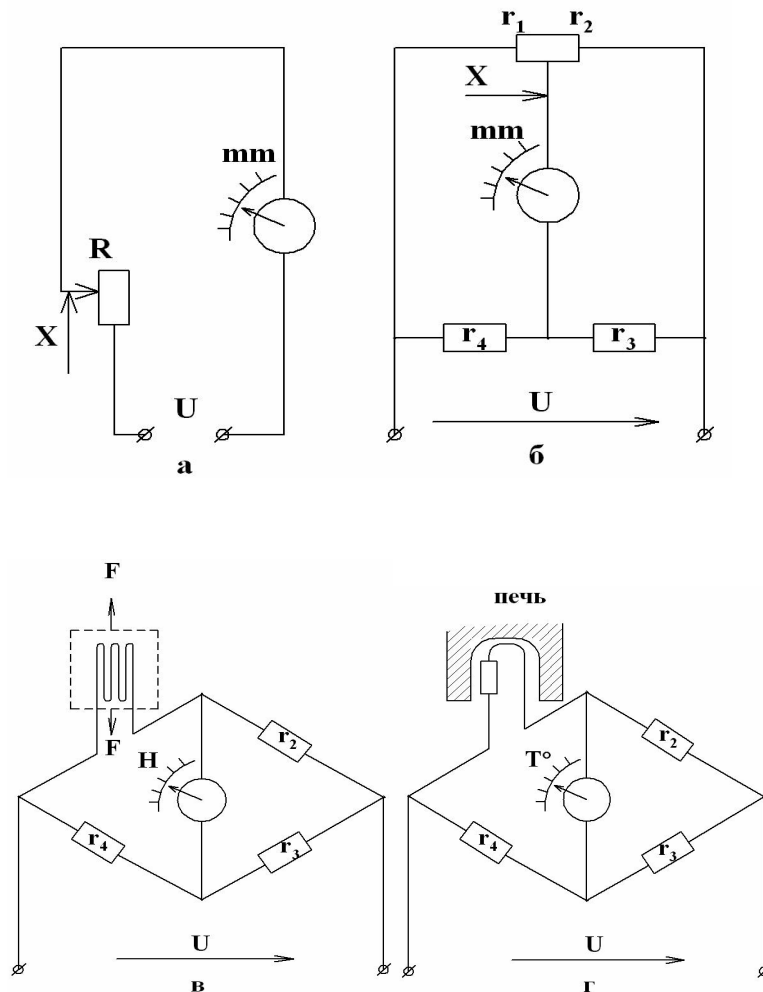


Рис. 6.11. Резистивные преобразователи:
а, б – перемещения; в – давления; г – температуры

На рис. 6.11, б потенциометр с общим сопротивлением $r_1 + r_2$ включен в схему моста. Ток прибора будет равен нулю, когда мост уравновешен, т.е. выполняется равенство произведений сопротивлений противоположных плеч моста $r_1 r_3 = r_2 r_4$. Если движок потенциометра сдвинут в ка-

кую-либо сторону, то мост разбалансируется и появляется ток в диагонали моста, тем больший, чем больше величина перемещения. Мостовая схема более чувствительна и позволяет измерять даже небольшие перемещения.

На рис. 6.11, в показано, как с помощью тензорезистора измеряют механические усилия, давление или напряжения, возникающие в узлах различных конструкций. Тензорезистор представляет собой сопротивление, выполненное из тонкого константанового или манганинового провода, который заклеивают между двумя слоями тонкой бумаги. Датчик приклеивают к детали так, чтобы направление деформации совпадало с направлением длинных сторон тензорезистора. При этом изменяется величина сопротивления тензорезистора, что и фиксирует чувствительный гальванометр, показание которого будет пропорционально величине деформации.

Аналогично можно измерять температуру с помощью терморезистора (см. рис. 6.11, з). В термометрах сопротивления используется свойство проводников или полупроводников изменять свое сопротивление при изменении температуры.

Индуктивные датчики используются для измерения значительных и небольших линейных и угловых перемещений, давления и других неэлектрических величин. Индуктивный преобразователь, как правило, содержит катушку с подвижным ферромагнитным магнитопроводом. От положения магнитопровода зависит индуктивность катушки, а, следовательно, ее индуктивное сопротивление. Если эту катушку включить в сеть переменного тока, то по величине тока в катушке можно судить, например, о величине перемещения x (рис. 6.12, а).

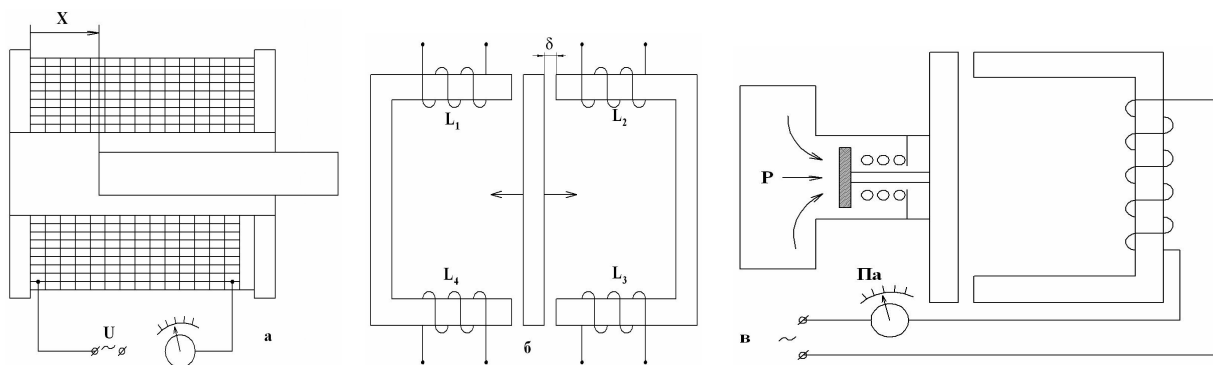


Рис. 6.12. Индуктивные преобразователи:
 а – линейного перемещения; б – давления;
 в – дифференциальный (собирается по мостовой схеме)

Наибольшая индуктивность катушки имеет место, когда ферромагнитный сердечник полностью расположен внутри катушки. С увеличением x индуктивность и индуктивное сопротивление катушки уменьшаются и возрастает ток в цепи.

Наиболее чувствительным преобразователем перемещения будет дифференциальная схема включения катушек датчика, причем z_1 и z_4 , а также z_2 и z_3 должны быть включены в противоположные плечи моста (см. рис. 6.12, б).

На рис. 6.12, в показана схема устройства индуктивного датчика давления. При увеличении давления P поршень, жестко связанный с подвижным сердечником, перемещается вправо, зазор между якорем и неподвижным сердечником уменьшается, возрастают индуктивность и индуктивное сопротивление катушки, а ток при этом уменьшается. Миллиамперметр, градуированный в единицах давления, будет иметь обратную шкалу.

Емкостные датчики также могут быть использованы в качестве преобразователей перемещения. Емкость плоского конденсатора определяется абсолютной диэлектрической проницаемостью среды ϵ , площадью

пластин S и расстоянием d между ними, $C = \frac{\epsilon S}{d}$. В емкостных преобразо-

вателях связывают неэлектрическую величину с одним из вышеприведенных параметров. Например, если нижнюю пластину закрепить неподвижно, а верхнюю пластину переместить на расстояние x (рис. 6.13, а), то с уменьшением расстояния d возрастает емкость C , а емкостное сопротивление переменному току $X_c = \frac{1}{\omega C}$ будет уменьшаться и, следовательно, бу-

дет возрастать ток.

Если между пластинами протягивать диэлектрическую ленту, например, полиэтиленовую, то с увеличением толщины пленки увеличиваются емкость и ток в цепи. Таким образом, показание прибора будет пропорционально толщине пленки.

На рис. 6.13 изображен емкостный датчик, который может контролировать уровень жидкости.

Действительно, представленное устройство можно рассматривать как систему двух конденсаторов, включенных параллельно. Воздушный конденсатор имеет площадь пластин S_1 и емкость $C_1 = \frac{\epsilon_1 S_1}{d}$; жидкостный конденсатор с абсолютной магнитной проницаемостью ϵ_2 и $C_2 = \frac{\epsilon_2 S_2}{d}$.

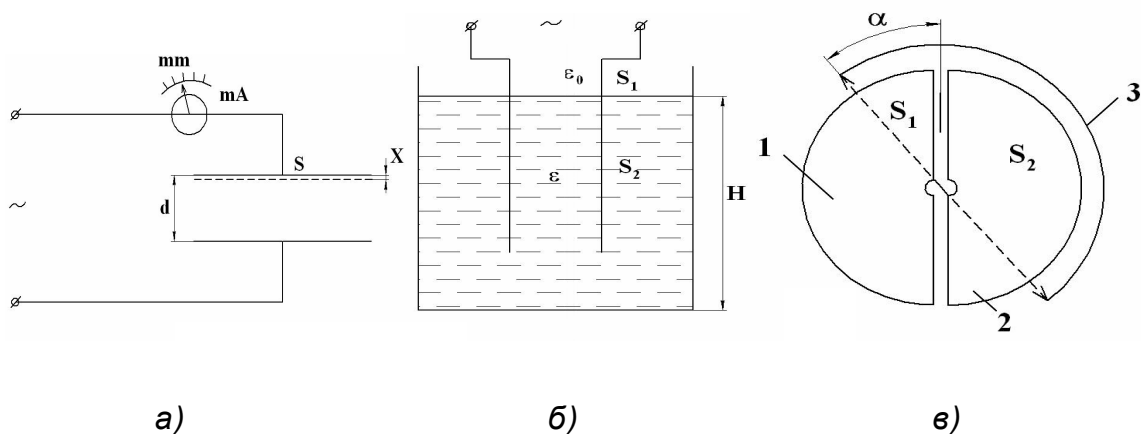


Рис. 6.13. Емкостные датчики:
a – перемещения; *б* – уровня жидкости; *в* – углового перемещения

Общая емкость $C = C_1 + C_2$.

Если, например, уровень жидкости увеличивается, то при $\epsilon_2 > \epsilon_1$ общая емкость также возрастает, что фиксируется электроизмерительными приборами.

Емкостной преобразователь можно использовать для измерения угловых перемещений (см. рис. 6.13, *в*). Он состоит из двух изолированных друг от друга пластин 1 и 2 и пластины 3, которая также изолирована от пластин 1 и 2 и может поворачиваться вокруг оси *O*. При повороте этой пластины будет изменяться площадь S_1 между пластинами 1 и 3 и S_2 – между пластинами 2 и 3. Соответственно будут изменяться и емкости между этими пластинами. Такая конструкция емкостного преобразователя позволяет включить его по мостовой дифференциальной схеме.

6.5.2. Генераторные преобразователи

Принцип работы генераторных преобразователей основан на различных физических явлениях. Так, работа индукционных преобразователей основана на законе электромагнитной индукции – возникновение ЭДС в контуре, который пронизывается переменным магнитным потоком. Изменение магнитного потока должно быть связано с какой-либо неэлектрической величиной: линейным или угловым перемещением электрического

контура или магнитного потока. Примером генераторного индукционного преобразователя может служить тахогенератор – электрический генератор постоянного или переменного тока небольшой мощности, служащий для измерения скорости вращения вала или ротора. Как будет показано ниже, асинхронный тахогенератор может служить и для измерения углового ускорения.

Термоэлектрические датчики используют явление возникновения ЭДС термопар при нагреве места спая двух разнородных металлов. Свободные концы этих металлов подключают к электроизмерительному прибору, показание которого будет пропорционально разности температур спая и свободных концов. Термопары используются для измерения высоких температур от 600 до 1600 °С.

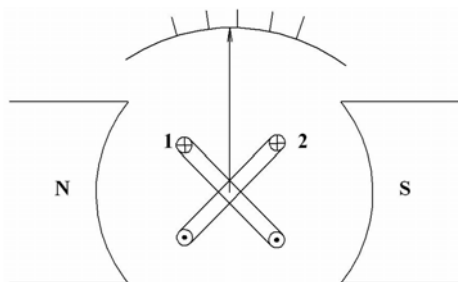
Фотоэлектрические преобразователи основаны на явлении фотоэффекта. При освещении фотоэлемента, фотодиода, фототранзистора на их зажимах возникает ЭДС, величина которой зависит от степени освещенности прибора.

Пьезоэлектрические датчики используют явление пьезоэффекта. При сжатии некоторых кристаллов, например, кварца на боковых гранях его в направлении действия силы (продольный пьезоэффект) или в перпендикулярном направлении (поперечный пьезоэффект) возникает ЭДС, по величине которой можно судить о степени механического воздействия (силы, давления, вибраций). Практически безынерционность пьезодатчиков позволяет применять их для измерения быстроизменяющихся силовых процессов.

Как видим, один и тот же тип преобразователя может служить для измерения различных неэлектрических величин и, в свою очередь, любая неэлектрическая величина может быть измерена различными преобразователями. Электрические преобразователи могут служить не только для измерения неэлектрических величин, но и для организации контроля различных технологических процессов или автоматического управления.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Чему может быть равно истинное значение измеряемого напряжения (указать пределы), если вольтметр класса точности 1,5, рассчитанный на 300 В, показал 100 В?



2. Две жестко скрепленные рамки находятся в однородном магнитном поле. Будут ли поворачиваться рамки вокруг оси O, если:

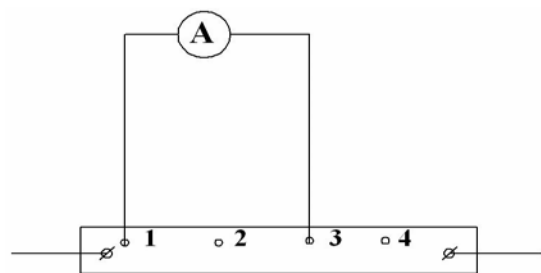
а) по ним проходит ток указанного на рисунке направления?

б) поменять направление тока во второй рамке?

в) поменять направление тока в обеих рамках?

3. Вольтметр типа МПЛ-46 на номинальное напряжение 3 В имеет внутреннее сопротивление 400 Ом. Какое добавочное сопротивление нужно подключить к этому вольтметру, чтобы расширить его пределы измерения до 75 В? Определить минимальную мощность добавочного сопротивления.

4. Как следует изменить величину добавочного сопротивления, если требуется вольтметр, рассчитанный на 500 В, переделать на 100 В?



5. К каким клеммам шунта следует подключить амперметр, чтобы расширить предел его измерения (см. рис.)? Решение объяснить.

6. Почему бóльшему значению номинального напряжения многопредельного вольтметра соответствует бóльшее значение добавочного сопротивления?

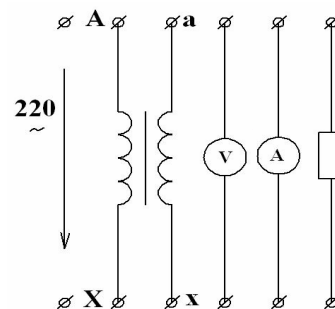
7. Подобрать измерительный трансформатор напряжения для измерения напряжения в сети 220 В с помощью вольтметра, рассчитанного на 50 В, со шкалой на 100 дел. Чему равно напряжение сети, если вольтметр показал 90 делений?

Напряжение первичной обмотки TV выбрать из ряда 100, 200, 300 ... В. Нарисовать схему.

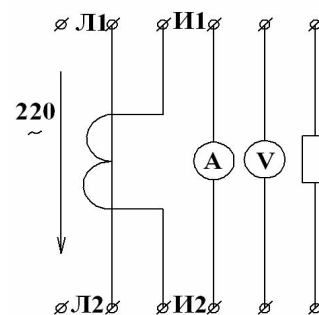
8. Выбрать трансформатор тока для измерения тока нагрузки номинальной мощностью 2 кВт и напряжением 220 В с помощью одноамперного прибора.

Ток первичной обмотки выбрать из ряда 10, 20, 30 ... А. Ток вторичной обмотки – 5 А. Нарисовать схему.

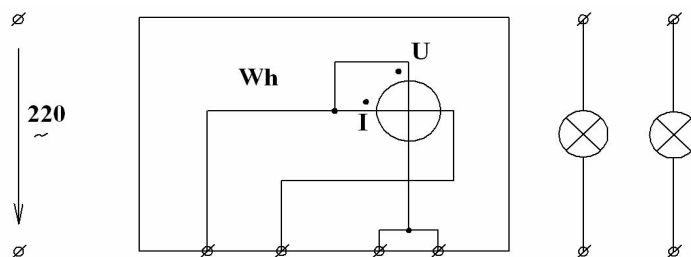
9. Составить монтажную схему питания нагрузки с измерением напряжения и тока в ней, сохранив расположение клеммных выводов электрооборудования на стенде (см. рис.).

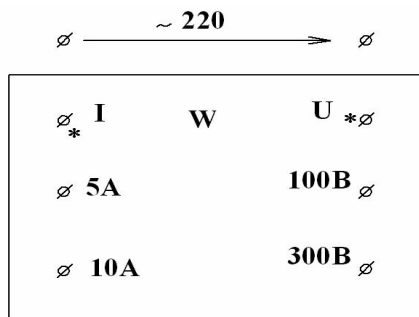


10. Составить монтажную схему питания нагрузки с измерением напряжения и тока в ней, сохранив расположение клеммных выводов электрооборудования на стенде (см. рис.).

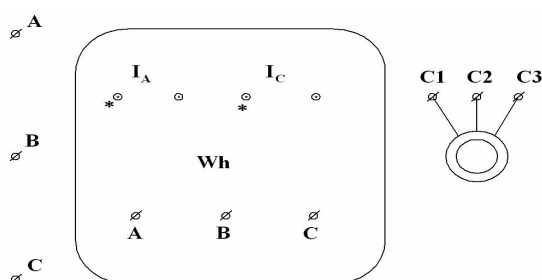


11. Как следует подключить нагрузку (лампы накаливания) к сети и счетчик для измерения энергии, забираемой этими лампами из сети (см. рис.)?



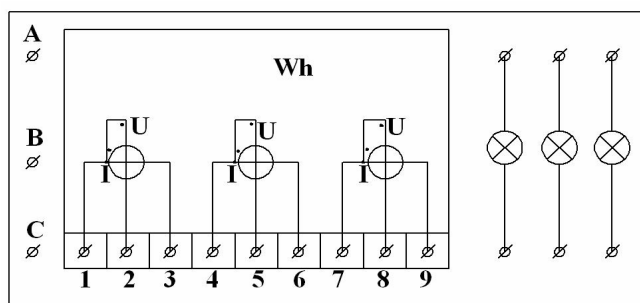


12. Как следует включить многопредельный ваттметр для измерения мощности однофазного электродвигателя, номинальная мощность которого равна 1,5 кВт? Чему будет равна цена деления прибора, имеющего 150 делений (см. рис.)?



13. Как следует подключить трехфазный двухэлементный счетчик активной энергии для измерения энергии, потребляемой трехфазным электродвигателем из сети (см. рис.)?

14. Нарисовать принципиальную и монтажную схемы подключения трех групп ламп накаливания и трехфазного трехэлементного счетчика электрической энергии к трехфазной сети напряжением 36 В, если лампы рассчитаны на напряжение: а) – 20 В; б) 36 В (см. рис.).



15. Как можно измерить сопротивление с помощью моста? Пояснить технику измерений.

16. Объяснить методику измерения маломощных ЭДС, малых токов компенсационным методом.

17. Как классифицируются преобразователи неэлектрических величин в электрические (датчики)?

18. Какие датчики можно использовать для измерения угловых перемещений?

Перечислить и объяснить принцип работы индукционного датчика угловых перемещений.

19. Индуктивные датчики. Для измерения каких неэлектрических величин они могут быть использованы?

20. Какие датчики применяют для измерения температуры?

Нарисовать схему и объяснить принцип измерения.

21. Какие датчики можно использовать для измерения механических усилий (давления, напряжения, силы)?

Перечислить типы и объяснить принцип работы тензодатчика.

22. Какие датчики можно применить для измерения скорости вращения? Объяснить принцип работы.

23. Индукционные датчики. Для измерения каких неэлектрических величин они могут быть использованы?

Дифференциальная схема включения индукционного датчика.

24. Для измерения каких неэлектрических величин можно применить датчик Холла? Пояснить с помощью рисунка принцип работы датчика Холла.

7. ТРАНСФОРМАТОРЫ

7.1. Назначение трансформатора

Трансформаторы используются в цепях переменного тока для преобразования величины переменного напряжения (тока).

Трансформатор называют силовым, если он служит непосредственно для питания приемников электрической энергии (нагрузки) или для передачи электрической энергии на большие расстояния. Так, мощность $S = UI$ от источника к потребителю можно передать при различных значениях напряжения и тока. Чем выше напряжение, тем меньше ток в линии электропередачи, тем меньше потери в линии $\Delta P = r_{\text{л}} I^2$. Кроме того, величина тока определяет сечение проводов линии передачи (ЛП), и чем меньше ток, тем меньшее можно выбрать сечение провода, что существенно может снизить вес проводов ЛП. Правда, при передаче электроэнергии высоким напряжением требуются высокопрочная изоляция и связанные с этим дополнительные затраты на изготовление высоких опор ЛП, использование гирлянды изоляторов и др. Но экономически целесообразно все-таки передавать большие мощности на большие расстояния высоким напряжением. Стандартные значения напряжения ЛП – 10, 35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ – создаются повышающими силовыми трансформаторами.

Потребители электроэнергии (однофазного тока) имеют следующую шкалу номинальных напряжений: 12, 24, 36, 127, 220, 380 В. Для получения этих напряжений используются понижающие силовые трансформаторы.

Кроме силовых трансформаторов существуют различные специализированные трансформаторы. Для измерения больших значений токов, напряжений, мощностей, энергии применяются так называемые измерительные трансформаторы. Для дуговой электросварки – сварочные трансформаторы, в радиотехнике – согласующие трансформаторы, в устройствах автоматики трансформаторы могут использоваться для преобразования формы переменного напряжения (импульсные трансформаторы).

7.2. Принцип действия трансформатора

Простейший трансформатор состоит из магнитопровода, выполненного из ферромагнитного материала, на котором размещены две обмотки (катушки). Обмотка с числом витков w_2 подключается к нагрузке (рис. 7.1).

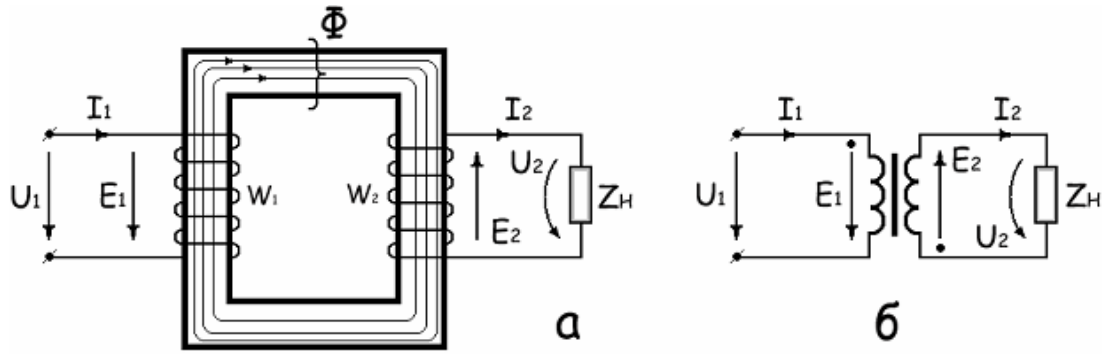


Рис. 7.1. Однофазный трансформатор (а)
и его условное графическое изображение (б)

Если первичную обмотку трансформатора включить в сеть синусоидального переменного тока с напряжением U_1 , то в обмотке возникает переменный ток I_1 . Этот ток создает переменный магнитный поток, который замыкается по стальному сердечнику. Пусть магнитный поток изменяется по синусоидальному закону $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t)$. Пронизывая витки первичной и вторичной катушек, переменный магнитный поток наводит в них ЭДС в соответствии с законом электромагнитной индукции

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -\frac{w_1 d\Phi}{dt} = -w_1 \Phi_m \cos(\omega t) \omega = \omega w_1 \Phi_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = E_{1m} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right),$$

где амплитудное значение ЭДС в первичной обмотке

$$E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m = 2\pi f w_1 \Phi_m.$$

Действующее значение ЭДС

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = \frac{2\pi f w_1 \Phi_m}{\sqrt{2}}.$$

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (7.1)$$

Аналогично

$$e_2 = -\frac{w_2 d\Phi}{dt};$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (7.2)$$

Если подключить нагрузку, то под действием ЭДС E_2 во вторичной обмотке возникает ток I_2 , создающий напряжение на нагрузке U_2 . Вторичную обмотку можно считать источником электроэнергии с ЭДС E_2 .

В практику анализа и расчета вводят понятие коэффициента трансформации трансформатора, определяемого отношением ЭДС первичной и вторичной обмоток

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (7.3)$$

Если напряжение $U_2 < U_1$, то трансформатор называется понижающим. Это имеет место, если $w_1 > w_2$ ($K > 1$). В противном случае трансформатор называется повышающим ($K < 1$). В соответствии с этим различают обмотку высшего ВН и обмотку низшего НН напряжения. Понятно, что обмотками ВН и НН могут быть как первичная, так и вторичная обмотки.

Трансформатор обладает свойством обратимости, то есть один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего или понижающего в зависимости от того, какую обмотку подключать к источнику электроэнергии.

7.3. Устройство трансформатора

Трансформатор состоит из обмоток и магнитопровода. Магнитопровод выполняют из листовой электротехнической стали. Листы с двух сторон изолируют лаком, что дает возможность значительно ослабить вихревые токи, возникающие в стали магнитопровода. Уменьшение потерь в стали повышает КПД трансформатора. Толщина листов электротехнической стали 0,35 или 0,5 мм.

Магнитопровод однофазных трансформаторов может иметь О- или Ш-образную форму. Часть магнитопровода, на которой расположены обмотки, называют стержнем. Обмотки трансформатора отделяются друг от друга и от стержня изолирующим материалом. По расположению обмоток на сердечнике различают стержневые (рис 7.2, а) и броневые (см. рис. 7.2, б) трансформаторы.

В броневом трансформаторе обмотки прикрываются (бронируются) сталью магнитопровода, что защищает их от механических повреждений.

Обмотки на стержнях магнитопровода могут быть расположены различными способами. Чаще всего ближе к стержню располагают обмотку низшего напряжения (НН), т.к. при этом требуется меньший слой электрической изоляции, а затем укладывают обмотку высшего напряжения (ВН), которую также изолируют от обмотки НН.

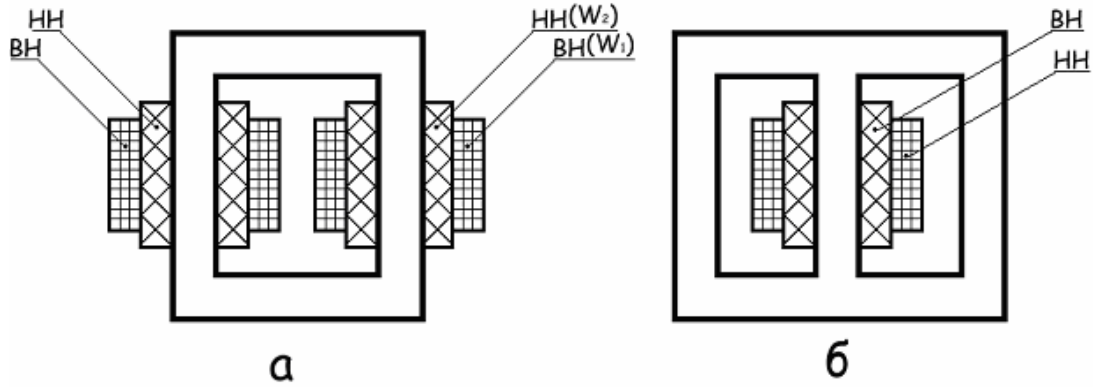


Рис. 7.2. Однофазные трансформаторы стержневого (а) и броневые (б) типов

По способу охлаждения обмоток и стали различают трансформаторы с воздушным (сухие) и масляным охлаждением. Масляное охлаждение обеспечивает более надежную работу высоковольтных трансформаторов, так как электрическая прочность масла намного выше, чем воздуха.

7.4. Трансформаторы в режиме холостого хода

В режиме холостого хода нагрузка отключена, ток вторичной цепи $I_{2xx} = 0$ (рис. 7.3).

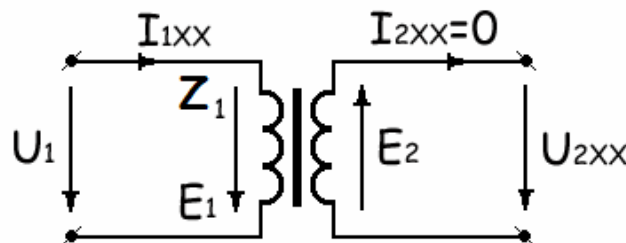


Рис. 7.3. Трансформатор в режиме холостого хода

По второму закону Кирхгофа для первичной и вторичной цепи

$$E_1 = Z_1 I_{1xx} - U_1; \quad (7.4)$$

$$E_2 = U_2, \quad (7.5)$$

где Z_1 – полное сопротивление первичной обмотки, состоящее из активного сопротивления этой обмотки и индуктивного сопротивления Z_1 , которое учитывает рассеяние магнитного потока

$$I_{1xx} = \frac{E_1 + U_1}{Z_1}. \quad (7.6)$$

В реальном трансформаторе падение напряжения в первичной обмотке $Z_1 I_1$ невелико даже в номинальном режиме. В режиме холостого хода ток в первичной обмотке I_{1xx} на порядок меньше номинального тока, поэтому можно считать, что $Z_1 I_{1xx} = 0$. Тогда из (7.4) $E_1 \approx -U_1$, т.е. ЭДС, возникающая в первичной обмотке, практически равна напряжению питания и находится в противофазе с ним.

Следовательно, измерив напряжение на первичной и вторичной обмотках трансформатора, легко определить его коэффициент трансформации

$$K = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{2xx}}. \quad (7.7)$$

Амплитудное значение магнитного потока в режиме холостого хода с учетом $E_1 = U_1$ и (7.1)

$$\Phi_m = \frac{U_1}{4,44 f w_1}. \quad (7.8)$$

Если пренебречь нагревом магнитопровода и первичной обмотки, то можно определить ток холостого хода, служащий для создания данного магнитного потока, по закону полного тока.

Амплитудное значение магнитной индукции

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S}, \quad (7.9)$$

где S – сечение сердечника, сквозь которое проходит магнитный поток.

Как бы плотно не стягивалась сталь магнитопровода, в нем всегда имеется воздушный зазор. Например, в маломощных трансформаторах этот зазор составляет 0,1 – 0,3 мм. Зная магнитную индукцию, можно определить амплитудное значение напряженности магнитного поля в воздушном зазоре

$$H_{0m} = \frac{B_m}{\mu_0}, \quad (7.10)$$

где $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Г/м – магнитная постоянная.

Амплитуду напряженности магнитного поля в магнитопроводе H_{ctm} можно определить по кривой намагничивания материала. По закону полного тока можно определить действующие значения тока холостого хода

$$I_{1xx} w_1 = \frac{(H_{ctm} l_{ct} + H_{om} \delta)}{\sqrt{2}}, \quad (7.11)$$

где l_{ct} – длина средней силовой линии магнитного потока по стали.

Формула (7.8) показывает, что магнитный поток, как ни странно, не зависит от качества стали, габаритов магнитопровода, величины воздушного зазора. Но все эти параметры влияют на ток холостого хода. Чем качественнее сталь, чем больше ее сечение и чем меньше воздушный зазор, тем меньше ток холостого хода, создающий данный магнитный поток, а величина тока холостого хода непосредственно влияет на КПД трансформатора. Формула (7.8) является ключевой для анализа работы трансформатора при изменении различных параметров. Например, требуется определить, как изменится ток холостого хода, если увеличить сечение магнитопровода.

В соответствии с (7.8) увеличение сечения никак не повлияет на величину магнитного потока, но индукция магнитного поля будет меньше (см. формулу (7.9)). Уменьшится и напряженность магнитного поля, как в стали (по кривой намагничивания), так и в воздушном зазоре (см. формулу (7.10)). Следовательно, трансформатор будет потреблять из сети в режиме холостого хода меньший ток, что в конечном итоге скажется на КПД трансформатора. Так как потери холостого хода уменьшатся, то КПД возрастет.

Как будет показано ниже, для идеализированного трансформатора при нагрузочном режиме между первичными и вторичными параметрами существуют простые соотношения

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{w_1}{w_2} \quad \text{и} \quad I_1 w_1 \approx I_2 w_2.$$

Увеличение сечения стали никак не отразится на магнитном потоке, поэтому ЭДС и напряжение вторичной обмотки останутся неизменными.

Аналогично рассуждают при изменении других параметров: питающего напряжения U_1 , числа витков первичной и вторичной обмоток, частоты f .

7.5. Нагрузочный режим трансформатора

Уравнение электрического равновесия в соответствии со вторым законом Кирхгофа (рис. 7.4):

– для первичной цепи

$$U_1 = Z_1 I_1 - E_1; \quad (7.12)$$

– для вторичной цепи

$$E_2 = Z_2 I_2 + U_2. \quad (7.13)$$

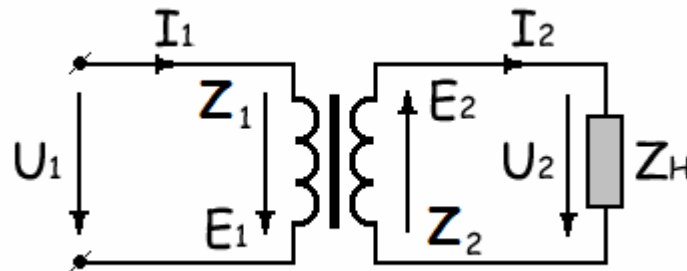


Рис. 7.4. Трансформатор под нагрузкой

Для идеализированного трансформатора, если пренебречь падением напряжения в обмотках и рассеянием магнитного потока ($Z_1 = Z_2 = 0$), уравнения электрического равновесия упрощаются:

$$U_1 \approx -E_1; \quad (7.14)$$

$$E_2 \approx U_2. \quad (7.15)$$

Следовательно коэффициент трансформации трансформатора приближенно можно определить отношением не ЭДС, а напряжений:

$$K = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \quad \text{или} \quad \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2}.$$

Под нагрузкой во вторичной цепи трансформатора возникает ток I_2 , который под действием мдс $w_2 I_2$ создает свой магнитный поток, направленный по закону Ленца навстречу основному магнитному потоку. Кажется бы, результирующий магнитный поток должен уменьшиться. Но это привело бы к уменьшению ЭДС E_1 (см. формулу (7.1)) и резкому увеличению тока I_1 (см. формулу (7.12))

$$I_1 = (U_1 + E_1) / Z_1.$$

Напомним, что U_1 и E_1 практически равны и находятся в противофазе (см. формулу (7.14)). Увеличение тока I_1 приводит к увеличению основного магнитного потока до такой величины, при которой компенсируется встречный магнитный поток от тока I_2 нагрузки. Электрическое равновесие $U_1 = -E_1$ может сохраниться только при неизменном магнитном потоке.

Таким образом, магнитный поток в стали магнитопровода не зависит от нагрузки.

Равенство магнитных потоков во всех режимах означает равенство магнитодвижущих сил, их создающих. В режиме холостого хода мдс равна $w_1 \mathcal{F}_{1xx}$. Под нагрузкой мдс создается двумя токами $w_1 I_1$ и $w_2 I_2$.

$$w_1 \mathcal{F}_{1xx} = w_1 \mathcal{F}_1 + w_2 \mathcal{F}_2 . \quad (7.16)$$

Разделив левую и правую части на W_1 , получим

$$\mathcal{F}_1 = \mathcal{F}_{1xx} - \frac{w_2 \mathcal{F}_2}{w_1} . \quad (7.17)$$

Если пренебречь током холостого хода и не учитывать фазы этих токов, то соотношение между токами будет иметь простой вид:

$$w_1 I_1 = w_2 I_2 . \quad (7.18)$$

Всякое изменение тока нагрузки I_2 вызывает соответствующее изменение тока в первичной цепи несмотря на то, что первичная и вторичная цепи электрически не связаны между собой.

Тот факт, что трансформаторы имеют высокий кпд, достигающий 99 % и выше, означает равенство мощностей первичной и вторичной цепей:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2 . \quad (7.19)$$

Если, например, напряжение вторичной обмотки трансформатора меньше напряжения первичной в 2 раза, то ток вторичной обмотки будет больше тока первичной обмотки в 2 раза.

Для маломощных трансформаторов эти соотношения выполняются с меньшей степенью точности.

7.6. Векторная диаграмма трансформатора

Построение векторной диаграммы начнем со вторичной цепи. Произвольно на плоскости направим вектор вторичного напряжения $U_2 \approx E_2$ (см. формулу (7.15)). Если пренебречь падением напряжения во вторичной

обмотке, то в соответствии со вторым законом Кирхгофа $\mathcal{E}_2 = U_2$. Ток во вторичной обмотке $I_2 = U_2 / Z_H$ будет сдвинут относительно напряжения на угол φ_2 , определенный конкретной нагрузкой. Для активной нагрузки $\varphi_2 = 0$ (на рис. 7.5 показан вектор I_2 , отстающий от напряжения U_2 на угол φ_2 для активно-индуктивной нагрузки). Вектор ЭДС E_1 совпадает по направлению с вектором ЭДС E_2 , магнитный поток Φ опережает векторы ЭДС на $\pi/2$ ($e = -d\psi/dt$). Ток холостого хода совпадает по фазе с магнитным потоком.

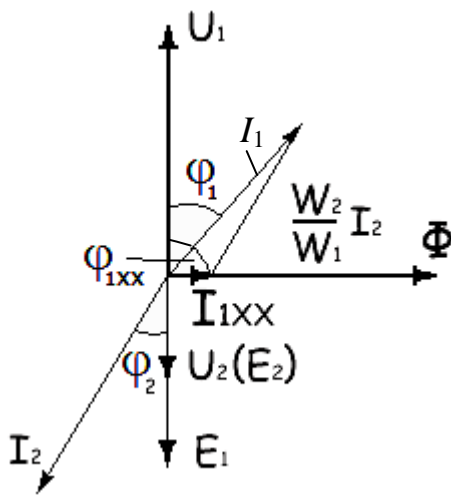


Рис. 7.5. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора

В соответствии с (7.14) напряжение U_1 равно E_1 по величине и противоположно по фазе. При этом ток I_{1xx} отстает от напряжения U_1 на угол $\varphi_{1xx} = 90^\circ$. Действительно, если пренебречь потерями в стали и активном сопротивлении первичной обмотки, характер этой нагрузки для сети является индуктивным.

Ток первичной обмотки I_1 состоит из геометрической разности двух токов (см. формулу (7.17): тока холостого хода I_{1xx} и тока вторичной обмотки I_2 , уменьшенному в K раз.

Фазный сдвиг между током и напряжением в первичной и вторичной обмотках будут практически равны ($\varphi_2 \approx \varphi_1$), т.к. ток холостого хода очень мал. Это означает, что трансформатор не искажает характер нагрузки.

Если, например, нагрузка активная ($\varphi_2 = 0$), то для первичной цепи система «трансформатор – нагрузка» также имеет активный характер ($\varphi_1 \approx 0$). Если нагрузкой вторичной цепи является конденсатор (емкостная нагрузка), то и в первичной цепи I_1 ток будет опережать напряжение U_1 на 90° .

7.7. Автотрансформаторы

В отличие от трансформатора в автотрансформаторе имеется одна обмотка, часть которой является общей и для первичной, и для вторичной цепей. Таким образом, во вторичную цепь электрическая энергия передается не только электромагнитным способом, но и электрическим (рис. 7.6).

По принципу действия автотрансформатор аналогичен трансформатору. Под действием приложенного напряжения U_1 ток в первичной цепи I_1 создает переменный магнитный поток. Пронизывая витки первичной и вторичной обмоток, поток создает в них ЭДС E_1 и E_2 . ЭДС E_2 является источником электрической энергии для вторичной цепи.

Коэффициент трансформации автотрансформатора

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Пренебрегая падением напряжения в обмотках, можно записать:

$$U_1 = E_1 \text{ и } U_2 = E_2, \text{ т.е. } U_2 = U_1/K.$$

Если пренебречь током холостого хода (см. формулу (7.17)), связь между первичным и вторичным током определяется зависимостью

$$I_1 = \frac{w_2 I_2}{w_1}, \text{ т.е. } I_1 = \frac{I_2}{K}.$$

По общей для первичной и вторичной обмоток части течет суммарный ток $I_3 = I_1 + I_2$, но так как эти токи находятся в противофазе (см. ВД трансформатора), то геометрическая сумма этих токов в данном случае означает арифметическую разность. Следовательно, общую часть обмотки автотрансформатора можно выполнить проводом меньшего сечения, и она для своего размещения потребует меньшее «окно», в результате чего уменьшается не только вес обмоточного провода, но и вес магнитопровода. Уменьшение массы и габаритов, снижение потерь в сердечнике и обмотках повышает КПД автотрансформатора.

Эти преимущества заметны при невысоком коэффициенте трансформации ($K < 2$). Таким образом, преимуществом автотрансформатора является его экономичность, а недостатком – электрическая связь между обмотками высшего и низшего напряжений, что может быть опасным для обслуживающего персонала.

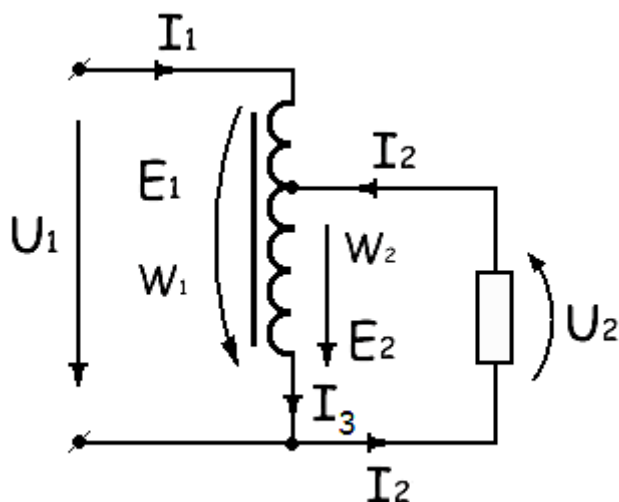


Рис. 7.6. Автотрансформатор

Автотрансформатор часто используется для регулирования напряжения вторичной цепи. В этом случае вторичная обмотка имеет много ответвлений. В лабораторных установках небольшой мощности (до 2 кВт) используются регулировочные автотрансформаторы со скользящим по изолированной поверхности витков обмотки щеточным контактом.

В настоящее время автотрансформаторы применяются в качестве силовых и выполняются как однофазными, так и трехфазными.

7.8. Трехфазные трансформаторы

Трехфазную систему токов можно трансформировать или тремя однофазными трансформаторами, или одним трехфазным.

Трехфазный трансформатор имеет три стержня, на которых располагаются первичные и вторичные обмотки (рис. 7.7).

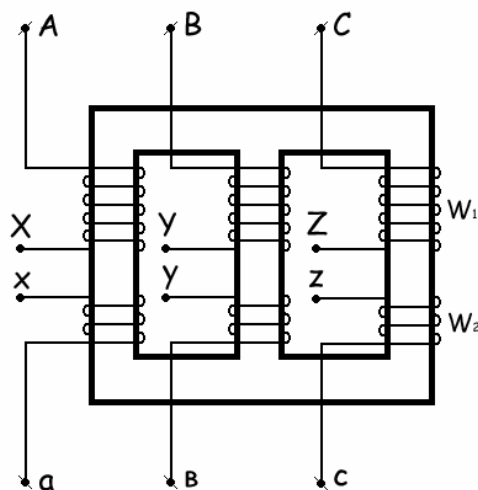


Рис. 7.7. Трехфазный трансформатор

Начала и концы обмоток высшего напряжения обозначают буквами A, B, C и X, Y, Z, а низшего напряжения – a, b, c и x, y, z. Эти обмотки могут быть соединены звездой или треугольником. Схемы соединения обмоток трансформатора обозначают дробью, в числителе которой указана схема соединения первичных обмоток, а в знаменателе – вторичных обмоток.

Например, Y/Δ означает, что первичные обмотки соединены в звезду, а вторичные – в треугольник.

При соединении звездой концы фазных обмоток (X, Y, Z или x, y, z) соединяют между собой в общую точку, которая называется нейтральной точкой N или n, а начала этих обмоток подключаются или к трехфазной сети (первичные обмотки), или к трехфазной нагрузке (вторичные обмотки).

При соединении обмоток треугольником конец одной фазы соединяют с началом следующей и так далее в замкнутый контур. (X соединяют с B, Y – с C, Z – с A).

На рис. 7.8 показаны три схемы соединения обмоток, которые в основном используются в силовых трехфазных сетях: Y/Y_N, Y/Δ и Y_N/Δ.

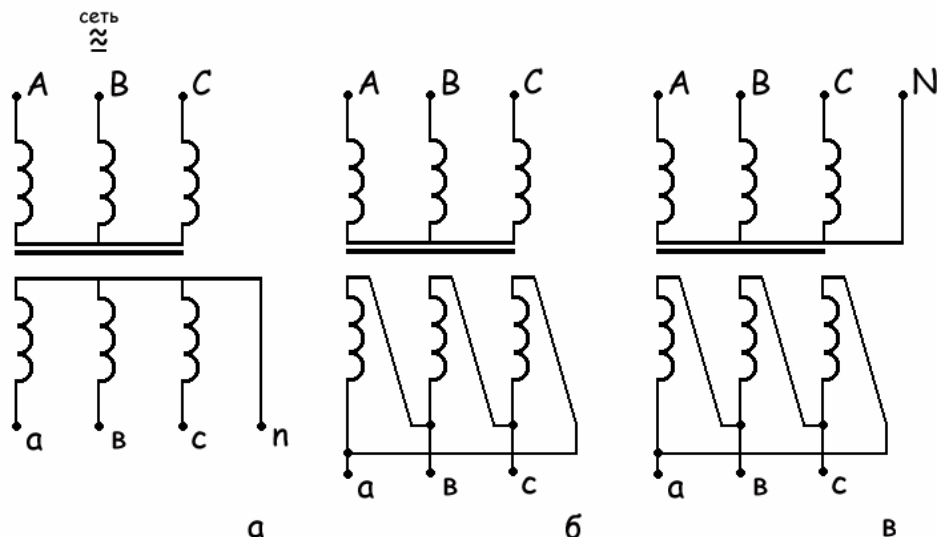


Рис. 7.8. Схемы соединения трехфазных обмоток: а – Y/Y_N; б – Y/Δ; в – Y_N/Δ

Как и для однофазных трансформаторов, коэффициент трансформации трехфазного трансформатора определяется отношением фазных или линейных напряжений:

$$K_{\Phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} \quad \text{или} \quad K_L = \frac{U_1}{U_2}.$$

Номинальная мощность трехфазного трансформатора

$$S_H = \sqrt{3}U_H I_H,$$

где U_H и I_H – номинальные линейные напряжение и ток.

В паспорте трансформатора для первичной и вторичной цепей указывается номинальное линейное напряжение, соответствующее соединению этих обмоток треугольником и звездой.

Например, для первичных обмоток обозначение Δ/Y 380/660 значит, что эти обмотки можно включать в сеть с линейным напряжением или 380, или 660 В. Известно, что при соединении треугольником фазное напряжение (непосредственно на обмотке) равно линейному, а при соединении звездой фазное напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньше линейного. Следовательно, наименьшее из указанных напряжений является номинальным фазным (в данном случае 380 В).

Таким образом, обмотки должны быть подсоединены так, чтобы обеспечить номинальное фазное напряжение.

Если линейное напряжение сети 660 В, обмотки следует соединить звездой, если 380 В – треугольником. В обоих случаях на первичных обмотках (фазах) будет номинальное напряжение 380 В.

На рис. 7.9 показана развернутая схема подключения асинхронного электродвигателя напряжением 380/660 В к сети с линейным напряжением 660 В через трехфазный трансформатор, первичная обмотка которого рассчитана на напряжение 380/660 В, а вторичная – 220/380 В.

Вторичные обмотки являются источником новой трехфазной сети и, например, запись Δ/Y 220/380 В означает, что, соединив обмотки треугольником, получим сеть с линейным напряжением 220 В, звездой – 380 В. А номинальное фазное напряжение на вторичной обмотке (220 В) будет в том случае, если правильно подсоединены первичные обмотки.

Напряжение на нагрузке, например, на асинхронном электродвигателе, 380/660 также означает, что эту нагрузку, подобно первичным обмоткам трансформатора, можно включать в сеть с линейным напряжением и 380, и 660 В, но обязательно таким образом, чтобы обеспечить на фазе номинальное напряжение (наименьшее из указанных линейных напряжений, в данном случае – 380 В).

Если в сети с линейным напряжением 660 В первичные обмотки ошибочно соединить треугольником, то на вторичной обмотке будет не 220 В, а 380 В. Итак, вторичная обмотка трансформатора может создать новую сеть для питания электродвигателя с линейным напряжением или 220 В (при соединении обмоток треугольником), или 380 В (звездой), а двигатель требует для своего питания или 380 В (тогда он должен подключаться треугольником), или 660 В (звездой). Общим линейным напряжением в этом случае является напряжение в 380 В.

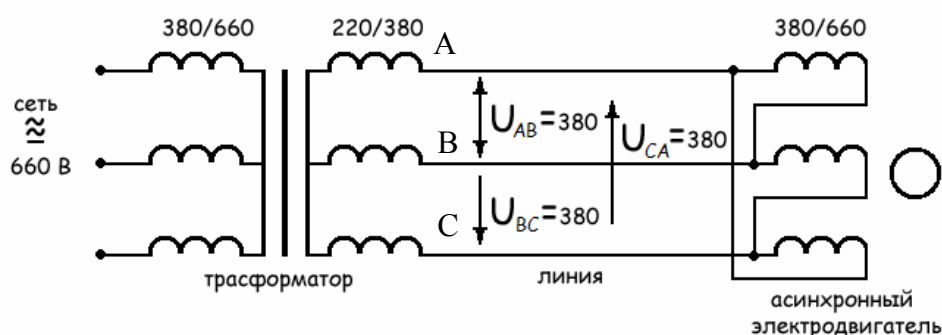


Рис. 7.9. Схема подключения трехфазной нагрузки к сети с помощью трехфазного трансформатора

7.9. Многообмоточные трансформаторы

Многообмоточные маломощные однофазные трансформаторы применяются в радиотехнике для получения одновременно нескольких различных по величине напряжений переменного тока. Обычно они имеют одну первичную обмотку A_1X_1 и несколько вторичных обмоток высшего и низшего напряжений (рис. 7.10).

Принцип работы многообмоточного трансформатора не отличается от принципа работы двухобмоточного. Достоинством многообмоточного трансформатора является то, что, соединяя вторичные обмотки последовательно согласно или встречно, можно получить источники с различными напряжениями.

Например, если имеются две вторичные обмотки, рассчитанные на напряжение 12 и 36 В, то, соединяя эти обмотки последовательно согласно, получим источник с напряжением 48 В, а соединяя их последовательно и встречно – 24 В.

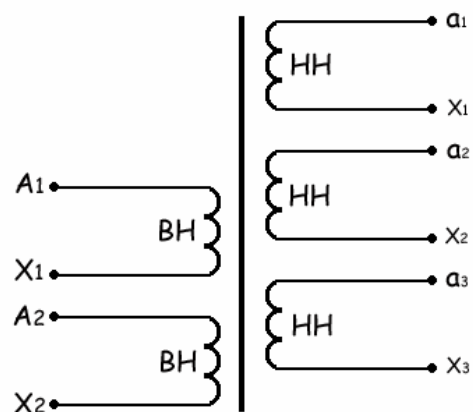


Рис. 7.10. Многообмоточный трансформатор

7.10. Согласующий трансформатор

Согласующий трансформатор применяется в радиотехнике для согласования высокоомного источника питания с низкоомной нагрузкой.

Из теории цепей известно, что максимальная мощность на нагрузку передается при равенстве внутреннего сопротивления источника и сопротивления нагрузки. Если сопротивление нагрузки значительно меньше сопротивления источника питания, то непосредственное питание такой нагрузки соответствует режиму, близкому к короткому замыканию.

Если нагрузку включить через трансформатор с коэффициентом трансформации K , то сопротивление системы трансформатор – нагрузка увеличивается в K^2 раз. Действительно, эквивалентное сопротивление трансформатора и нагрузки

$$Z_{\text{экв}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{KU_2}{\frac{I_2}{K}} = K^2 \frac{U_2}{I_2} = K^2 Z_H.$$

Если, например, сопротивление динамика равно 10 Ом, а он должен питаться от усилителя с выходным сопротивлением 1 кОм, то для получения максимальной громкости необходимо включить согласующий трансформатор с коэффициентом трансформации $K = 10$,

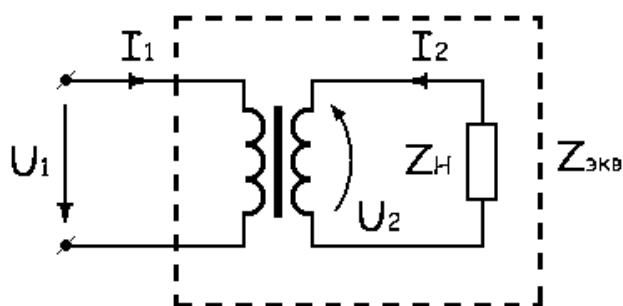


Рис. 7.11 . Включение нагрузки через согласующий трансформатор

который увеличивает сопротивление нагрузки в 100 раз. Правда, режим передачи максимальной мощности соответствует КПД, равному 50 %, но в маломощных цепях этот параметр не является определяющим.

7.11. Измерительные трансформаторы

Измерительные трансформаторы служат для расширения пределов измерения измерительных приборов и для электрического разделения цепи высшего напряжения и цепи низшего напряжения, где находятся приборы и аппараты управления, защиты. Этим самым обеспечивается безопасность обслуживающего персонала.

Различают измерительные трансформаторы напряжения ТН и измерительные трансформаторы тока ТА.

Измерительные трансформаторы напряжения по устройству мало отличаются от силовых трансформаторов. Так как нагрузкой трансформаторов напряжения являются высокоомные обмотки вольтметров, обмотки напряжения ваттметров, счетчиков и других приборов, то их режим работы близок к холостому ходу. При этом с высокой степенью точности выполняется соотношение $U_1 = K_V U_2$, где K_V – коэффициент трансформации трансформатора напряжения. Таким образом, измерив напряжение вторичной цепи по номинальным значениям напряжения первичной и вторичной обмоток, определяют измеряемое первичное напряжение.

Например, вольтметр, включенный во вторичную цепь трансформатора напряжения ТН 400/100, показал 55 В. Следовательно, напряжение первичной цепи равно 220 В.

Измерительные трансформаторы тока работают в режиме, близком к короткому замыканию, т.к. нагрузкой трансформатора тока являются амперметры, токовые обмотки счетчика, обмотки реле тока и другие низкоомные приборы и аппараты. При этом первичная обмотка включается последовательно с нагрузкой в рассечку цепи. В этом случае режим короткого замыкания не является аварийным, т.к. напряжение на первичной обмотке практически равно нулю. Как известно, в режиме короткого замыкания с большей степенью точности выполняется соотношение между токами $w_1 I_1 = w_2 I_2$. Если обозначить через $K_I = \frac{w_2}{w_1}$ коэффициент трансформации трансформатора тока, то измеряемый ток $I_1 = K_I I_2$.

Например, амперметр, включенный во вторичную цепь трансформатора тока ТА 100/5 с номинальными токами первичной и вторичной обмоток 100 и 5 А, показал 4 А. Следовательно, ток в первичной цепи равен 80 А.

На рис. 7.12 показана схема измерения тока, напряжения и электрической энергии с помощью измерительных трансформаторов. При этом указана маркировка клеммных выводов обмоток.

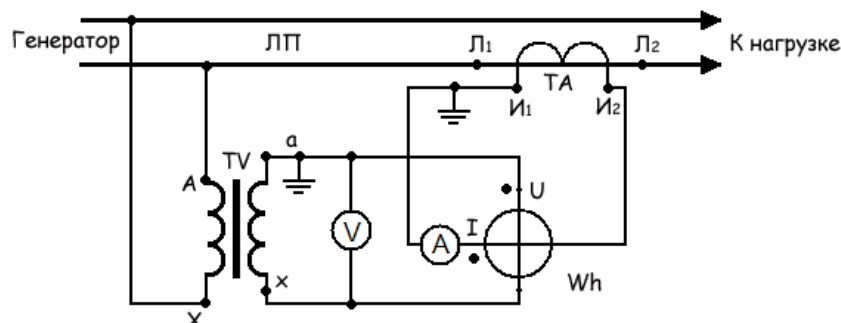


Рис. 7.12. Схема включения счетчика электрической энергии, амперметра и вольтметра с помощью измерительных трансформаторов

7.12. Сварочные трансформаторы

К силовым трансформаторам относятся сварочные трансформаторы, которые используются при дуговой электрической сварке. Режим работы этих трансформаторов близок к короткому замыканию. Поэтому для ограничения сварочного тока и устойчивого горения электрической дуги во вторичную цепь вводят дополнительное (обычно реактивное) сопротивление. Например, дроссель с регулируемым воздушным зазором позволяет регулировать сварочный ток изменением величины воздушного зазора. Чем меньше воздушный зазор, тем больше величина реактивного сопротивления, тем меньше сварочный ток.

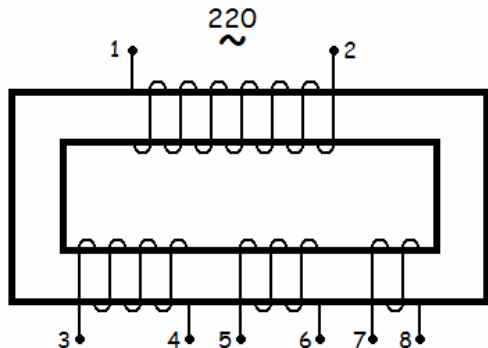
Величину сопротивления во вторичной цепи можно также регулировать плавным изменением индуктивной связи между первичной и вторичной обмотками. Это может быть достигнуто, например, изменением положения вторичной обмотки относительно первичной.

Если перемещать вторичную обмотку вдоль магнитопровода, удаляя ее от первичной, то сварочный ток будет уменьшаться. Это происходит потому, что часть магнитного потока, создаваемая током первичной обмотки, будет рассеиваться в пространстве и ЭДС вторичной обмотки будет уменьшаться. Обычно напряжение вторичной обмотки в режиме холостого хода равно 60 – 70 В, а под нагрузкой, во время сварки, оно падает до 25 – 30 В.

Сварочные трансформаторы выпускаются на номинальные токи 100, 350, 500 и 700 А. Наиболее употребительные трансформаторы – на 350 и 500 А – имеют пределы регулирования сварочного тока соответственно 100 – 500 А и 150 – 700 А.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. Для какой цели на электрических станциях в начале линии электропередачи устанавливают повышающие трансформаторы?
2. Какие параметры трансформатора будут изменяться, если убрать сталь магнитопровода? В частности, будет ли изменяться магнитный поток?
3. Как практически можно определить число витков первичной и вторичной обмоток, не нарушая целостности трансформатора?
4. Обмотки однофазного трансформатора с номинальным напряжением 220/110 В включили последовательно на напряжение 120 В. Затем поменяли клеммы одной из обмоток. Определить напряжение на обмотках в обоих случаях.

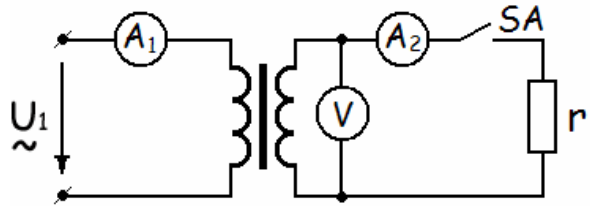


5. Можно ли использовать многообмоточный трансформатор с номинальными напряжениями вторичных обмоток $U_{34} = 175$ В, $U_{56} = 36$ В, $U_{78} = 12$ В для питания нагрузки, рассчитанной на 127 В (см. рис.)? Показать схему подключения.

6. Какое минимальное количество вторичных обмоток однофазного трансформатора необходимо иметь и на какое напряжение они должны быть рассчитаны, чтобы получить ряд номинальных напряжений от 0 до 130 В через каждые 10 В?
7. Три вторичные обмотки однофазного трансформатора рассчитаны на напряжения 12, 36 и 108 В. Какие напряжения можно получить во вторичной цепи кроме указанных?

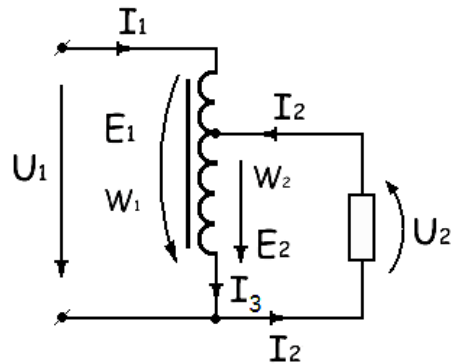
8. Как изменятся показания приборов, если:

- уменьшить число витков первичной обмотки;
- уменьшить число витков вторичной обмотки;
- увеличить напряжение питания;
- увеличить частоту питающего напряжения;
- увеличить сечение магнитопровода;
- убрать стальной сердечник (см. рис.).



Ответ дать для разомкнутого и замкнутого тумблера SA.

9. Чему равны токи I_1 и I_3 автотрансформатора (см. рис.), если ток нагрузки $I_2 = 5$ А, а движок находится в среднем положении? Как будут изменяться эти токи при перемещении движка автотрансформатора из среднего положения вверх?



10. Как можно определить начало и конец вторичных обмоток трехфазного трансформатора с помощью вольтметра, если известна маркировка одной из них?

11. Как следует соединить три вторичные обмотки трехфазного трансформатора, чтобы получить наибольшее однофазное напряжение? Решение пояснить векторной диаграммой.

12. Чему должен быть равен фазный коэффициент трансформации трехфазного трансформатора, первичная и вторичная обмотки которого соединены звездой, если линейное напряжение первичной цепи равно 380 В, а вторичная питает три группы ламп с номинальным напряжением 127 В, которые соединены треугольником?

13. Трехфазный трансформатор мощностью 40 кВ·А и напряжением 10/0,4 кВ питает нагрузку мощностью 25 кВт при коэффициенте мощности 0,8. Определить линейные токи первичной и вторичной цепей. Чему равен коэффициент загрузки трансформатора?

8. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрические машины служат для преобразования механической энергии в электрическую (генераторы) и электрической – в механическую (электродвигатели).

8.1. Устройство машины постоянного тока

Основные конструктивные элементы машины постоянного тока показаны на рис. 8.1.

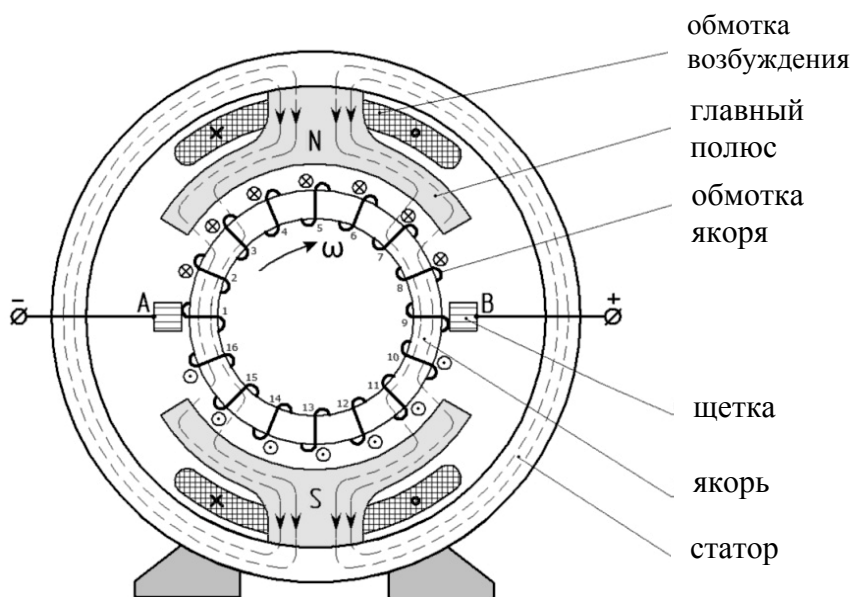


Рис. 8.1. Устройство машины постоянного тока

Электрическая машина состоит из двух частей: неподвижной – статора и вращающейся – якоря.

Статор представляет собой полый цилиндр, отлитый из чугуна, к внутренней поверхности которого крепятся главные полюсы. В большинстве случаев между главными полюсами крепятся дополнительные полюсы (на рис. 8.1 не показаны). На главные полюсы наматывается обмотка возбуждения, которая, как правило, состоит из двух половин, соединенных последовательно. Якорь представим также в виде полого цилиндра, на который наматывается непрерывная замкнутая обмотка. К обмотке якоря примыкают неподвижные щетки, которые делят обмотку на две параллельные ветви.

Щетки подключаются к электрической нагрузке, если электрическая машина работает в режиме генератора, или к щеткам подключают внешний источник питания, если машина работает в режиме двигателя.

Электродвижущая сила в машине постоянного тока (МПТ) образуется следующим образом. Включаем обмотку возбуждения в сеть постоянного тока. Ток в обмотке возбуждения создает постоянный магнитный поток, который проходит через главные полюсы, воздушный зазор, и, раздваиваясь, замыкается по якорю и статору. Необходимо помнить, что магнитные силовые линии должны быть замкнутыми.

Если якорь вращать, например, по часовой стрелке, то согласно закону электромагнитной индукции во внешних частях витков обмотки якоря возникает ЭДС. Направление ЭДС определяется правилом правой руки. Ладонь располагается перпендикулярно к магнитным силовым линиям таким образом, чтобы они входили в ладонь, большой палец должен быть направлен в сторону движения проводника относительно поля, тогда четыре пальца правой руки покажут направление ЭДС.

Таким образом, в проводниках, расположенных под северным полюсом, ЭДС направлена от нас (обозначено крестиком), а под южным полюсом – к нам (обозначено точкой) (см. рис. 8.1). Так как все витки соединены последовательно и согласно, эти ЭДС складываются, а общая ЭДС между щетками будет равна сумме в одной параллельной ветви (рис. 8.2).

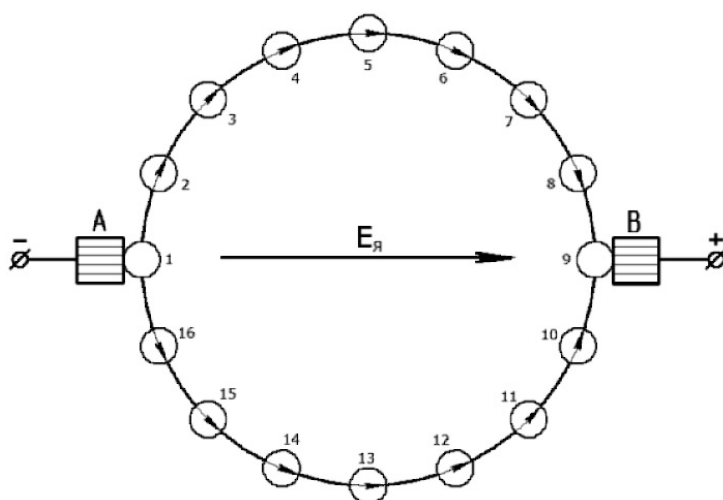


Рис. 8.2. Образование ЭДС якоря во вращающейся машине постоянного тока

Такая конструкция якоря несовершенна, т.к. щетки скользят непосредственно по оголенной части обмотки якоря, а в тех частях обмотки, которые находятся под якорем, магнитного поля нет, и ЭДС в них не образуется.

В реальной машине щетки скользят не по обмотке, а по специальным медным пластинам – ламелям, которые образуют коллектор. При этом от каждого витка или через несколько витков обмотки якоря делают отпайки к коллекторным пластинам, которые изолируются друг от друга.

Кроме того, обмотка якоря укладывается в пазы на внешней поверхности барабанного якоря. Если, например, прямой провод обмотки уложен в пазу под северным полюсом, то обратный провод уложен в пазу под южным полюсом. Таким образом уменьшается длина неактивной части обмотки и повышается ЭДС обмотки якоря.

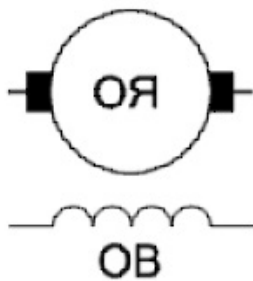


Рис. 8.3. Условное графическое изображение машины постоянного тока

В этом случае неактивными являются только лобовые (торцевые) части обмотки.

Условное графическое изображение электрических элементов МПТ (обмотки якоря и обмотки возбуждения) показано на рис. 8.3. Обмотка якоря изображается в виде окружности с примыкающими к ней щетками, а обмотка возбуждения – как индуктивность – четырьмя полуокружностями.

8.2. ЭДС обмотки якоря и электромагнитный момент

Независимо от режима работы машины постоянного тока (генераторного или двигательного) при вращении якоря в обмотке образуется ЭДС. Известно, что в прямом проводнике длиной l , движущемся со скоростью v и находящемся в однородном магнитном поле с индукцией B , ориентированном перпендикулярно к проводнику, возникает ЭДС $e = lBv$. Следовательно, ЭДС обмотки якоря пропорциональна скорости вращения якоря и интенсивности магнитного поля

$$E_{\text{я}} = k\Phi\omega, \quad (8.1)$$

где ω – угловая скорость вращения якоря (рад/с или с^{-1}); Φ – магнитный поток под одним полюсом; k – безразмерный коэффициент пропорциональности, зависящий от геометрии машины, количества проводников и числа пар параллельных ветвей.

Если по проводнику длиной l , который находится в однородном магнитном поле с индукцией B , ориентированной перпендикулярно к этому току, проходит ток $I_{Я}$, то на этот ток действует сила $f = lBI_{Я}$. Направление электромагнитной силы определяется правилом левой руки. (Ладонь располагают перпендикулярно к вектору магнитной индукции. Четыре пальца показывают направление тока, а большой палец – направление силы).

Суммарное действие этих сил создает электромагнитный момент

$$M_{ЭМ} = k\Phi I_{Я}. \quad (8.2)$$

8.3. Режим генератора

В режиме генератора якорь вращается первичным двигателем (ПД), а обмотка возбуждения включена в сеть постоянного тока (рис. 8.4, а). При вращении якоря в обмотке создается ЭДС $E_{Я}$, которая питает электрическую нагрузку.

Рассмотрим физические процессы и некоторые количественные соотношения для одного проводника обмотки якоря и распространим эти выводы на всю машину.

В соответствии с законом электромагнитной индукции в движущемся в магнитном поле проводнике возникает ЭДС. Под действием этой ЭДС возникает ток $I_{Я}$. Если этот элементарный источник тока замкнуть на электрическую нагрузку, то по второму закону Кирхгофа $E_{Я} = R_{Я}I_{Я} + U$ (см. рис. 8.4). То есть напряжение на зажимах якоря меньше его ЭДС на величину падения напряжения в обмотке якоря

$$U = E_{Я} - R_{Я}I_{Я}. \quad (8.3)$$

На ток в магнитном поле действует сила f (закон Ампера). Направление этой силы определяется правилом левой руки. Суммарное действие этих сил создает электромагнитный момент $M_{ЭМ} = k\Phi I_{Я}$, который направлен против вращения якоря. Это означает, что электромагнитный момент в генераторе является тормозным.

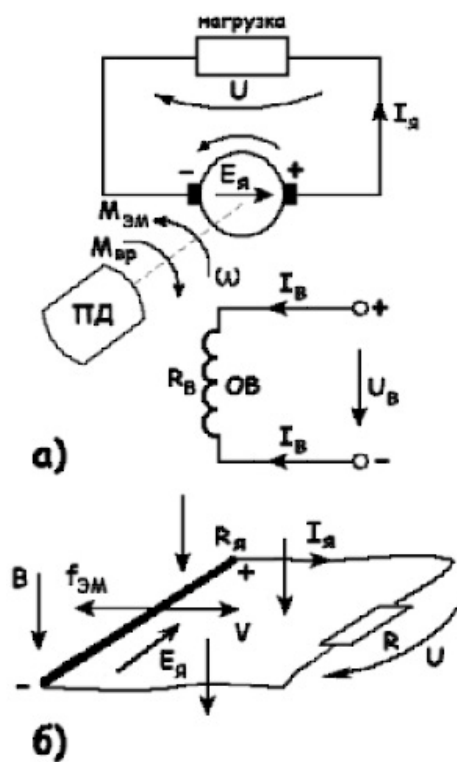


Рис. 8.4. Режим генератора

Если увеличить электрическую нагрузку (уменьшить внешнее сопротивление R), то с возрастанием тока увеличивается тормозной электромагнитный момент и для вращения генератора необходимо увеличить вращающий момент первичного двигателя.

На холостом же ходу (внешнее сопротивление отключено) ток якоря равен нулю, следовательно, тормозной электромагнитный момент не возникает и первичный двигатель будет создавать небольшой вращающий момент, который должен преодолеть только механический момент трения.

Если левую и правую части уравнения (8.3) умножить на $I_{\text{я}}$, то получим энергетическое уравнение

$$UI_{\text{я}} = E_{\text{я}}I_{\text{я}} - R_{\text{я}}I_{\text{я}}^2 \quad \text{или} \quad P_{\text{эл}} = P_{\text{мех}} - \Delta P,$$

где

$$P_{\text{мех}} = E_{\text{я}}I_{\text{я}} = \kappa\Phi\omega I_{\text{я}} = \omega M_{\text{эм}}.$$

Электрическая мощность нагрузки равна механической мощности первичного двигателя за вычетом потери мощности в обмотке якоря.

Коэффициент полезного действия генератора $\eta_2 = \frac{P_{\text{эл}}}{P_{\text{мех}}}$.

В зависимости от схемы включения обмотки возбуждения различают генераторы с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (рис. 8.5).

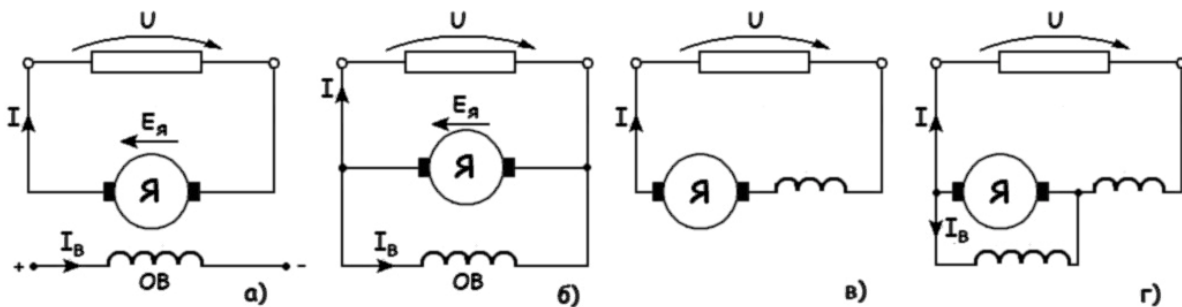


Рис. 8.5. Возбуждения генератора:
 а – независимое; б – параллельное;
 в – последовательное; г – смешанное

Режим работы генератора определяется следующими параметрами: напряжением на зажимах якоря U , током нагрузки I , током в цепи возбуждения $I_{\text{в}}$ и скоростью вращения якоря ω .

Для анализа работы генератора в различных режимах снимают различные характеристики.

Характеристика холостого хода (рис. 8.6, а) $E = f(I_g)$ показывает, как изменяется напряжение на зажимах генератора, когда нагрузка отключена ($I = 0$), при изменении тока возбуждения. Характеристика снимается при номинальной скорости вращения якоря и подобна кривой намагничивания. Номинальная ЭДС выбирается обычно в режиме, близком к насыщению.

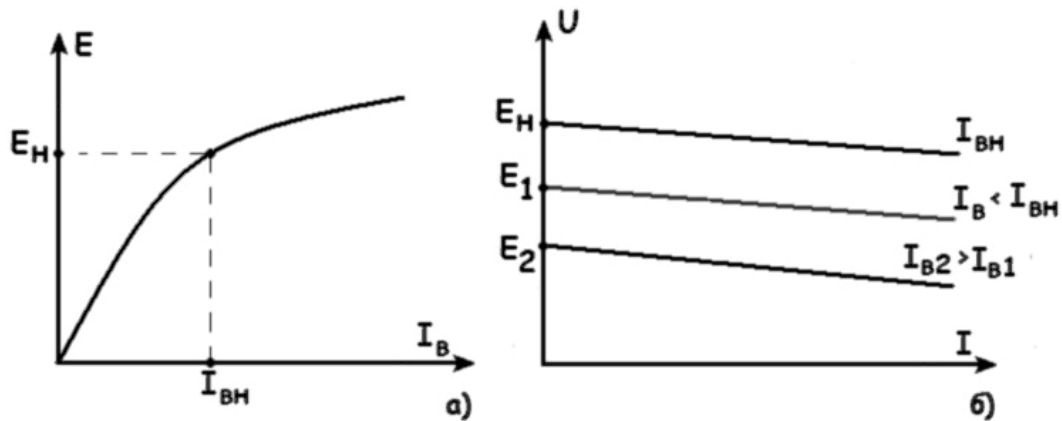


Рис. 8.6. Характеристики генератора:

а – характеристика холостого хода; б – семейство внешних характеристик

Внешняя характеристика (см. рис. 8.6, б) $U = f(I)$ (снимается при $I_g = \text{const}$ и $\omega = \text{const}$) показывает, как изменяется напряжение на зажимах генератора в зависимости от электрической нагрузки.

$$U = E_{\text{я}} - R_{\text{я}}I.$$

При уменьшении тока возбуждения уменьшается ЭДС ($E_{\text{я}} = k\Phi\omega$ и $\Phi \propto I_g$), но наклон характеристик не изменяется.

8.4. Режим двигателя

В режиме двигателя и обмотка якоря, и обмотка возбуждения включены в сеть постоянного тока (обычно в одну сеть) (рис. 8.7, а). При этом машина развивает вращающий момент, под действием которого вал якоря будет вращаться со скоростью ω . На валу якоря располагается рабочая машина (РМ), создающая тормозной момент. В установившемся режиме вращающий момент, развиваемый двигателем, должен уравновесить момент сопротивления.

На рис. 8.7, б показан один проводник обмотки якоря сопротивлением $R_{\text{я}}$, который включен на напряжение сети U . При этом создается ток $I_{\text{я}}$, на который в магнитном поле действует сила f (закон Ампера). Эта сила создает электромагнитный момент, который вращает РМ, создающую момент сопротивления. В проводниках обмотки якоря, вращающегося с угловой скоростью ω , возникает ЭДС, направленная навстречу току.

По второму закону Кирхгофа

$$E_{\text{я}} = U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$$

или

$$U = E_{\text{я}} + R_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (8.3)$$

Напряжение источника должно уравновесить ЭДС якоря и падение напряжения в обмотке якоря.

Ток в обмотке якоря определяется не только напряжением сети, но и противо-ЭДС обмотки якоря, величина которой составляет около 90 % от напряжения сети в номинальном режиме.

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}}. \quad (8.4)$$

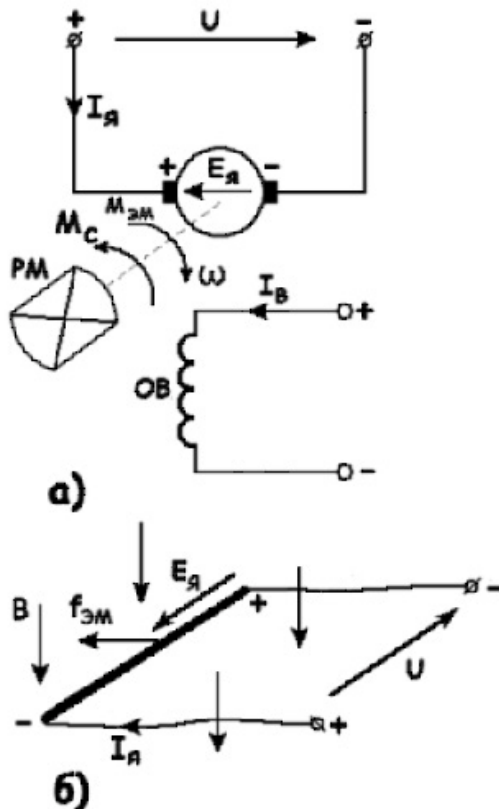


Рис. 8.7. Режим двигателя

При увеличении механической нагрузки $M_{\text{с}}$ скорость вращения двигателя падает. Это приводит к уменьшению противо-ЭДС (см. формулу (8.1) и, как следствие, – к возрастанию тока якоря (см. формулу (8.4)). При этом электромагнитный момент $M_{\text{эм}}$ возрастает (см. формулу (8.2)). Увеличение электромагнитного момента будет происходить до тех пор, пока $M_{\text{эм}}$ не станет равным моменту сопротивления $M_{\text{с}}$.

Свойство электродвигателя автоматически поддерживать равенство между вращающим моментом и моментом сопротивления рабочей машины называется саморегулированием.

8.5. Механические характеристики электродвигателя

На рис. 8.8, а показана схема включения электродвигателя. В цепи обмотки якоря и обмотки возбуждения включены регулировочные сопротивления R_p и $R_в$. Электродвигатель приводит во вращение рабочую машину РМ со скоростью ω , развивая электромагнитный момент, равный и противоположно направленный моменту сопротивления рабочей машины.

При вращении в обмотке якоря возникает противо-ЭДС.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$U = E_{\text{я}} + (R_p + R_{\text{я}})I_{\text{я}} = k\Phi\omega + (R_p + R_{\text{я}})I_{\text{я}} \quad (8.5)$$

откуда

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{(R_p + R_{\text{я}})}{k\Phi} I_{\text{я}} \quad (8.6)$$

Ток якоря зависит от электромагнитного момента $I_{\text{я}} = \frac{M_{\text{ЭМ}}}{k\Phi}$.

Следовательно,

$$\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{(R_p + R_{\text{я}})}{(k\Phi)^2} M_{\text{ЭМ}} \quad (8.7)$$

Зависимость (8.6) $\omega = f(I_{\text{я}})$ называется электромеханической характеристикой, а зависимость (8.7) $\omega = \varphi(M_{\text{ЭМ}})$ – механической характеристикой (см. рис. 8.8, б).

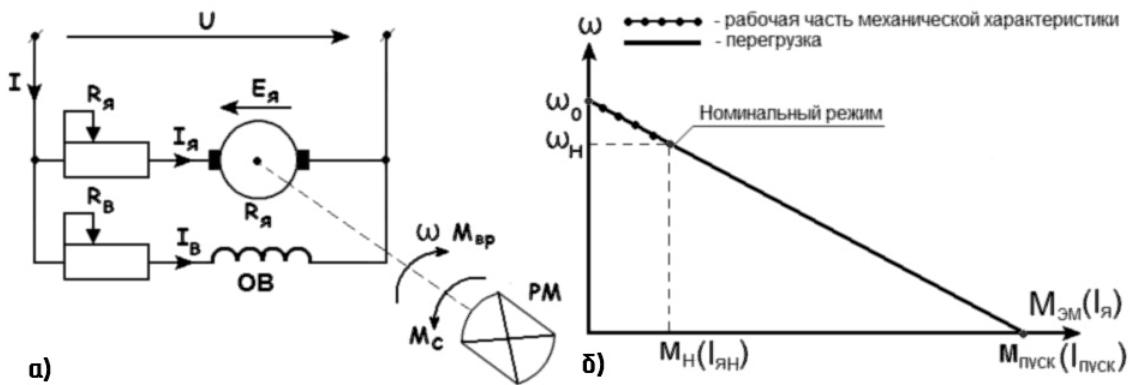


Рис. 8.8. Схема включения двигателя (а) и его электромеханическая и механическая характеристики (б)

Эти характеристики можно построить в одних осях, т.к. ток якоря при неизменном магнитном потоке пропорционален электромагнитному моменту.

Механическая характеристика представляет собой прямую линию, которую можно построить по двум точкам.

При $M_{ЭМ} = 0$ (режим холостого хода) скорость холостого хода $\omega_0 = U/k\Phi$ максимальна, с увеличением электромагнитного момента она уменьшается. Момент, при котором скорость равна нулю, называется пусковым. Номинальный момент на порядок меньше пускового.

Кажется странным, что с увеличением вращающего момента скорость двигателя не возрастает, а уменьшается. Но механическая характеристика снимается в установившемся режиме, при котором скорость вращения двигателя постоянна. В этом режиме электромагнитный момент устанавливается равным моменту сопротивления рабочей машины. То есть электромагнитный момент не является независимым параметром. Он устанавливается в зависимости от механической нагрузки ($M_{ЭК} = M_C$).

Поэтому зависимость $\omega = \varphi(M_{ЭМ})$ надо понимать так: **механическая характеристика двигателя показывает, как изменяется скорость вращения двигателя при изменении нагрузки на его валу.**

В режиме идеального холостого хода $M_C = 0$ и, следовательно, $M_{ЭМ} = k\Phi I_{Я} = 0$. В этом режиме якорь не потребляет ток $\left(I_{Я} = \frac{U - E_{Я}}{k\Phi} \right)$.

Это будет иметь место при $E_{Я} = U$. Иначе говоря, при отсутствии механической нагрузки двигатель будет разгоняться до скорости ω_0 , при которой ЭДС обмотки якоря сравняется с напряжением сети.

Чем больше будет механическая нагрузка, тем большим должен быть электромагнитный момент $M_{ЭМ} = k\Phi I_{Я}$, тем больший ток должен потреблять электродвигатель.

Увеличение тока происходит за счет уменьшения противо-ЭДС, которая пропорциональна скорости вращения.

Следовательно, при увеличении нагрузки, чтобы развивать больший электромагнитный момент, двигатель вынужден потреблять больший ток из сети ценой уменьшения скорости вращения.

8.6. Регулирование скорости вращения двигателя

В соответствии с формулой (8.7) скорость вращения двигателя при заданном моменте сопротивления на валу можно регулировать тремя способами: изменением сопротивления в цепи якоря ($R_p = var$), изменением магнитного потока ($\Phi(I_B) = var$) и изменением напряжения питания ($U = var$).

Первый способ ($R_P = var$)

При изменении сопротивления в цепи якоря скорость холостого хода $\omega_0 = U/k\Phi$ остается неизменной, а наклон механической характеристики увеличивается с увеличением сопротивления (рис. 8.9).

Если в цепи якоря отсутствует регулировочное сопротивление ($R_P = 0$), то такая характеристика называется естественной. При нагрузке M_C двигатель будет развивать скорость ω . При

включении различных сопротивлений (R_{P1} , R_{P2}) скорость вращения (при данной нагрузке) будет уменьшаться с увеличением сопротивлений.

Преимуществом этого способа регулирования является его простота, основным недостатком – неэкономичность. Действительно, регулирование производится в силовой, сильнотоочной цепи (цепи якоря). При этом требуется большого габарита реостат, который будет выделять значительную тепловую энергию, бесполезно рассеиваемую в пространстве.

Кроме того, при увеличении сопротивления механические характеристики становятся более «мягкими», т.е. при небольших колебаниях нагрузки скорость привода резко изменяется. Это сокращает диапазон регулирования. Считается, что минимальная скорость при номинальном моменте определяется на той механической характеристике, на которой двойная номинальная нагрузка вызывает полную остановку двигателя. Диапазон регулирования определяется отношением максимальной скорости к минимальной. При таком способе регулирования он не превышает двух: $D = \omega_{max}/\omega_{min} \approx 2:1$.

Наконец, регулировать скорость этим способом можно только «вниз» от основной скорости. С учетом таких существенных недостатков этот способ можно применять в приводах небольшой мощности, где экономический фактор не играет большой роли.

Второй способ ($\Phi(I_B) = var$)

Изменять магнитный поток можно только уменьшая его по отношению к номинальному, т.к. магнитную индукцию в номинальном режиме

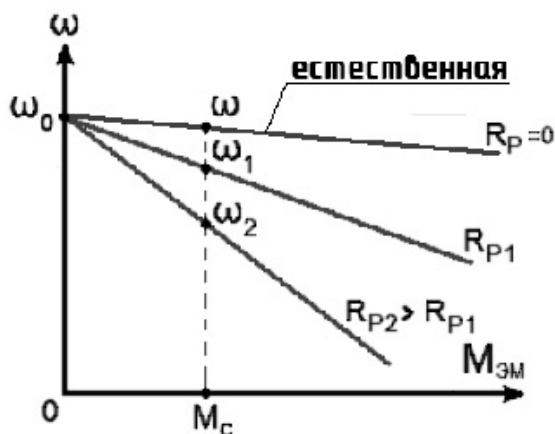


Рис. 8.9. Механические характеристики двигателя при изменении сопротивления в цепи якоря

выбирают на изгибе кривой намагничивания, после которого наступает насыщение. Для того чтобы даже незначительно увеличить магнитный поток, необходимо резко увеличить ток возбуждения. При уменьшении

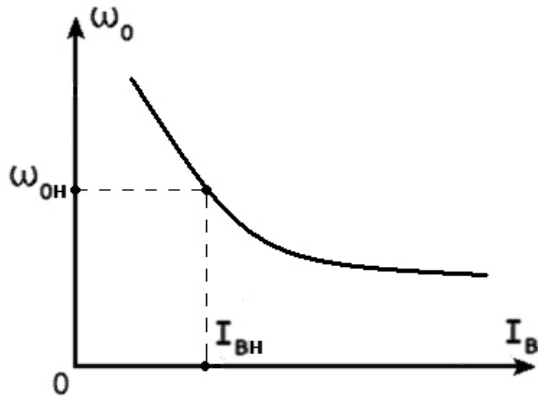


Рис. 8.10. Регулировочная характеристика холостого хода

магнитного потока скорость холостого хода $\omega_0 = U/k\Phi$ возрастает. Зависимость скорости вращения двигателя в режиме холостого хода от тока возбуждения при номинальном напряжении называется регулировочной характеристикой (рис. 8.10). С уменьшением тока возбуждения (магнитного потока) скорость резко возрастает. Поэтому обрыв в цепи возбуждения в режиме холостого хода является аварийным режимом, когда электродвигатель «идет вразнос». По этой же причине нельзя пускать двигатель последовательного возбуждения без нагрузки.

При уменьшении магнитного потока увеличивается и наклон механической характеристики, которая становится более «мягкой». При этом способе регулирования при уменьшении магнитного потока скорость вращения может возрастать до величины ω'_1 , если нагрузка небольшая (M_{c1}), но при больших нагрузках (M_{c2}) скорость вращения будет уменьшаться до ω'_2 (рис. 8.11).

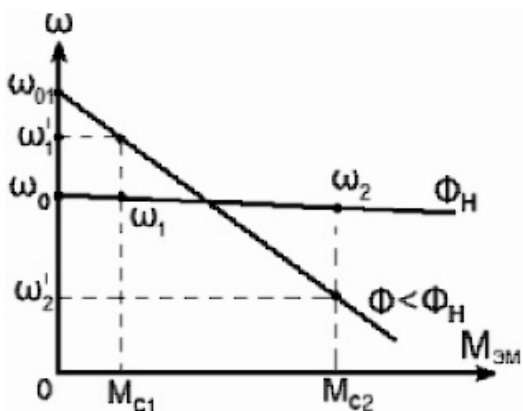


Рис. 8.11. Механические характеристики двигателя при изменении магнитного потока

Преимуществом данного способа регулирования является экономичность, т.к. регулируют ток в цепи возбуждения, который на порядок – два меньше тока цепи якоря.

Небольшой диапазон регулирования ограничивает область применения этого способа.

Наиболее современен способ регулирования скорости вращения двигателя изменением напряжения сети.

Третий способ ($U = var$)

Пусть при номинальном напряжении сети и моменте сопротивления M_C скорость вращения двигателя соответствовала ω , а скорость холостого хода ω_0 (рис. 8.12).

Если уменьшить (U_1) или увеличить (U_2) напряжение сети, то и скорость двигателя в режиме холостого хода и под нагрузкой M_C станут равными соответственно ω_{01} , ω_1 и ω_{02} , ω_2 .

При этом наклон характеристик не изменится. Благодаря тому, что жесткость механической характеристики сохраняется, значительно возрастает и диапазон регулирования, который может достигать значения 10:1. Этот способ позволяет регулировать вращение как «вниз», так и «вверх» от основной скорости.

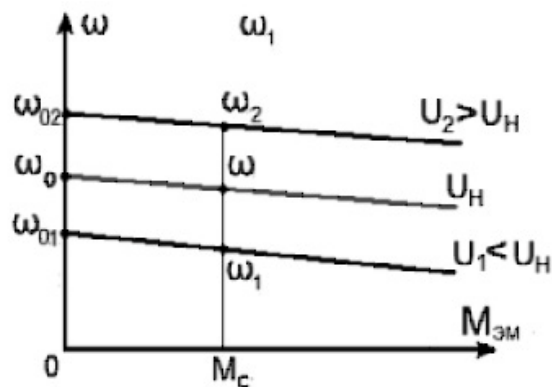


Рис. 8.12. Механическая характеристика двигателя при изменении напряжения сети

8.7. Реверсирование и торможение двигателя

Реверс двигателя, то есть изменение направления вращения якоря, осуществляется изменением направления момента. В соответствии с формулой $M_{эм} = k\Phi I_я$ этого можно достичь либо изменением направления магнитного потока (тока в обмотке возбуждения), либо изменением направления тока в цепи якоря. При одновременном изменении направления токов в обеих обмотках направление момента и вращения якоря двигателя не меняется, как, например, у двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Такие двигатели могут работать от цепи переменного тока. Специальные коллекторные двигатели последовательного возбуждения, которые работают от сетей постоянного и переменного тока, называются универсальными. Универсальные двигатели изготавливаются мощностью до 150 Вт и применяются в бытовой технике (пылесосы, вентиляторы, швейные машины и т.д.)

Тормозные режимы имеют место, когда направление электромагнитного момента и скорость вращения двигателя противоположны.

Пусть машина постоянного тока, работающая в режиме двигателя, поднимает груз, вращаясь со скоростью ω и развивая электромагнитный

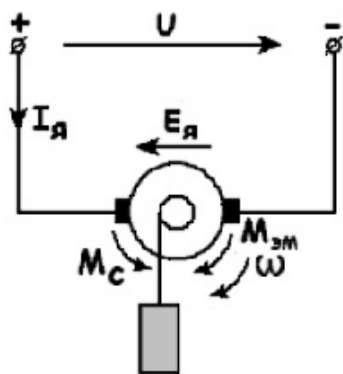


Рис. 8.13. Двигательный режим

момент $M_{эм}$, равный моменту сопротивления, направленному в противоположную сторону (рис. 8.13). Потребляемый ток зависит от напряжения питания U , противо-ЭДС $E_я$ и сопротивления в цепи якоря

$$I_я = \frac{(U - E_я)}{R_я}.$$

Различают три типа торможения.

Торможение противовключением создается изменением полярности питающего напряжения. При этом ток якоря

$$I_я = \frac{-(U - E_я)}{R_я}$$

изменяет свое направление и резко возрастает, т.к. источник питания и ЭДС якоря действуют согласно (рис. 8.14). Следовательно, меняет знак и электромагнитный момент $M_{эм} = k\Phi I_я$, и машина, вращаясь по инерции по часовой стрелке, быстро тормозится. Резкий скачок тока вызывает механический удар, поэтому для уменьшения тока в режиме противовключения, как правило, на время торможения включают в цепь якоря ограничивающее ток сопротивление.

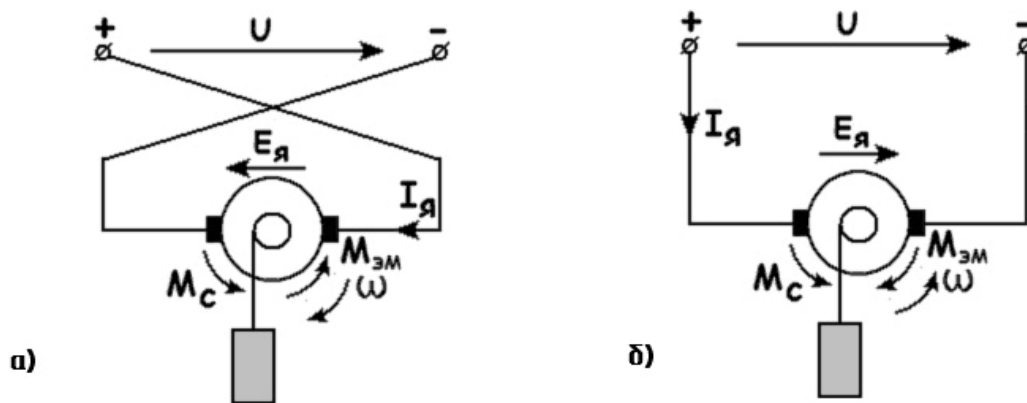


Рис. 8.14. Торможение противовключением:
 а – изменением полярности источника питания; б – при спуске груза

Режим противовключения имеет место и в том случае, если активный момент сопротивления будет настолько большим, что якорь начнет вращаться в противоположную сторону (см. рис. 8.14, б). При этом ЭДС якоря

меняет свой знак и ток якоря $I_{\text{Я}} = \frac{(U + E_{\text{Я}})}{R_{\text{Я}}}$ создает тормозной момент, направление которого не изменяется, но будет противоположно направлению вращения. Этот режим может быть использован при плавном спуске большого груза.

Генераторное рекуперативное торможение создается в том случае, если скорость вращения якоря будет больше скорости холостого хода. Это может иметь место, например, при спуске груза (рис. 8.15) или при движении электровоза под уклон. В режиме холостого хода $M_{\text{ЭМ}} = 0$, следовательно, $I_{\text{Я}} = 0$, т.е. $U = E_{\text{Я}}$. Если $\omega > \omega_0$, то $E_{\text{Я}}$ становится больше напряжения и ток якоря изменяется по направлению.

$$I_{\text{Я}} = \frac{(E_{\text{Я}} - U)}{R_{\text{Я}}}.$$

Это означает, что машина не потребляет ток из сети, а, напротив, отдает энергию в сеть, т.е. переходит в генераторный режим за счет кинетической энергии спускаемого груза.

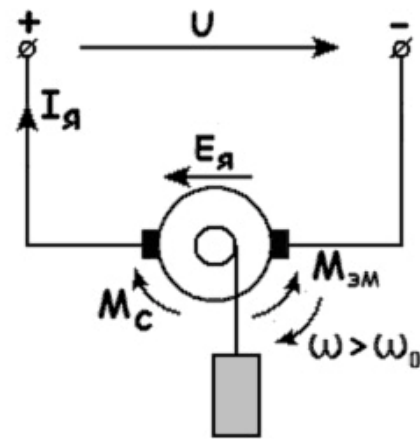


Рис. 8.15. Рекуперативное торможение

Динамическое торможение является частным случаем генераторного торможения, когда якорь двигателя отключается от сети и замыкается накоротко (рис. 8.16).

$$\text{В этом случае ток якоря } I_{\text{Я}} = \frac{-E_{\text{Я}}}{R_{\text{Я}}}$$

меняет свою величину и направление. Меняет направление и электромагнитный момент, под действием которого якорь тормозится.

Тормозные режимы машины постоянного тока можно показать на механической характеристике (рис. 8.17). Во всех установившихся режимах электромагнитный момент должен быть равен моменту сопротивления на валу и направлен в обратную сторону.

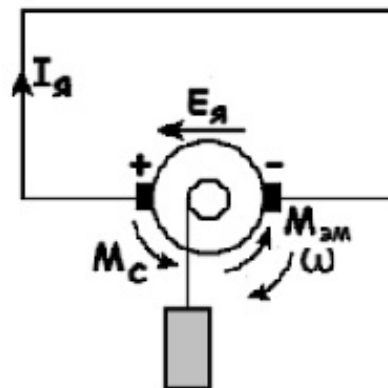


Рис. 8.16. Динамическое торможение

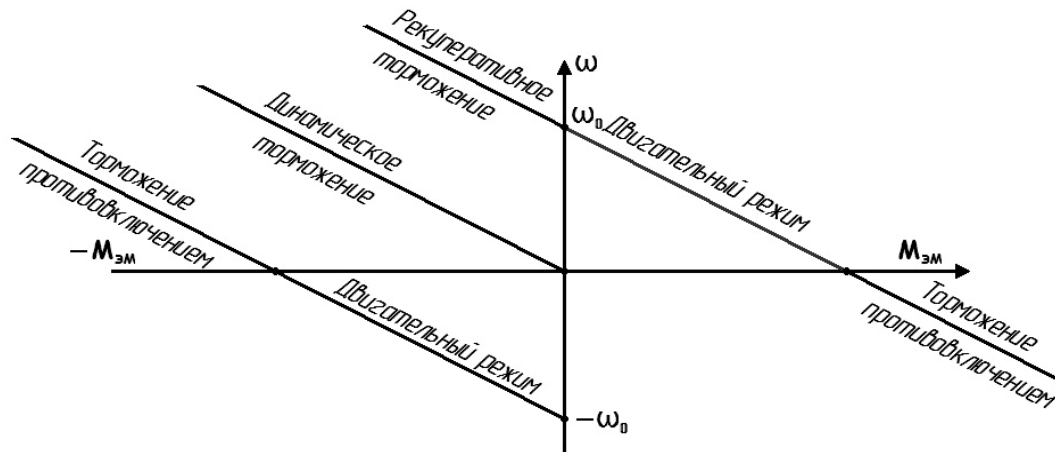


Рис. 8.17. Механические характеристики машин в двигательном и тормозных режимах

8.8. Анализ работы электродвигателя

Электродвигатель, создающий вращающий момент, работает на какую-либо механическую нагрузку: рабочую машину РМ, создающую момент сопротивления. В соответствии с аналогом второго закона Ньютона для вращающихся тел

$$M_{BP} - M_C = J \frac{d\omega}{dt}, \quad (8.8)$$

где J – эквивалентный момент инерции всех вращающихся частей электродвигателя и рабочей машины, приведенный к валу двигателя, $\frac{d\omega}{dt}$ – угловое ускорение.

Если $M_{BP} > M_C$, то ускорение $\frac{d\omega}{dt}$ положительное и система «двигатель – нагрузка», называемая электроприводом, увеличивает скорость вращения.

Если $M_{BP} < M_C$, то $\frac{d\omega}{dt} < 0$ и скорость вращения привода падает.

Если $M_{BP} = M_C$, то $\frac{d\omega}{dt} = 0$ и $\omega = \text{const}$.

Режим работы электропривода, при котором скорость его вращения не изменяется, называется установившимся.

Одной из основных задач электропривода является регулирование скорости вращения рабочей машины.

Как известно, скорость вращения электродвигателя можно изменить напряжением питания U , магнитным потоком Φ , который изменяется регулировкой тока в обмотке возбуждения, и введением сопротивления в цепь якоря $R_{ЦЯ}$. Кроме того, скорость вращения двигателя изменяется при изменении нагрузки M_C . Все эти четыре параметра являются независимыми, т.к. мы их можем изменять по своему усмотрению.

При изменении одного из этих параметров будут меняться скорость вращения двигателя ω , ЭДС якоря E_J , ток, потребляемый двигателем, I_J и электромагнитный момент $M_{ЭМ}$. Эти четыре параметра являются зависимыми.

8.8.1. Установившийся режим

Для определения зависимых параметров в новом установившемся режиме необходимо рассмотреть в первую очередь уравнение механического равновесия, при котором вращающий электромагнитный момент устанавливается автоматически в соответствии с моментом сопротивления рабочей машины

$$M_{ЭМ} = M_C, \quad \text{где} \quad M_{ЭМ} = k\Phi I_J.$$

Затем рассматривается электрическое равновесие – уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа,

$$U = E_J + R_{ЦЯ} I_J,$$

где $E_J = k\Phi\omega$, а сопротивление цепи якоря $R_{ЦЯ} = R_J + R_{рег}$ складывается из сопротивлений обмотки якоря и регулировочного сопротивления, вводимого в цепь якоря для изменения скорости вращения.

Например, требуется определить, как изменится скорость вращения двигателя и потребляемый им ток, если ввести сопротивление в цепь якоря.

Если другие независимые параметры остаются неизменными, то в соответствии с уравнением механического равновесия электромагнитный момент должен остаться неизменным, следовательно, и ток якоря не должен измениться. Правда, ток якоря восстановится после какого-то переходного процесса, когда он вначале мгновенно уменьшится, а затем примет прежнее значение, возрастая во времени по экспоненциальной зависимости.

Если $I_{\text{я}} = \text{const}$, то возрастает $R_{\text{ц\text{я}}}I_{\text{я}}$, а так как $U = \text{const}$, то ЭДС якоря должна уменьшиться настолько, насколько увеличилось $R_{\text{ц\text{я}}}I_{\text{я}}$. С уменьшением ЭДС якоря уменьшается и скорость вращения двигателя, т.к. магнитный поток мы не изменяли.

Другой пример. Как будут изменяться ω и $I_{\text{я}}$ с уменьшением магнитного потока (тока возбуждения)?

Так как $M_{\text{с}} = \text{const}$, то $M_{\text{эм}} = k\Phi I_{\text{я}}$ в установившемся режиме не должен измениться. Но с уменьшением потока должен возрасти ток якоря. В соответствии с электрическим равновесием увеличение тока якоря вызовет уменьшение ЭДС якоря $E_{\text{я}} = k\Phi\omega$, а скорость вращения может остаться неизменной, но может и измениться как в сторону увеличения, так и уменьшения. Действительно, в соответствии с механической характеристикой при уменьшении потока, если нагрузка двигателя небольшая, скорость возрастает, если большая, то она падает.

Рассуждая аналогичным образом, можно определить, что с увеличением напряжения возрастает скорость, а ток якоря, как ни странно, не изменяется, а с увеличением механической нагрузки скорость вращения падает, но возрастает потребляемый якорем ток.

Итак, электрическая машина – «добросовестнейшее» устройство. Двигатель развивает такой электромагнитный момент, какой мы создаем на его валу. Изменение любого электрического параметра (напряжения сети, тока возбуждения, сопротивления в цепи якоря) вызывает переходной процесс, после завершения которого устанавливаются новые зависимые параметры (скорость вращения и потребляемый ток), которые обеспечивают создание электрического момента, равного моменту сопротивления на его валу (свойство саморегулирования).

8.8.2. Переходный режим

С изменением независимых параметров новый режим устанавливается не мгновенно, а с течением некоторого времени, зависящего от инерционности электрических и механических процессов. Как правило, изменение электрического режима происходит на порядок быстрее, чем изменение скорости вращения двигателя, поэтому инерционностью при изменении электрических процессов можно пренебречь.

Например, при увеличении напряжения питания U , т.к. скорость вращения двигателя мгновенно измениться не может и ЭДС обмотки якоря $E_{Я} = k\Phi\omega$ остается прежней, то скачкообразно увеличивается ток в обмотке якоря

$$I_{Я} = \frac{(U - E_{Я})}{R_{Я}}$$

и, следовательно, электромагнитный момент. Т.к. момент сопротивления мы не изменяли, то нарушается механическое равновесие и скорость привода возрастает. При этом увеличивается противо-ЭДС и уменьшается ток якоря и электромагнитный момент до тех пор, пока не восстановится механическое равновесие. Увеличение скорости двигателя и восстановление прежнего тока происходят во времени по экспоненциальному закону, плавно приближаясь к новому установившемуся режиму.

График изменения тока якоря и скорости вращения показан на рис. 8.18, а. При $t = 0$ происходит коммутация, т.е., в данном случае, – включение двигателя на повышенное напряжение.

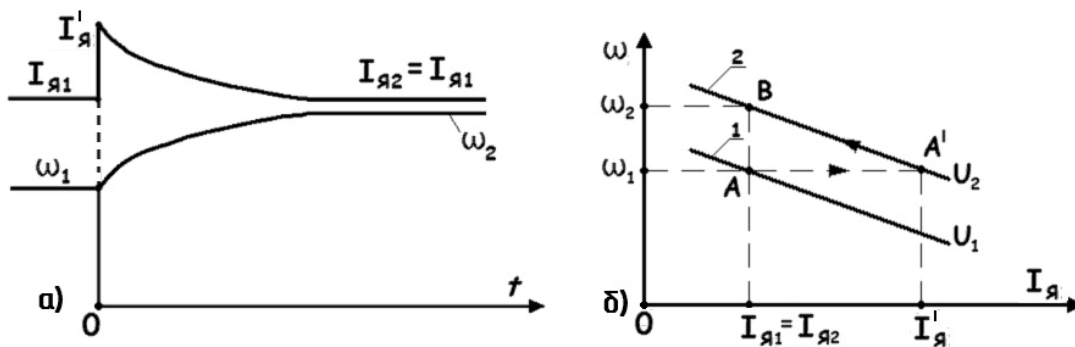


Рис. 8.18. Переходной процесс при увеличении напряжения сети:
а – временная диаграмма; б – электромеханическая характеристика

Если известны механические характеристики двигателя при различных напряжениях, то можно количественно определить скорость вращения якоря ω_2 в новом установившемся режиме и то, как протекает переходный процесс (см. рис. 8.18, б).

Пусть режим работы двигателя соответствовал точке А на электромеханической характеристике. При увеличении напряжения до величины U_2 ток якоря возрастает до величины $I'_{Я}$ (точка А') при скорости ω_1 , которая мгновенно измениться не может.

Так как момент сопротивления M_C остался прежним, а электромагнитный момент увеличился за счет увеличения тока, то скорость будет постепенно возрастать и в точке В наступит новый установившийся режим, при котором $\omega_2 > \omega_1$, $I_{Я1} = I_{Я2}$.

Аналогично можно рассмотреть переходный процесс при изменении других независимых параметров (магнитный поток, сопротивление в цепи якоря, момент сопротивления), построив новую механическую характеристику, на которую в момент коммутации переходим при прежней скорости, а затем наступает новый установившийся режим в соответствии с электрическим и механическим равновесием.

8.9. Пуск в ход двигателя постоянного тока

Самым простым способом пуска является прямое включение двигателя в сеть на номинальное напряжение.

В общем случае для двигательного режима $I_{\text{я}} = \frac{(U - E_{\text{я}})}{R_{\text{я}}}$, где $E_{\text{я}} = k\Phi\omega$. Однако в момент пуска скорость двигателя равна нулю и ЭДС якоря равна нулю, поэтому пусковой ток якоря $I_{\text{я}} = \frac{U}{R_{\text{я}}}$ в 8 – 10 раз превышает номинальный. Скачок пускового тока в линии значительно снижает напряжение из-за заметного падения напряжения внутри источника и в линии передачи. Говорят, «напряжение садится». Поэтому прямое включение допустимо для малых двигателей мощностью до 2 кВт, у которых разгон двигателя не превышает 0,3 с.

Для средних и мощных двигателей при пуске в цепь якоря включают пусковые сопротивления, которые ограничивают пусковой ток до 1,5 – 2,5 номинального значения: $I_{\text{япуск}} = \frac{U}{R_{\text{я}} + R_{\text{пуск}}} = (1,5 \dots 2,5) I_{\text{яН}}$. Такое значение пускового тока выбрано для того, чтобы он был достаточным для быстрого разгона двигателя. В противном случае процесс пуска затягивается и двигатель перегревается.

В качестве примера рассмотрим схему двухступенчатого пуска в ход двигателя (рис. 8.19).

При подаче напряжения запитывается обмотка возбуждения двигателя и срабатывает реле времени КТ. Ток в обмотку реле времени поступает через пусковое сопротивление и обмотку якоря. Так как эти сопротивления очень малы по сравнению с сопротивлением обмотки реле времени, то практически эта обмотка будет включена на полное напряжение сети. При срабатывании реле времени его размыкающий контакт разрывает цепь питания обмотки контактора КМ2.

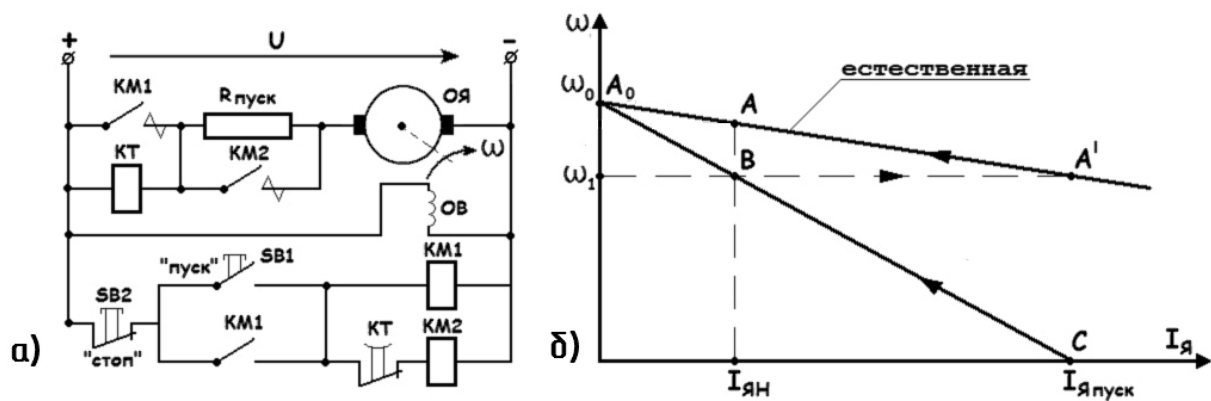


Рис. 8.19. Электрическая схема (а) и электромеханические характеристики (б) при двухступенчатом пуске в ход двигателя постоянного тока

Для пуска двигателя нажимают на кнопку SB1. Срабатывает контактор KM1, обмотка которого включается на самопитание с помощью контакта, шунтирующего кнопку «Пуск». Силовой контакт контактора включает обмотку якоря через пусковое сопротивление и одновременно шунтирует обмотку реле времени, которая обесточивается.

При этом двигатель разгоняется, изменяя режим от момента пуска (точка C) до точки B по искусственной электромеханической характеристике (см. рис. 8.19, б).

При достижении скорости ω_1 замыкается контакт КТ и включается второй контактор, который своим силовым контактом шунтирует пусковое сопротивление. В этот момент происходит скачок тока (точка A'), и в дальнейшем режим работы двигателя изменяется от точки A' до точки A (номинальный режим) по естественной электромеханической характеристике. Если разгон двигателя происходит без нагрузки, то установившийся режим будет соответствовать не точке A, а точке A₀ (режим холостого хода).

8.10. Схема подключения двигателей постоянного тока к сети

Кроме обмотки якоря с выводами Я1 и Я2 и при смешанном возбуждении шунтовой (Ш1 и Ш2) и серийной (С1 и С2) обмоток в двигателях средней мощности, как правило, имеется обмотка добавочных полюсов (Д1 и Д2).

Добавочные полюсы располагаются между основными и служат для ослабления магнитного потока, создаваемого током обмотки якоря. Этот поток искажает поле основных полюсов и вызывает повышенное искрение под щетками. Влияние тока якоря на магнитное поле машины называется реакцией якоря.

Обмотка добавочных полюсов и обмотка последовательного возбуждения (серийная) главных полюсов включаются последовательно с обмоткой якоря, а обмотка параллельного возбуждения (шунтовая) – на полное напряжение сети. Схема включения двигателя показана на рис. 8.20.

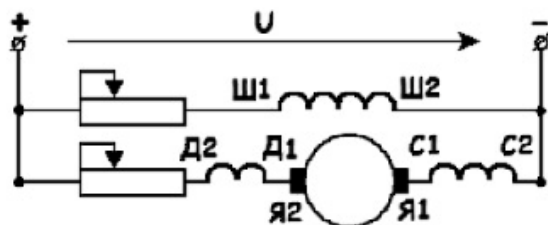


Рис. 8.20. Схема включения двигателя смешанного возбуждения

Для изменения направления вращения якоря изменяют полярность обмоток, располагающихся на главных полюсах, – шунтовой и серийной. Направление тока в обмотке добавочных полюсов и обмотке якоря оставляют прежним.

8.11. Исполнительные двигатели постоянного тока

В схемах автоматики, управления, регулирования и контроля применяются двигатели, с помощью которых электрический сигнал (напряжение управления) преобразуются в механическое перемещение, т.е. вращение вала. Такие электрические двигатели называются исполнительными.

Исполнительные двигатели имеют две обмотки. Одна из них, которая постоянно подключена к сети, называется обмоткой возбуждения, на другую (обмотку управления) сигнал подается только тогда, когда необходимо вращение вала. От величины напряжения управления зависят вращающий момент и скорость вращения.

В качестве исполнительных двигателей применяются чаще всего двигатели с независимым возбуждением, реже – двигатели с постоянным магнитом.

Обмоткой управления может служить либо обмотка якоря (двигатели с якорным управлением, рис. 8.21, а), либо обмотка возбуждения (обмотка полюсов – двигатели с полюсным управлением, рис. 8.21, б).

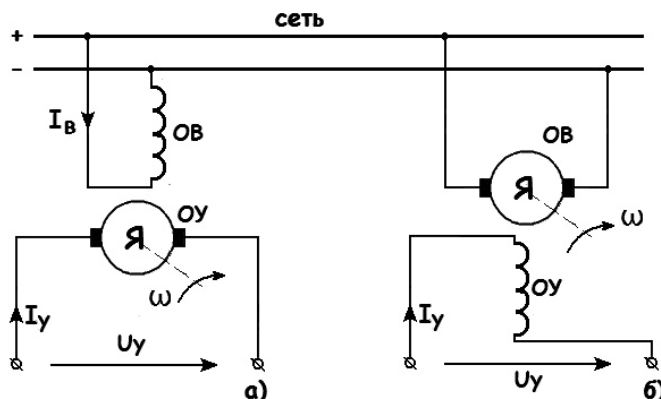


Рис. 8.21. Схема включения исполнительного двигателя с якорным (а) и полюсным (б) управлением

8.12. Тахогенераторы постоянного тока

Тахогенератор постоянного тока – машина постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 8.22, а) или возбуждением постоянными магнитами (рис. 8.22, б), работающая в генераторном режиме.

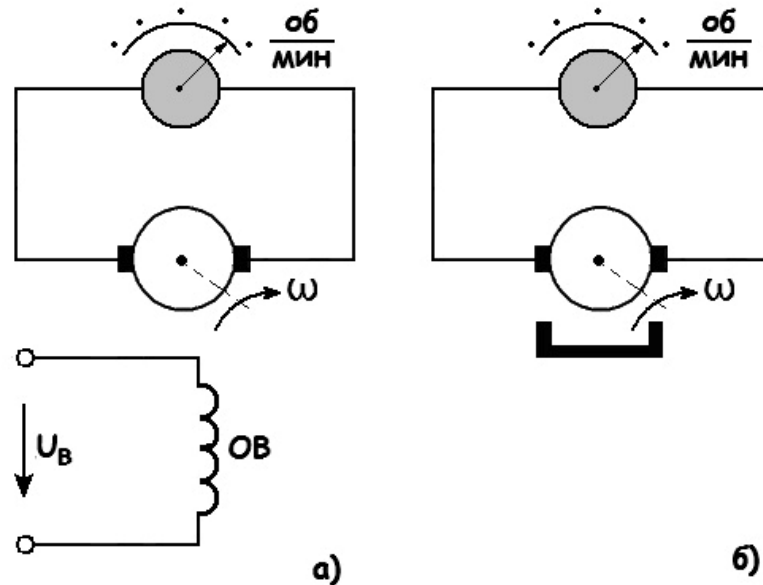


Рис. 8.22. Схема включения тахогенератора постоянного тока с возбуждением:

а – независимым; б – от постоянных магнитов

Якорь тахогенератора жестко закреплен на валу, скорость вращения которого требуется измерить, а обмотку якоря подключают, например, к вольтметру. Так как тахогенератор практически работает в режиме холостого хода, то напряжение на его зажимах равно ЭДС, которая, в свою очередь, пропорциональна скорости вращения вала. $E = k\Phi\omega$, поэтому вольтметр непосредственно можно проградуировать в об/мин.

8.13. Высокмоментные двигатели постоянного тока

К двигателям специальной конструкции относятся машины с возбуждением при помощи постоянных магнитов. В этом двигателе реакция якоря практически не влияет на основной магнитный поток, поэтому он может развивать повышенный электромагнитный момент.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. При включении двигателя постоянного тока в сеть возникает вращающий момент. Известно, что если на тело (ротор) действует момент, оно получает ускорение. Означает ли это, что скорость вращения ротора будет увеличиваться до бесконечности? Трением пренебречь.

2. Амперметр, включенный в цепь якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения, который работает под нагрузкой, увеличил показание в 2 раза. Назовите возможные причины увеличения тока.

3. Двигатель постоянного тока при вращении рабочей машины потребляет некоторый ток. Изменится ли величина этого тока, если рассоединить муфту сцепления между валами рабочей машины и двигателя?

4. Как изменится скорость вращения двигателя ω независимого возбуждения, ток обмотки якоря $I_{я}$, ЭДС обмотки якоря и электромагнитный момент $M_{ЭМ}$, если:

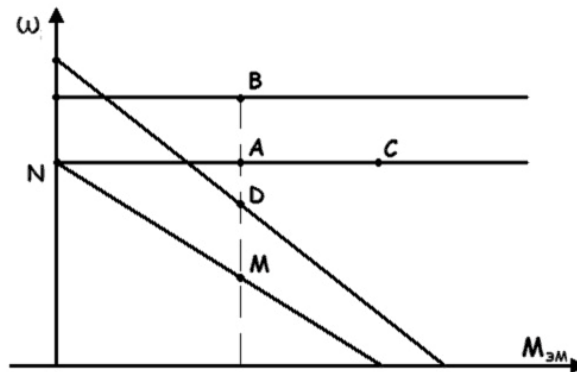
- изменить (увеличить или уменьшить) напряжение сети;
- включить сопротивление в цепь якоря;
- уменьшить ток в цепи возбуждения;
- изменить механическую нагрузку на валу двигателя.

Как будут изменяться во времени вышеуказанные параметры в переходный период при этих условиях? Показать временную диаграмму процесса.

5. Как и почему изменяется ток якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения с момента включения в сеть до установившегося режима? Показать временную диаграмму.

6. Какими способами можно реверсировать двигатель постоянного тока независимого возбуждения? Нарисовать одну из схем с применением двухполюсного переключателя.

7. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения работает в режиме А. Как перевести работу двигателя в новый режим, соответствующий точке: 1) В; 2) С; 3) Д; 4) М; 5) N (см. рис.).



Объяснить с помощью механической характеристики, как проходит переходный процесс.

8. Двигатель постоянного тока независимого возбуждения с помощью лебедки поднимает груз. Как будет изменяться и как изменится режим работы двигателя, если:

- якорь отключили от сети и замкнули накоротко;
- поменяли полярность приложенного напряжения;
- оборвался груз.

Показать на механической характеристике, как проходит переходный процесс, и новый установившийся режим.

9. Режим работы генератора постоянного тока независимого возбуждения характеризуется напряжением на зажимах якоря, током в цепи якоря и током в цепи возбуждения. Как по двум параметрам определить третий, если известна характеристика холостого хода и семейство внешних характеристик? Ответ пояснить графически.

10. Как изменится напряжение на зажимах якоря генератора постоянного тока независимого возбуждения, работающего на нагрузку с постоянным сопротивлением, если:

- уменьшить ток в цепи возбуждения;
- увеличить скорость вращения приводного двигателя.

9. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Асинхронная машина, как и машина постоянного тока, обратима, т.е. может работать в режиме как генератора, так и двигателя. Однако асинхронная машина применяется главным образом для преобразования электрической энергии в механическую. Асинхронные электродвигатели работают благодаря созданию вращающегося магнитного поля (ВМП) неподвижной системой токов.

9.1. Образование вращающегося магнитного поля

9.1.1. Двухфазная система токов

Вращающееся магнитное поле можно получить с помощью двух одинаковых неподвижных катушек, плоскости которых сдвинуты в пространстве на 90° , если по ним пропускать синусоидальный ток, сдвинутый во времени (по фазе) на четверть периода.

Пусть по катушке 1 (рис. 9.1, а) протекает синусоидальный ток, который будет создавать пульсирующий магнитный поток в горизонтальной плоскости (сплошные магнитные силовые линии). Индукция этого магнитного поля в центре катушки $B_1 = B_m \sin \omega t$.

Если по второй катушке пропустить такой же переменный ток, но сдвинутый во времени на четверть периода, то он создает в центре катушек индукцию $B_2 = B_m \cos \omega t$.

Результирующая индукция в центре катушек определится геометрической суммой векторов B_1 и B_2 . (см. рис. 9.1, б).

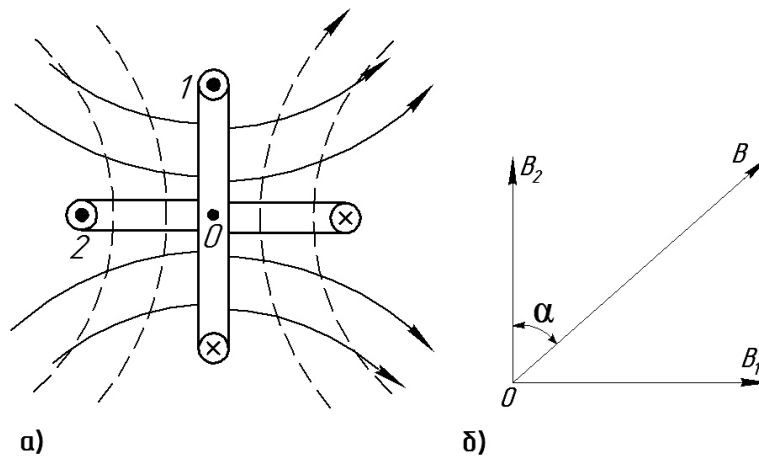


Рис. 9.1. Образование ВМП двухфазной системой токов:
а – схема; б – векторная диаграмма

Так как векторы B_1 и B_2 сдвинуты на 90° , то модуль результирующего вектора

$$B = \sqrt{B_1^2 + B_2^2} = \sqrt{B_m^2 \sin^2 \omega t + B_m^2 \cos^2 \omega t} = B_m.$$

Несмотря на то, что каждый из этих векторов изменяется во времени, результирующий вектор не зависит от времени и равен амплитуде составляющих векторов.

Изменяется ли направление этого вектора в пространстве? Определим угол α между вертикальной осью и вектором B .

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_1}{B_2} = \frac{B_m \sin \omega t}{B_m \cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t, \quad \text{т.е.} \quad \alpha = \omega t.$$

Угол α непрерывно и равномерно возрастает во времени, т.е. вектор индукции B равномерно вращается с угловой скоростью ω , равной частоте переменного тока. Для частоты $f = 50$ Гц $\omega = 2\pi f = 2\pi 50 = 314 \text{ с}^{-1}$.

В данном случае угловая скорость равна 314 рад/с, или 50 оборотов в секунду, или 3000 оборотов в минуту.

Таким образом, **два неподвижных тока, сдвинутых в пространстве на 90° и во времени на четверть периода, образуют круговое вращающееся магнитное поле.**

Такая двухфазная система токов создается обычно в маломощных двигателях. Экономически наиболее целесообразно создание ВМП трехфазной системой токов.

9.1.2. Трехфазная система токов

Вращающееся магнитное поле можно получить также системой трех катушек, сдвинутых в пространстве на 120° , по которым протекают синусоидальные токи, сдвинутые во времени на треть периода, т.е по фазе на 120° (рис. 9.2).

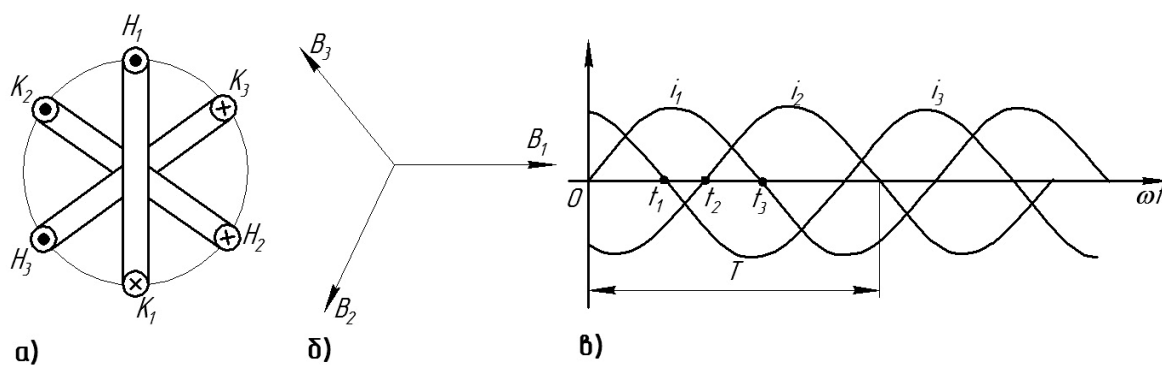


Рис. 9.2. Трехфазная система токов

Подобно двухфазной системе токов индукция магнитного поля в центре катушек определится геометрической суммой векторов индукции, созданной каждым током в отдельности. Более наглядно можно показать создание ВМП графически построением картины магнитного поля через определенные промежутки времени, например, через $1/6$ часть периода.

На рис. 9.2, в показана временная диаграмма токов в катушках. Условимся положительный ток обозначать крестиком у начала обмотки и точкой у конца. На рис. 9.3 показаны направление токов в обмотках в моменты времени $t_0 = 0$, $t_1 = T/6$, $t_2 = T/3$, $t_3 = T/2$ и картина магнитного поля в эти моменты времени.

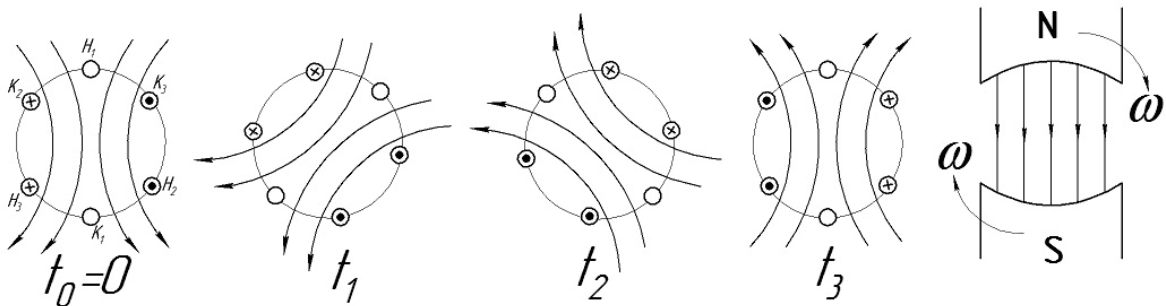


Рис. 9.3. Картина магнитного поля трехфазной системы токов

Как показано на рис. 9.3, через $1/6$ часть периода магнитное поле поворачивается на 60° . Картина поля получится такой, какую бы создавал постоянный магнит, вращаясь со скоростью ω_0 .

Система трех синусоидальных токов, сдвинутых в пространстве на 120° и во времени на треть периода, создает круговое вращающееся магнитное поле.

Для изменения направления вращения поля необходимо изменить порядок чередования фаз. Если по первой обмотке течет ток i_1 , а по второй будет протекать ток не i_2 , отстающий от тока i_1 во времени на треть периода, а ток i_3 , который опережает ток i_1 на треть периода, то легко убедиться, что направление вращения поля изменится. Практически, для изменения направления вращения поля необходимо поменять местами любые две фазы.

Скорость вращения поля будет равна частоте питающего напряжения. При $f = 50$ Гц $n_0 = 50$ об/с = 314 рад/с = 3000 об/мин. Но такая скорость вращения будет соответствовать одной паре полюсов.

Если каждая фаза состоит из двух секций (рис. 9.4, *a*), где вторая секция обозначена индексом «штрих», то, соединяя их последовательно и согласно (конец первой секции соединен с началом второй), получим 2 пары полюсов (см. рис. 9.4, *б* и рис. 9.5), а соединяя их последовательно и встречно – одну пару полюсов (см. рис. 9.4, *в* и рис. 9.6).

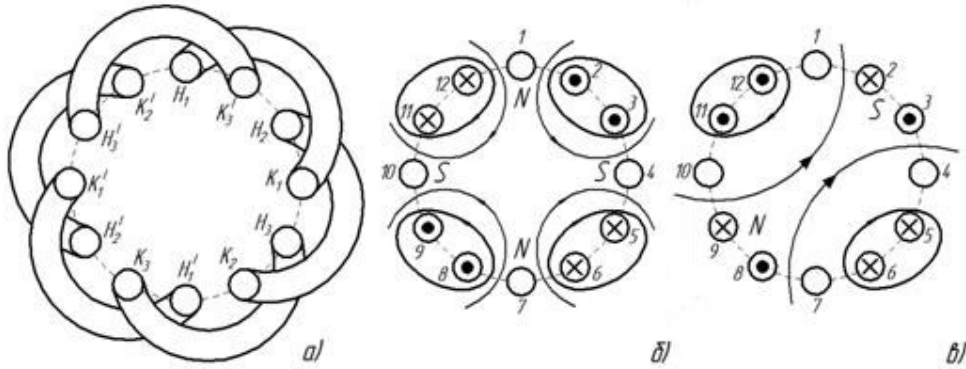


Рис. 9.4. Двухсекционная трехфазная обмотка (*a*); токо- и потокораспределение в секциях при согласном (*б*) и встречном (*в*) их включении

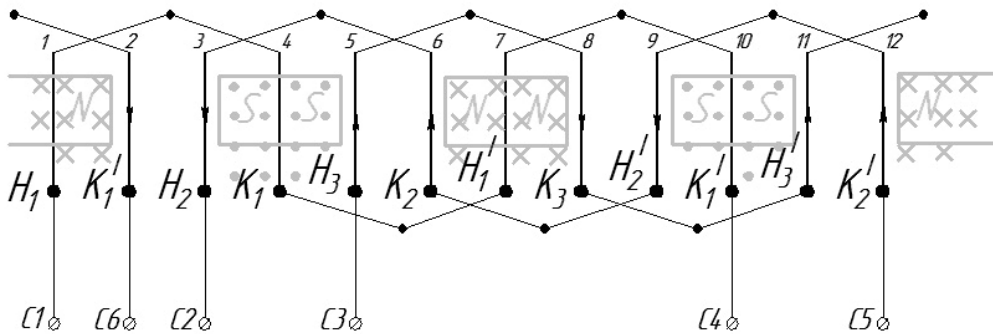


Рис. 9.5. Последовательное согласное соединение двух секций трехфазной обмотки

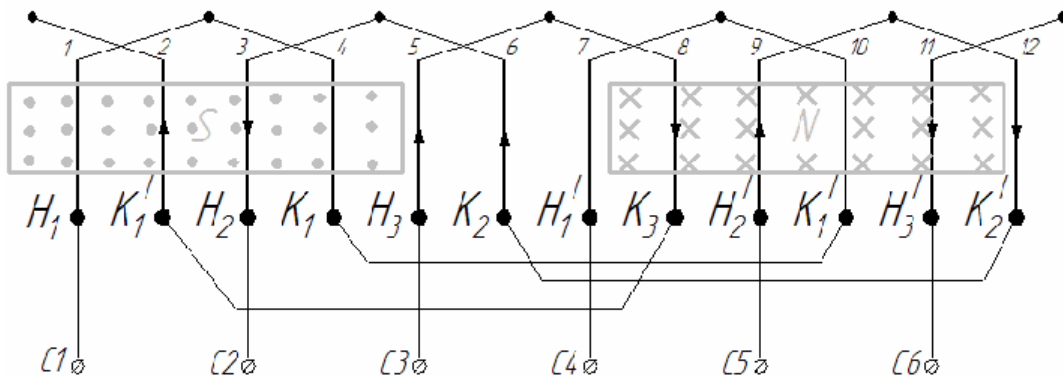


Рис. 9.6. Последовательное встречное включение двух секций трехфазной обмотки

На рисунках показаны направления токов и создаваемых ими магнитных потоков в момент времени $t = 0$, когда ток в первой обмотке отсутствует, ток во второй обмотке отрицательный, в третьей – положительный (см. рис. 9.2, в). Условимся положительный ток обозначать крестиком, т.е. входящим в начало обмотки. Начала трех обмоток обозначим соответственно С1, С2 и С3, а концы – С4, С5 и С6.

Если построить картину магнитного поля для дискретных моментов времени (например, через $1/6$ часть периода), то обнаружится, что магнитное поле с двумя парами полюсов будет вращаться в 2 раза медленнее.

Действительно, за $1/2$ периода полюса поменяются и северный полюс станет южным, а южный – северным, т.е. в пространстве поле переместится на $1/4$ оборота.

Таким образом, скорость вращения магнитного поля зависит не только от частоты питающего напряжения, но и от числа пар полюсов p .

$$n_0 = \frac{f}{p} \text{ (об/с)}; \omega_0 = \frac{2\pi f}{p} \text{ (рад/с)}; n_0 = \frac{60f}{p} \text{ (об/мин)}, \text{ если } [f] = \text{Гц.}$$

Для частоты $f = 50$ Гц $n_0 = 3000$ об/мин ($p=1$); $n_0 = 1500$ об/мин ($p=2$); $n_0 = 1000$ об/мин ($p=3$); $n_0 = 750$ об/мин ($p=4$); $n_0 = 600$ об/мин ($p=5$); $n_0 = 500$ об/мин ($p=6$).

9.2. Устройство асинхронного двигателя

Схематично устройство асинхронного двигателя показано на рис. 9.7, а.

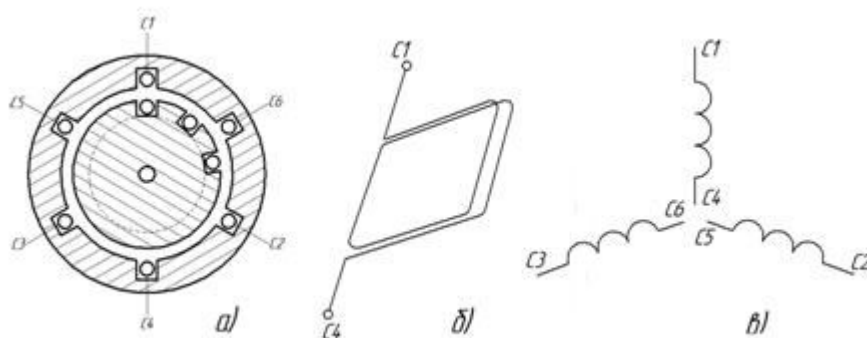


Рис. 9.7. Асинхронный двигатель: а – устройство; б – фазная обмотка; в – обмотки статора

Неподвижная часть машины – статор – представляет собой полый цилиндр, составленный из листов электротехнической стали. Зубчатые листы в сборе образуют на внутренней поверхности пазы, в которые ук-

ладывается трехфазная обмотка. Одна фаза этой обмотки показана на рис. 9.7, б; на рис. 9.7, в – условное графическое обозначение трехфазной обмотки. Выводы этой обмотки соединены с клеммной колодкой для подключения к сети, или «звездой» (рис. 9.8, а), или треугольником (см. рис. 9.8, б).

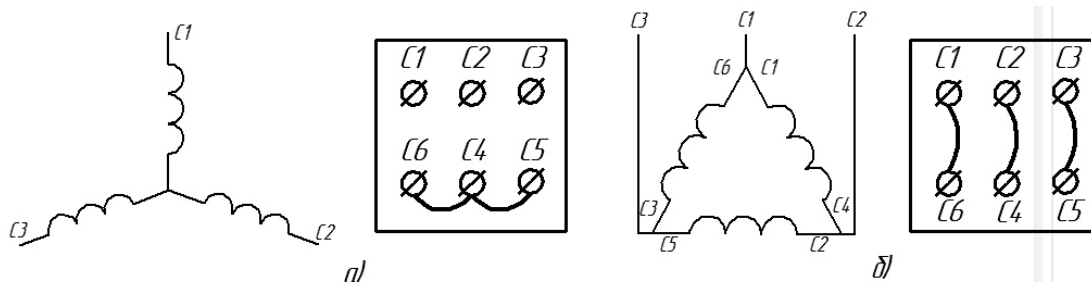


Рис. 9.8. Схема подключения АД к сети: а) звездой б) треугольником

Вращающаяся часть двигателя – ротор – имеет форму цилиндра и подобно статору набирается из листов электротехнической стали. В пазах ротора укладывается обмотка, которая может быть выполнена в двух вариантах.

Короткозамкнутая обмотка (рис. 9.9, а) выполняется в форме «белчьего колеса». При этом обмотку и сталь ротора не изолируют друг от друга, а просто пазы ротора заливают алюминием, а с торцевой части также литьем все проводники замыкают накоротко.

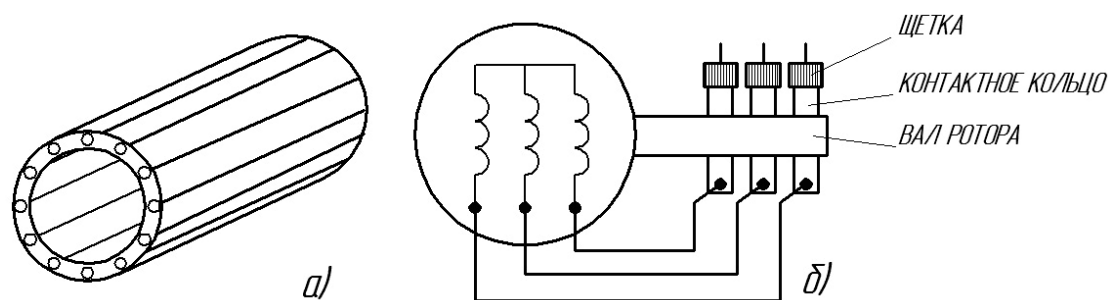


Рис. 9.9. Обмотки ротора: а – короткозамкнутого; б – фазного

Обмотка фазного ротора выполняется, подобно обмотке статора, изолированным проводом. Ее соединяют в «звезду», а начала обмоток присоединяют к трем контактными кольцам, изолированным друг от друга и жестко сидящим на валу. С помощью щеток эта обмотка подключается к внешней цепи (см. рис. 9.9, б).

9.3. Принцип действия асинхронного двигателя

При подключении обмотки статора к трехфазной цепи ток в этих обмотках создает круговое вращающееся (бегущее) магнитное поле. Вращающееся магнитное поле условно покажем с помощью двух вращающихся со скоростью ω_0 магнитов (рис. 9.10).

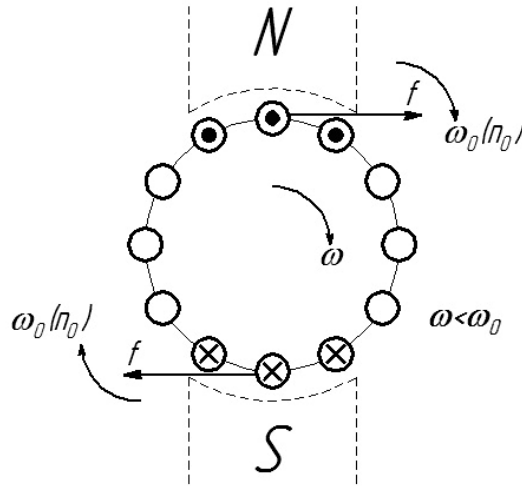


Рис. 9.10. Принцип работы асинхронного двигателя

Пересекая проводники обмотки статора, ВМП наводит в них ЭДС (закон электромагнитной индукции). Направление ЭДС определяется правилом правой руки. В верхних проводниках под северным полюсом ЭДС будет направлена к нам, в нижних – от нас. Под действием ЭДС вращения в проводниках обмотки ротора возникает ток, совпадающий по направлению с ЭДС.

На ток в магнитном поле действует сила (закон Ампера), направление которой определяется правилом левой руки. Суммарное действие сил приводит к созданию вращающегося момента, направленного в сторону вращения поля. То есть поле статора увлекает за собой ротор.

Однако скорость вращения ротора ω должна быть меньше скорости вращения поля ω_0 . В противном случае, если допустить равенство этих скоростей, то проводники обмотки ротора будут неподвижны относительно ВМП, следовательно, в них не будет образовываться ЭДС и, в конечном счете, вращающий момент будет равен нулю. В результате ротор начнет отставать от ВМП, т.е. будет вращаться асинхронно. Отставание ротора от поля статора оценивается скольжением

$$S\% = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} 100\% \quad \text{или} \quad S\% = \frac{n_0 - n}{n_0} 100\%,$$

где n – скорость вращения (об/мин).

При номинальной нагрузке на валу двигателя $S_H = 2 - 6 \%$. Например, если скорость вращения поля $n_0 = 3000$ об/мин, а скольжение $S_H = 5 \%$, то номинальная скорость вращения ротора $n_H = 2850$ об/мин.

Если двигатель не нагружен (режим холостого хода), то скольжение составляет около 1 %.

Под нагрузкой с увеличением тормозного момента скорость вращения ротора уменьшается, то есть увеличивается скорость относительного движения ротора и ВМП ($\omega_0 - \omega$), увеличиваются ЭДС в проводниках ротора, ток и вращающий момент.

Уменьшение скорости ротора и возрастание вращающего электромагнитного момента $M_{эмер}$ будет происходить до тех пор, пока не наступит механическое равновесие: $M_{эмер} = M_c$, где M_c – момент сопротивления рабочей машины (исполнительного механизма и т.д.).

Асинхронный двигатель подобно двигателю постоянного тока обладает свойством саморегулирования – автоматически поддерживать равенство между вращающим и тормозным моментами.

9.4. Электромеханическая и механическая характеристики асинхронного двигателя

По принципу действия асинхронный двигатель аналогичен трансформатору, если считать обмотку статора первичной, а обмотку ротора – вторичной. В обоих устройствах электрическая энергия сети электромагнитным путем передается на нагрузку (в трансформаторе – электрическую, в асинхронном двигателе – механическую).

Подобно трансформатору, с возрастанием механической нагрузки на валу двигателя, когда увеличивается ток в обмотке ротора, увеличивается ток и в обмотке статора. Это понятно с энергетической точки зрения. Действительно, для вращения более мощного механизма асинхронный двигатель будет забирать большую мощность из сети, т.е. будет потреблять больший ток, но при этом скорость вращения двигателя будет уменьшаться. Электромеханическая характеристика – зависимость скорости вращения от нагрузки (электрической) – показана на рис. 9.11, а.

При пуске $\omega = 0$ и скольжение равно 100 %. В этом режиме скорость относительного движения ротора и ВМП максимальна, следовательно, в проводниках ротора возникает максимальная ЭДС и, как следствие, – наибольший ток как в роторе, так и в обмотке статора. Пусковой ток в 5 – 7 раз превышает номинальный.

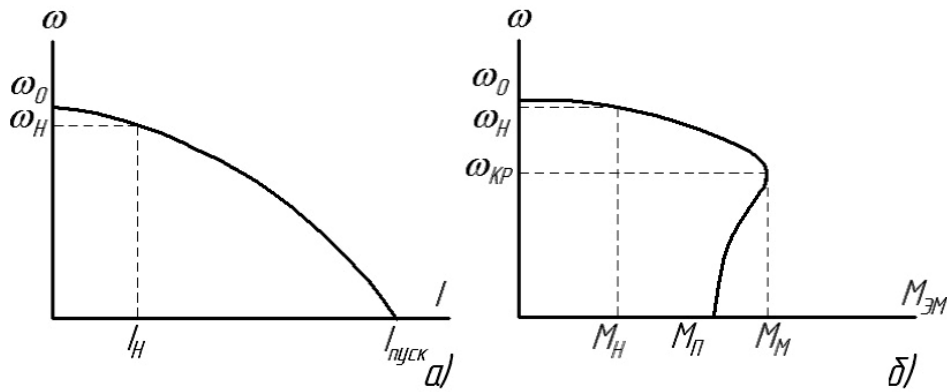


Рис. 9.11. Электромеханическая (а) и механическая (б) характеристики асинхронного двигателя

Вращающий момент в асинхронном двигателе пропорционален не только магнитному потоку и току в проводниках ротора I_p , но и фазному сдвигу ψ между ЭДС и током в роторе:

$$M = c\Phi I_p \cos \psi, \quad (9.1)$$

где Φ – магнитный поток одного полюса, который, как и в трансформаторе, остается практически постоянным при любой нагрузке, c – коэффициент пропорциональности.

Механическая характеристика снимается в установленном режиме, когда электромагнитный момент устанавливается равным тормозному моменту нагрузки. При увеличении нагрузки скорость вращения ротора падает, возрастает ток ротора и соответственно – вращающий момент.

С увеличением скольжения возрастает частота тока ротора. Если, например, частота вращения поля составляет 50 Гц, а частота вращения ротора 48 Гц, то частота тока ротора будет равна разности этих частот и составит 2 Гц.

При увеличении частоты тока ротора возрастает индуктивное сопротивление его обмотки, следовательно, растет фазный сдвиг ψ , а $\cos \psi$ уменьшается. С возрастанием нагрузки наступает такой момент, когда увеличение тока ротора компенсируется уменьшением $\cos \psi$, и при дальнейшем уменьшении скорости вращения ротора электромагнитный момент будет не возрастать, а уменьшаться (см. рис. 9.11, б).

Такая предельная нагрузка, при которой двигатель еще способен развивать соответствующий электромагнитный момент, является критической. В этом режиме электромагнитный момент будет максимальным M_m , а критическое скольжение $S_{кр}$ превышает номинальное S_H в 2,6 – 4,8 раза.

Превышение максимального момента по отношению к номинальному определяет перегрузочную способность двигателя

$$K_M = \frac{M_M}{M_H} = 1,6 - 2,5. \quad (9.2)$$

При пуске, когда $\omega = 0$ и $S = 1$ (100 %), асинхронный двигатель развивает пусковой момент, который для короткозамкнутых двигателей превышает номинальный в 1,1 – 1,6 раза. Кратность пускового момента

$$K_{II} = \frac{M_{II}}{M_H} = 1,1 - 1,6. \quad (9.3)$$

Механическая характеристика в координатах $M_{ЭМ} = F(S)$ может быть представлена формулой Клосса

$$M = \frac{2M_m}{\frac{S_{кр}}{S} + \frac{S}{S_{кр}}}. \quad (9.4)$$

К механической характеристике в координатах $\omega = f(M_{ЭМ})$ легко перейти, если воспользоваться определением $S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$.

Формула Клосса позволяет определить критическое скольжение по номинальному режиму и перегрузочной способности двигателя. Действительно, $M_H = \frac{2M_m}{\frac{S_{кр}}{S_H} + \frac{S_H}{S_{кр}}}$, откуда

$$S_{кр} = (K_m + \sqrt{K_m^2 - 1})S_H. \quad (9.5)$$

Механическая характеристика асинхронного двигателя является «жесткой», т.е. при изменении механической нагрузки от нуля до номинального значения скорость вращения двигателя уменьшается незначительно в соответствии с номинальным скольжением на 2 – 6 %.

Однако момент, развиваемый асинхронным двигателем, пропорционален квадрату напряжения питания. Сравнительно небольшое снижение напряжения вызывает резкое уменьшение пускового момента и перегрузочной способности, и для того, чтобы сохранить скорость вращения двигателя, необходимо соответственно значительно уменьшить механическую нагрузку. Если нагрузку на валу двигателя оставить неизменной, то, чтобы сохранить на этом уровне электромагнитный момент, двигатель «сбрасывает» обороты, что влечет за собой увеличение тока и перегрев двигателя.

9.5. Номинальные параметры

На станине асинхронной машины крепится табличка с указанием номинальных параметров:

P_H (кВт) – номинальная механическая мощность на валу двигателя – наибольшая мощность, при которой двигатель не перегревается;

n_H (об/мин) – скорость вращения двигателя в номинальном режиме;

η_H – коэффициент полезного действия двигателя в номинальном режиме;

$\cos\varphi_H$ – номинальный коэффициент мощности;

U_H – номинальное линейное напряжение сети, которое требуется для питания двигателя.

Например, Δ/Y 220/380 означает, что для питания данного двигателя требуется линейное напряжение сети или 220 В, или 380 В. В первом случае обмотки статора следует соединить треугольником, во втором случае – звездой. При соединении треугольником линейное напряжение сети равно фазному напряжению на обмотке статора. Следовательно, наименьшее из указанных напряжений будет равно номинальному фазному напряжению двигателя. То есть, к данной сети необходимо подключить обмотки статора таким образом, чтобы фазное напряжение на двигателе соответствовало номинальному значению.

Если к сети напряжением 380 В обмотки двигателя подсоединить треугольником, то на фазе двигателя будет не требуемые 220 В, а 380 В. При этом резко возрастут потери в стали, которые пропорциональны квадрату напряжения, и двигатель будет перегреваться.

Если к сети напряжением 220 В обмотки статора данного двигателя подсоединить звездой, то этот режим также будет аварийным, т.к. магнитный поток в двигателе пропорционален напряжению, а недостаток магнитного потока электродвигатель будет компенсировать увеличением тока, чтобы развить прежний электромагнитный момент, соответствующий механической нагрузке на валу двигателя. Не следует забывать, что электрические машины – устройства «добросовестные» и развивают электромагнитный момент, равный моменту сопротивления нагрузки.

При работе в номинальном режиме электродвигатель потребляет электрическую мощность $P_{эл} = \sqrt{3}U_H I_H \cos\varphi_H = \eta_H P_H$, которая больше номинальной механической в соответствии с номинальным КПД.

Линейный номинальный ток, потребляемый двигателем,

$$I_H = \frac{P_H}{\sqrt{3}U_H \eta_H \cos \varphi_H}. \quad (9.6)$$

По этому току выбирают сечение жилы кабеля для питания данного двигателя, пусковую и защитную аппаратуру.

Фазный ток, потребляемый двигателем, отстает от фазного напряжения на угол φ (рис. 9.12). Его можно разложить на две составляющие:

I_0 – намагничивающий ток, создающий магнитное поле;

I_a – активная составляющая тока, совпадающая по фазе с напряжением, которая пропорциональна активной мощности.

Чем больше механическая нагрузка, тем больше эта активная составляющая, тем меньше фазный сдвиг φ и выше коэффициент мощности $\cos \varphi$.

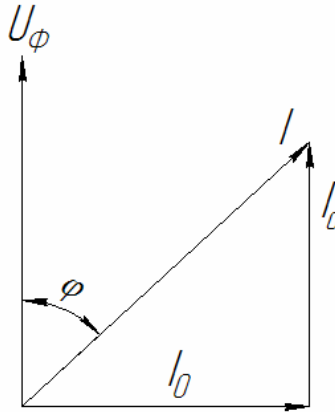


Рис. 9.12. Упрощенная векторная диаграмма электродвигателя

Поэтому важно, чтобы нагрузка асинхронного двигателя была близка к номинальному значению, при котором коэффициент мощности будет наибольшим.

Ток холостого хода, практически равный намагничивающему току, можно определить по номинальным параметрам

$$I_0 = I_H \sin \varphi_H = I_H \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}. \quad (9.7)$$

По паспортным данным можно определить и момент на валу двигателя в номинальном режиме

$$M_H = \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (9.8)$$

где $\omega_H = \frac{2\pi n}{60}$ (рад/с), а $[n] = \text{об/мин}$.

9.6. Регулирование скорости вращения двигателя

Скорость вращения ротора меньше скорости вращения поля на величину скольжения $\omega = \omega_0(1 - S)$, где $\omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$. Следовательно, скорость вращения двигателя можно регулировать частотой питающего напряжения f , числом пар полюсов p и скольжением S .

На рис. 9.13 показана блок-схема частотного регулирования.

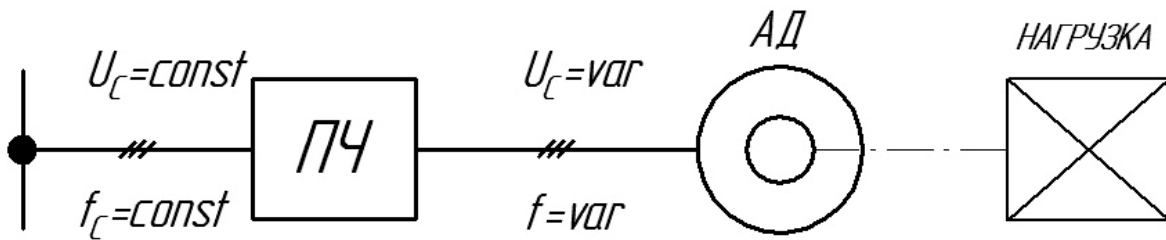


Рис. 9.13. Блок-схема частотного регулирования скорости вращения асинхронного двигателя

Частотное регулирование с помощью преобразователя частоты ПЧ позволяет регулировать как «вниз» от номинальной скорости, так и «вверх» в диапазоне $D = 12:1$

Преобразователь частоты состоит из управляемого выпрямителя, преобразующего трехфазный ток в постоянный, и инвертора, преобразующего постоянный ток в трехфазный заданной частоты. Схема усложняется тем, что с изменением частоты сети необходимо регулировать и величину напряжения.

Действительно, так же как в трансформаторе, фазное напряжение на обмотке статора пропорционально произведению частоты и величины магнитного потока $U_p \equiv f \cdot \Phi$.

Если увеличить частоту f , а напряжение оставить неизменным, то магнитный поток машины уменьшится, что при постоянном моменте на валу приводит к возрастанию тока ротора и статора, т.е. к токовой перегрузке обмоток при недоиспользованной магнитной цепи.

Если уменьшить частоту f при $U_p = \text{const}$, то это приведет к возрастанию магнитного потока, резкому увеличению намагничивающего тока, потерям в стали и в обмотках.

Таким образом, для регулирования скорости вращения асинхронного двигателя с изменением частоты питающего напряжения необходимо синхронно изменить и величину этого напряжения.

Второй способ (изменение числа пар полюсов) позволяет ступенчато изменять скорость вращения специальных многоскоростных двигателей, допускающих переключение его катушек, например, с последовательного соединения на параллельное или с согласного включения катушек одной фазы на встречное. Многоскоростные асинхронные двигатели могут иметь также две независимые обмотки статора, так что различные схемы подключения этих обмоток позволяют достичь диапазона регулирования 8:1.

Третий способ регулирования скорости вращения двигателя предполагает изменение скольжения путем введения регулируемых сопротивлений в цепь обмотки ротора и статора.

Введение регулировочных резисторов в цепь обмотки фазного ротора позволяет плавно регулировать скорость вращения в диапазоне 3:1, сохраняя прежнюю перегрузочную способность.

Для короткозамкнутых двигателей вводить сопротивление можно только в цепь обмотки статора. Но при этом жесткость механической характеристики снижается, падает перегрузочная способность, в результате чего диапазон регулирования резко уменьшается. Кроме того, данный способ регулирования неэкономичен.

9.7. Пуск в ход асинхронного двигателя

Пусковые свойства двигателя определяются пусковым моментом M_n и пусковым током I_n . При этом для быстрого разгона стремятся увеличить M_n при возможно меньшем пусковом токе. Кроме того, для разгона двигателя при пуске должно выполняться условие $M_n > M_c$, где M_c – момент статического сопротивления на валу двигателя при пуске. Если $M_n < M_c$, то двигатель не запустится.

В большинстве случаев двигатели мощностью до 50 кВт запускаются прямым включением в сеть. В момент пуска возникает пусковой ток, превышающий номинальный в 5 – 7 раз. Он вызывает повышенный нагрев обмоток двигателя, особенно если двигатель эксплуатируется в режиме частых включений, а в маломощных сетях приводит к заметному снижению напряжения из-за повышенного падения напряжения в питающем трансформаторе и линии передачи.

Для ограничения пускового тока в цепь ротора или статора включают пусковые сопротивления или кратковременно обмотки статора включают на пониженное напряжение. Например, если номинальный режим соответствует включению обмоток статора треугольником, то при пуске их включают «звездой», уменьшая фазное напряжение и пусковой ток в $\sqrt{3}$ раз.

Пуск в ход асинхронных двигателей (АД) осуществляется комплектом аппаратуры, который называется магнитным пускателем. Магнитный пускатель включает в себя контактор, кнопочную станцию и защитную аппаратуру (тепловое и токовое реле). Двигатели небольшой мощности могут включаться и выключаться автоматическими воздушными выключателями (автоматами).

9.8. Тормозные режимы асинхронного двигателя

Тормозные режимы применяются для уменьшения скорости ротора, а также для быстрой его остановки. Эти режимы обеспечиваются торможением противовключением, динамическим и генераторным торможением.

Торможение противовключением можно создать изменением направления вращения поля, для чего достаточно изменить порядок чередования фаз, что достигается переменной мест любых двух фаз питающей трехфазной сети. В этом случае относительная скорость движения ротора и поля статора становится более чем в 2 раза больше скорости вращения ротора ($S = 2$), возникает резкий скачок тока, превышающий пусковой, и под действием тормозного момента двигатель останавливается. Когда скорость ротора будет близка или равна нулю, необходимо отключить питающую цепь, чтобы двигатель не разогнался в обратную сторону.

Динамическое торможение возникает, если обмотку статора отключить от трехфазной сети и присоединить ее к источнику постоянного тока. При этом в проводниках обмотки вращающегося по инерции ротора, находящихся в неподвижном магнитном поле, образованном постоянным током обмотки статора, создается ЭДС и, соответственно, ток. На ток в магнитном поле действует сила, направленная по закону Ленца таким образом, чтобы исключить причину, его вызывающую. Причиной возникновения тока (ЭДС) является вращение ротора. Поэтому электромагнитный момент будет тормозным.

В этом режиме кинетическая энергия ротора преобразуется в электрическую и выделяется в виде тепловых потерь в цепи ротора. По мере уменьшения скорости тормозной момент ослабевает, что является недостатком динамического торможения. Однако этот способ торможения широко используется в станочных приводах, например, для быстрой остановки шпинделя сверлильного станка.

Генераторное рекуперативное торможение с отдачей энергии в сеть возникает при вращении ротора со скоростью, превышающей синхронную. Такой режим возникает, например, при спуске груза, когда момент, создаваемый грузом, совпадает с направлением вращения поля.

При этом фаза тока в обмотке ротора меняется на 180° , изменяется фаза тока в обмотке статора, скольжение и электромагнитный момент становятся отрицательными и АД переходит на генераторный режим.

Генераторное торможение возникает также в многоскоростных АД при переключении числа пар полюсов с меньшего на большее.

9.9. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели

Однофазный асинхронный двигатель представляет собой машину небольшой мощности, у которой на статоре располагается не трехфазная обмотка, а две обмотки, одна из которых является рабочей с обозначением выводов С1 и С2, а вторая, вспомогательная (пусковая) обмотка с выводами В1 и В2, смещена относительно рабочей на 90° (рис. 9.14, а).

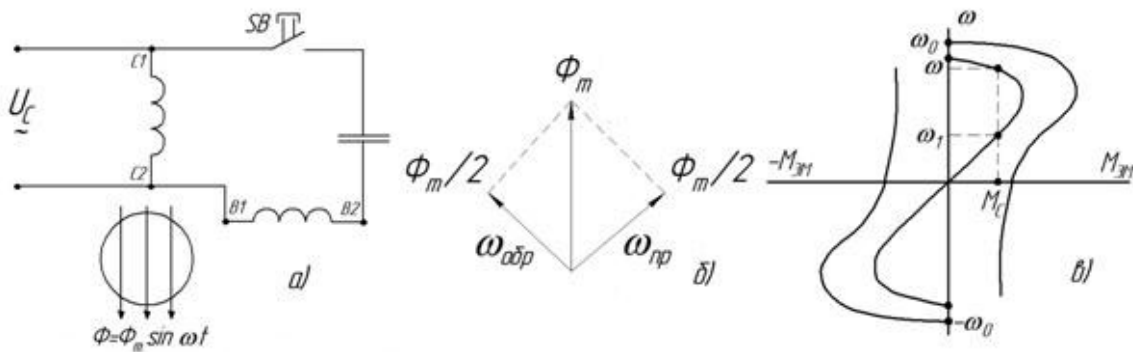


Рис. 9.14. Однофазный асинхронный двигатель: а – схема включения; б – магнитный поток; в – механическая характеристика

Принцип работы. При питании обмотки статора переменным током создается пульсирующее магнитное поле с амплитудой Φ_m , которое можно представить двумя вращающимися в противоположные стороны полями величиной $\Phi_m / 2$. В любой момент времени сумма вращающихся потоков равна действительному пульсирующему потоку (см. рис. 9.14, б). Каждому вращающемуся полю соответствует механическая характеристика: прямое поле создает положительный вращающийся момент, обратное поле – отрицательный, тормозной. Каждой скорости соответствуют раз-

личные по величине моменты. Результирующая механическая характеристика проходит через начало координат. Это означает, что пусковой момент равен нулю и при включении двигателя на однофазное напряжение он вращаться не будет даже при отсутствии механической нагрузки.

Если нагрузка на валу двигателя равна M_c (см. рис. 9.14, в), то после сообщения ротору скорости немного выше ω_1 вращающий момент станет больше M_c и двигатель самостоятельно начнет набирать обороты до скорости ω , при которой $M_{эм} = M_c$. Для создания вращающегося магнитного поля при пуске в однофазных асинхронных двигателях используется вспомогательная обмотка, сдвинутая в пространстве относительно рабочей обмотки на 90° .

Чтобы сдвинуть по фазе токи в этих обмотках, последовательно с пусковой обмоткой включают конденсатор. При запуске двигателя нажимают на кнопку SB , которую отпускают после разгона двигателя, и его дальнейшее вращение обеспечивается током только рабочей обмотки.

Изменение направления вращения двигателя осуществляется изменением направления тока в одной из обмоток статора.

Однофазные двигатели по технико-экономическим показателям значительно уступают трехфазным. Поэтому они изготавливаются на небольшие мощности и применяются для привода бытовых приборов.

Двухфазные асинхронные двигатели отличаются от однофазных тем, что обе обмотки статора являются рабочими. Питаются двухфазные АД от однофазной сети, поэтому для получения кругового вращающегося магнитного поля в одной из фаз обмотки статора постоянно включен конденсатор C_p (рис. 9.15).

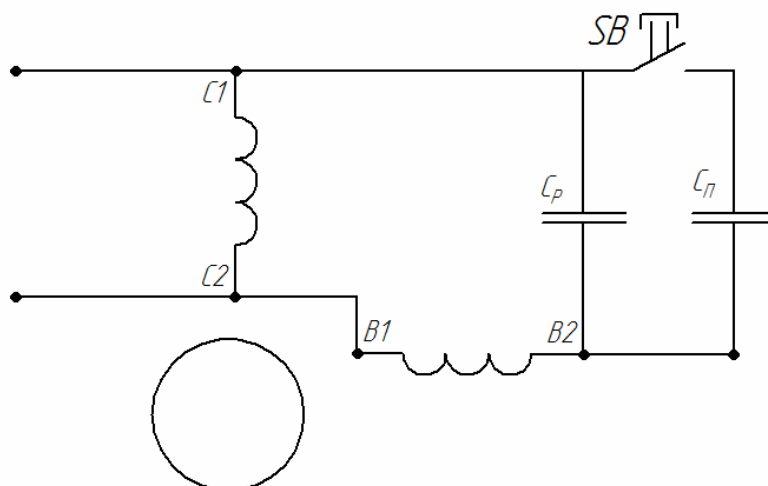


Рис. 9.15. Схема включения двухфазного асинхронного двигателя

Небольшой начальный пусковой момент $M_n \leq 0,3M_{ном}$ не позволяет запускать двигатель при полной нагрузке. Для повышения пускового момента на время разгона двигателя с помощью пусковой кнопки включают дополнительно пусковой конденсатор $C_n = 3 \dots 4C_p$.

Двухфазные конденсаторные двигатели отличаются лучшими технико-экономическими показателями, чем однофазные двигатели, и изготавливаются номинальной мощностью до 600 Вт. Так как и однофазные, и двухфазные АД питаются от однофазной сети, их часто называют однофазными.

Однофазный двигатель с экранированными полюсами имеет на статоре одну обмотку, охватывающую полюс, который с помощью короткозамкнутого витка расщеплен на две части (рис. 9.16), что позволяет получить вращающееся магнитное поле.

Действительно, два потока Φ_1 и Φ_2 сдвинуты в пространстве и во времени, так как сквозь короткозамкнутый виток проходит синусоидальный магнитный поток, создающий в нем ЭДС и ток, сдвинутый во времени от потока, его образующего. Таким образом, суммарный магнитный поток Φ_2 , создаваемый током рабочей обмотки и током короткозамкнутого витка, и магнитный поток Φ_1 будут сдвинуты по фазе.

Однофазные двигатели с явно выраженными экранированными полюсами применяют в маломощных устройствах (небольших вентиляторах, электропроигрывателях и т.д.) с легким пусковым режимом.

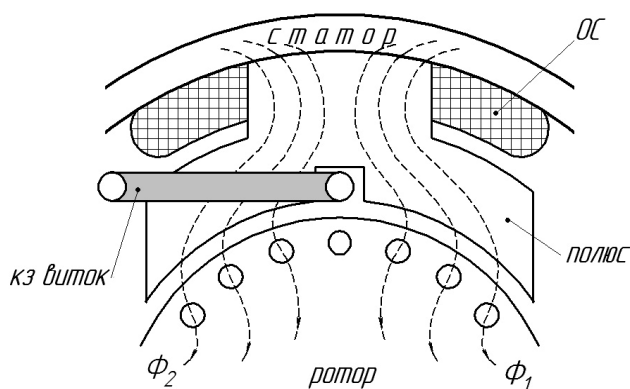


Рис. 9.16. Однофазный асинхронный двигатель с экранированными полюсами

Асинхронные исполнительные двигатели (ИД) служат для преобразования электрического сигнала (управляющего напряжения) в механическое перемещение вала. Конструктивно ИД представляет собой двухфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (рис. 9.17).

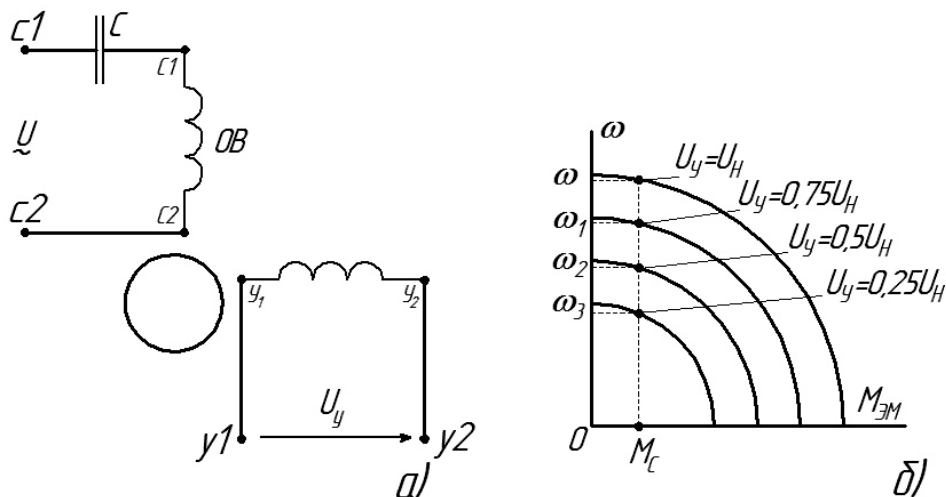


Рис. 9.17. Схема включения асинхронного исполнительного двигателя (а) и его механические характеристики (б)

Одна из обмоток статора с выводами С1 и С2 называется обмоткой возбуждения и включается на напряжение сети. Вторая – обмотка управления с выводами Y_1 и Y_2 , смещенная в пространстве на 90° , питается управляющим напряжением U_y той же частоты. Для создания вращающегося магнитного поля в цепь обмотки возбуждения (ОВ) включен фазосдвигающий конденсатор С.

Управление двигателем осуществляется путем изменения величины U_y (амплитудное управление), фазы U_y (фазовое управление) или одновременным изменением амплитуды и фазы U_y (амплитудно-фазовое управление). На рис. 9.17, б показаны механические характеристики двигателя при изменении величины U_y . В отличие от трехфазного АД, имеющего «жесткую» механическую характеристику, в ИД, благодаря большому активному сопротивлению обмотки ротора, максимальный критический момент соответствует отрицательной скорости ($S > 1$). Поэтому его характеристики становятся «мягкими» и ИД работает устойчиво при любой скорости от холостого хода до нуля.

При заданной нагрузке M_c с изменением величины напряжения управления от нуля до номинального значения скорость вращения двигателя также плавно изменяется от нуля до максимального значения.

ИД должен быть быстродействующим, поэтому ротор делается легким из немагнитного материала.

Асинхронные исполнительные двигатели применяются в системах автоматического управления и регулирования различных устройств. Они изготавливаются на мощности от долей до нескольких сотен ватт и работают от сети частотой от 50 до 1000 Гц.

9.10. Включение трехфазного асинхронного двигателя в однофазную цепь

На практике часто возникает необходимость питания сравнительно маломощного АД (до 3 кВт) однофазным напряжением.

Трехфазные обмотки сдвинуты в пространстве, что является первым условием для создания вращающегося магнитного поля. Для того чтобы выполнить второе условие (токи в обмотках должны быть сдвинуты во времени), в качестве фазосдвигающих устройств чаще всего используются конденсаторы, которые включаются по одной из схем (рис. 9.18).

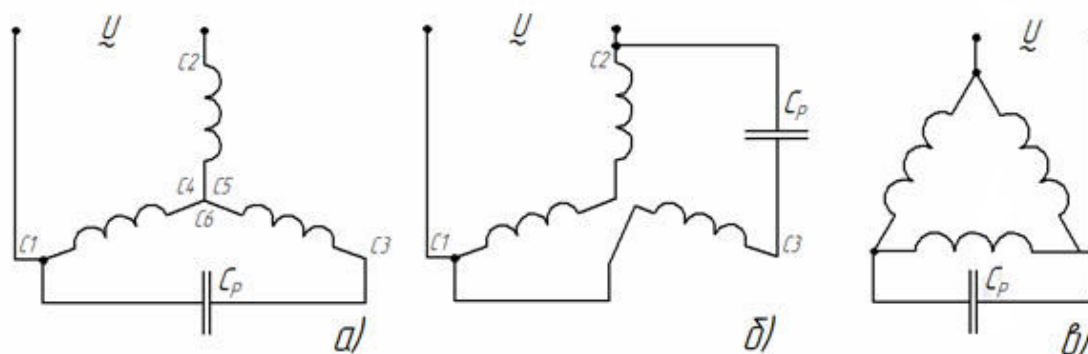


Рис 9.18. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

Величину рабочей емкости определяют эмпирически.

Если АД включается на холостом ходу, то пусковая емкость не требуется. Если же при пуске АД на валу создается значительная нагрузка, то параллельно рабочей емкости кратковременно для разгона двигателя включают пусковой конденсатор емкостью $C_n = (2,5...3)C_p$.

При выборе конденсатора необходимо учесть, что напряжение на нем может превышать амплитудное значение сетевого напряжения, а механическая нагрузка должна быть такой, чтобы фазный ток однофазного режима не превышал номинальный фазный ток трехфазного режима. В этом случае нагрузка на валу двигателя должна составлять 60 – 70 % от номинальной мощности при его работе от трехфазной сети.

9.11. Сельсины

Сельсин представляет собой электрическую машину небольшой мощности, служащую для синхронного поворота или вращения двух или нескольких механически не связанных валов механизмов.

Конструктивно сельсин подобен асинхронной машине с фазным ротором. Наибольшее распространение получили однофазные сельсины. На статоре расположена обмотка возбуждения ОВ, которая подключается к сети переменного тока и служит для создания пульсирующего магнитного поля (рис. 9.19).

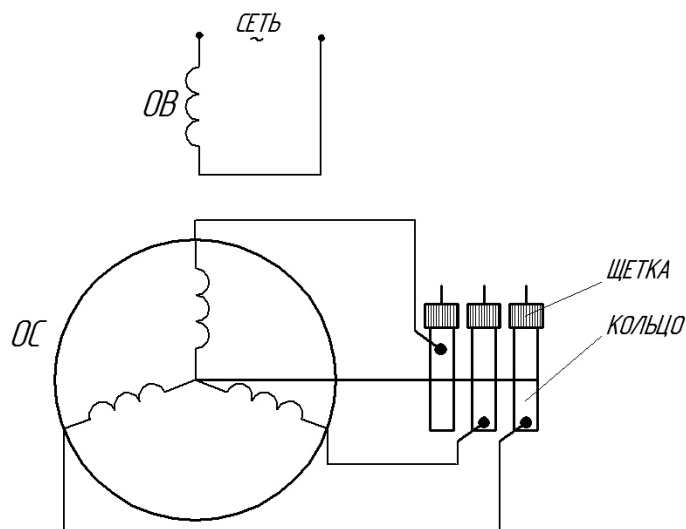


Рис. 9.19. Устройство и условное графическое обозначение сельсина

На роторе расположена трехфазная обмотка (обмотка синхронизации ОС). Для электрической связи обмотки синхронизации с внешней цепью используются контактные кольца, вращающиеся вместе с ротором, и неподвижные щетки. Существуют и бесконтактные сельсины.

Принцип работы сельсина заключается в том, что переменный магнитный поток, создаваемый током обмотки возбуждения, пронизывает обмотку синхронизации и наводит в ней переменную ЭДС. Причем величина ЭДС в каждой фазе зависит от пространственного расположения катушки. Если ось обмотки совпадает с направлением магнитного потока, то амплитуда ЭДС в этой обмотке будет максимальной. Если ось обмотки перпендикулярна к магнитному потоку, то сквозь плоскость каждого витка обмотки магнитный поток не проходит (он скользит вдоль этой плоскости) и ЭДС в обмотке наводиться не будет.

В устройствах автоматики используются две системы дистанционной передачи угла или синхронного вращения: индикаторная и трансформаторная.

Индикаторная система дистанционной передачи угла – применяется в тех случаях, когда момент сопротивления на ведомой оси мал. Например, на оси располагается стрелка индикаторного прибора (рис. 9.20).

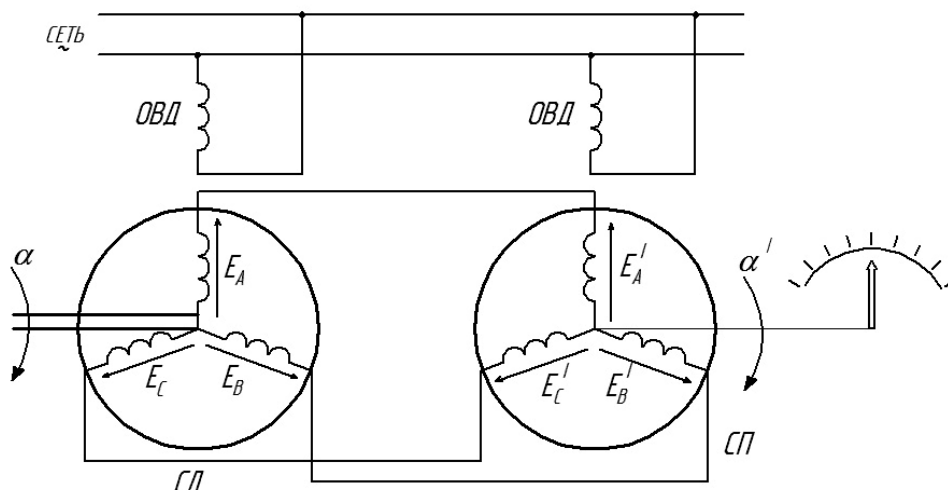


Рис. 9.20. Индикаторная система дистанционной передачи угла

Простейшая синхронная передача угла содержит два сельсина: сельсин-датчик (СД) и сельсин-приемник (СП). Ротор сельсина-датчика жестко связан с валом, угол поворота которого требуется передать на стрелку индикатора.

Если роторы СД и СП расположены одинаково относительно своего магнитного потока, создаваемого током возбуждения, то в соответствующих обмотках индуцируются одинаковые ЭДС ($E_A = E_{A'}$, $E_B = E_{B'}$, $E_C = E_{C'}$), которые направлены встречно, и токи в линии передачи равны нулю. Это равновесное, согласованное состояние сельсинов.

Если ротор СД повернуть на угол α , то равновесие нарушится и в линии синхронизации возникают уравнивающие токи. Токи в обмотке синхронизации СП создают магнитный поток, который взаимодействует с магнитным потоком статора и создает электромагнитный момент. Под действием этого момента ротор СП будет поворачиваться до тех пор, пока не исчезнет ток в линии связи, т.е. пока не станут равными ЭДС в соответствующих фазах ротора. Это равновесное состояние сельсинов наступит тогда, когда ротор СП повернется на такой же угол, на который повернули ротор СД.

Очевидно, индикаторная схема может быть использована не только для синхронного поворота валов, но и для их синхронного вращения.

Трансформаторная система дистанционной передачи угла применяется в том случае, когда ведомый вал нагружен значительным моментом, создающим сопротивление его повороту. В этом случае обмотку возбуждения СП отключают от сети и подсоединяют через усилитель к исполнительному двигателю ИД, ротор которого жестко связан непосредственно или через редуктор с ведомым валом (рис. 9.21).

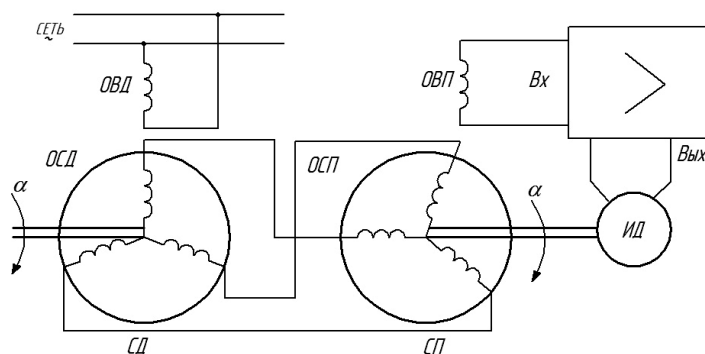


Рис. 9.21. Индикаторная система синхронной передачи угла

Принцип работы. ЭДС, создаваемая пульсирующим магнитным потоком обмотки возбуждения сельсина-датчика (ОВД), вызывает ток в линии связи, который, проходя по обмотке синхронизации сельсина-приемника (ОСП), возбуждает переменный магнитный поток. Этот синусоидальный поток, пронизывая обмотку возбуждения сельсина-приемника (ОВП), создает в нем переменную ЭДС, питающую через усилитель исполнительный двигатель, который будет вращать ведомый вал до тех пор, пока магнитный поток не установится перпендикулярно к оси ОВП, когда ЭДС в ней будет равна нулю. Такое состояние сельсинов называется согласованным.

Если повернуть ведущий вал на угол α , то изменятся индукционные ЭДС в фазах обмотки синхронизации сельсина-датчика (ОСД), изменятся токи в линии связи и ось переменного магнитного потока от этих токов в роторе СП будет тоже повернута на угол α .

Вертикальная составляющая этого потока, пронизывая витки ОВП, создает в нем ЭДС, и двигатель начнет отрабатывать заданный сельсином-датчиком угол. Когда ведомый вал повернется на угол α , вновь наступит согласованный режим, т.к. магнитный поток будет перпендикулярен к оси ОВП и ЭДС на входе усилителя будет равна нулю.

Таким образом, сельсины, работающие в трансформаторном режиме, обеспечивают синхронный поворот или синхронное вращение механически не связанных валов.

Сельсины изготавливают для работы от сети переменного тока частотой 50 Гц или повышенной частотой 400 Гц.

9.12. Поворотные (вращающиеся) трансформаторы

Вращающиеся трансформаторы (ВТ) предназначены для получения напряжения, находящегося в определенной функциональной зависимости от угла поворота ротора.

Конструктивно ВТ схож с асинхронной машиной с фазным ротором, но в отличие от нее на статоре и роторе размещены не трехфазные, а двухфазные обмотки. Две взаимно перпендикулярные обмотки размещены на статоре с выводами C_1, C_2 и C_3, C_4 и две – на роторе с маркировкой выводов P_1, P_2 и P_3, P_4 (рис. 9.22).

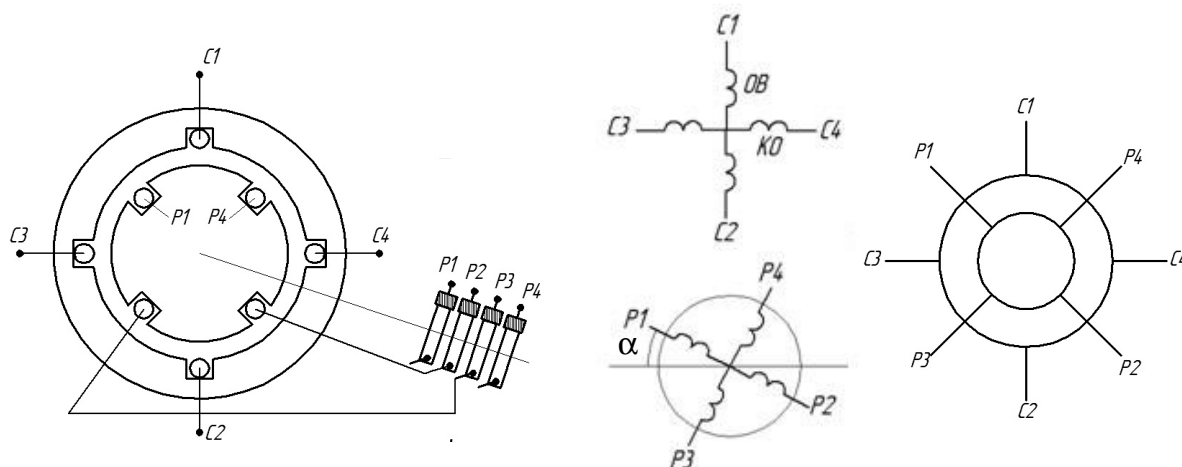


Рис. 9.22. Поворотный трансформатор: а – устройство; б – маркировка обмоток статора и ротора; в – условное графическое обозначение

Электрический контакт со вторичными обмотками осуществляется с помощью контактных колец и щеток. Если угол поворота ротора ограничен, то токоподвод осуществляется через спиральные пружины без контактных колец. Одна обмотка статора (обмотка возбуждения OB) включается в сеть переменного тока, другая (компенсационная обмотка OK) играет вспомогательную роль.

Принцип действия. Пульсирующий магнитный поток, создаваемый током возбуждения, пронизывая витки обмотки ротора, возбуждает в них ЭДС, амплитуда которой зависит от расположения этой обмотки относительно переменного во времени, но неподвижного в пространстве магнитного потока.

Если $\alpha = 0$, то магнитный поток скользит вдоль витков обмотки с выводами P_1, P_2 и ЭДС в ней не возникает ($E'_2 = 0$). В другой обмотке (P_3, P_4) возникает максимальная ЭДС $E''_2 = E_{2\max}$.

Если $\alpha \neq 0$, то $E'_2 = E_{2\max} \sin \alpha$, а $E''_2 = E_{2\max} \cos \alpha$.

Компенсационная обмотка включается таким образом, чтобы исключить влияние вторичного тока на основной магнитный поток. Она играет ту же роль, что и обмотка добавочных полюсов в машине постоянного тока, которая ослабляет реакцию якоря.

Таким образом, на зажимах вторичных обмоток создается ЭДС, которая пропорциональна величинам $\sin \alpha$ и $\cos \alpha$.

На рис. 9.23, *а* показана схема включения синусно-косинусного поворотного трансформатора, а схема, изображенная на рис. 9.23, *б*, позволяет получить на нагрузке напряжение, линейно зависящее от угла поворота ротора в определенном диапазоне изменения α .

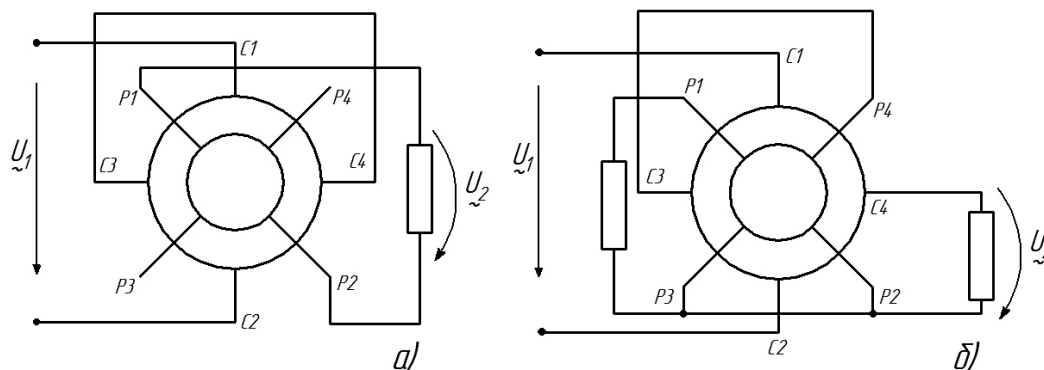


Рис. 9.23. Схемы включения поворотного трансформатора:
а – синусно-косинусного; *б* – линейного

Вращающиеся трансформаторы применяют в системах автоматического регулирования в качестве датчиков угла поворота вала, в электрических счетно-решающих устройствах для решения геометрических задач, а также в системах автоматики для дистанционной синхронной передачи угла.

9.13. Асинхронный тахогенератор

Асинхронный тахогенератор (АТ) служит для преобразования механических величин (скорости вращения вала, ускорения) в электрический сигнал, что может быть использовано для измерения угловых скоростей и ускорений, а также в датчиках обратной связи по скорости в системах электропривода.

Конструктивно АТ аналогичен двухфазному асинхронному двигателю с полым ротором (рис. 9.24).

Принцип работы. Переменный магнитный поток, создаваемый током обмотки возбуждения ОВ, пронизывая проводники обмотки ротора, наводит в них, как в трансформаторе, ЭДС, под действием которой в короткозамкнутом роторе возникает переменный ток. Ток, в свою очередь, создает свой магнитный поток, направленный, по закону Ленца, навстречу основному магнитному потоку. Суммарный магнитный поток будет направлен вдоль оси обмотки возбуждения и перпендикулярно к генераторной обмотке ОГ, поэтому ЭДС в последней не возникает.

Если ротор АТ будет вращаться со скоростью n , то кроме трансформаторной ЭДС в проводниках обмотки ротора будет возникать переменная ЭДС вращения, направление которой определяется правилом правой руки.

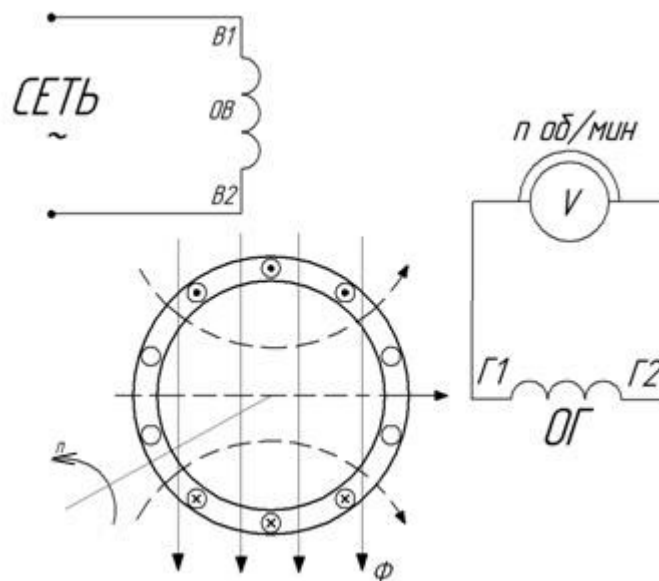


Рис. 9.24. Асинхронный тахогенератор

На рис. 9.24 показано направление ЭДС при вращении ротора против часовой стрелки в момент времени, когда поток направлен вниз.

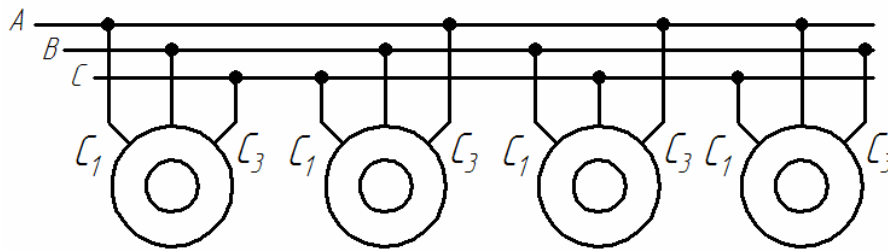
Под действием переменной ЭДС вращения в проводниках обмотки ротора возникает ток, совпадающий по направлению с ЭДС и создающий свой магнитный поток, который будет перпендикулярен к основному магнитному потоку и совпадать по направлению с осью генераторной обмотки (на рис. 9.24 показан пунктиром). В генераторной обмотке будет возникать переменная во времени ЭДС, величина которой пропорциональна скорости вращения вала ротора. Следовательно, шкалу измерительного прибора можно проградуировать в оборотах в минуту или радианах в секунду.

Если ОВ включить в сеть постоянного тока, то трансформаторная ЭДС будет равна нулю $\left(e = \frac{-d\psi}{dt} = 0 \right)$, а ЭДС вращения будет создавать ток и, соответственно, магнитный поток, направленный вдоль ОГ. Однако, если $n = \text{const}$, то этот магнитный поток (изображенный пунктирными линиями) во времени изменяться не будет и, соответственно, в ОГ не будет создаваться ЭДС.

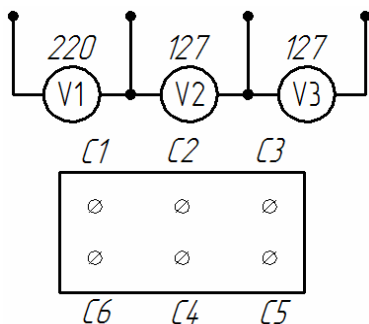
Но если скорость вращения ротора будет меняться, то ЭДС вращения, ток в проводниках ротора и магнитный поток будут также переменными во времени и ЭДС на зажимах ОГ будет тем больше, чем больше будет изменяться скорость вращения вала. Следовательно, при включении ОВ в сеть постоянного тока показание прибора будет пропорционально угловому ускорению и асинхронный тахогенератор можно проградуировать, например, в рад/с^2 .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. При каких условиях неподвижная многофазная система токов образует круговое вращающееся магнитное поле? Нарисовать картину магнитного поля, образованного двухфазной и трехфазной системами токов в произвольный момент времени.
2. В каком соотношении (больше, меньше, равно) находятся скорости вращения ротора и магнитного поля асинхронного двигателя и почему?
3. Известно направление вращения АД при одном из подключений. В каком направлении будет вращаться АД при остальных подключениях (см. рис.)?

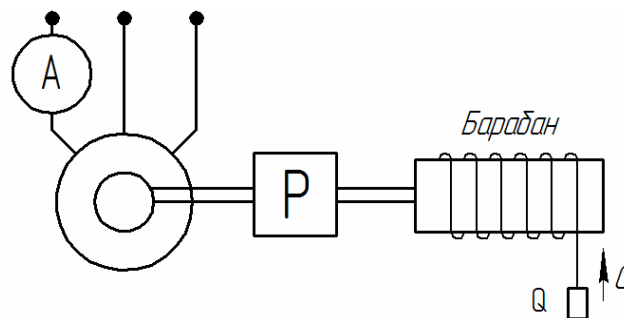


4. На табличке с техническими характеристиками АД нечетко обозначена скорость вращения: 1350 или 1550 об/мин. Чему равна номинальная скорость вращения двигателя?
5. Почему пусковой ток АД значительно превышает номинальный?



6. На рисунке показаны четыре клеммы трехфазной сети, напряжения между этими клеммами и клеммная колодка трехфазного АД напряжением 220/380 В. Показать схему соединения (если возможно) или объяснить причину, по которой данное подключение невозможно.
7. Как промаркировать шесть выводов трехфазного АД с помощью источника пониженного напряжения и вольтметра? Объяснить.
8. Как изменится режим работы АД, если его обмотки, соединенные треугольником, переключить на звезду, а момент на валу двигателя оставить прежним?

9. Изменится ли номинальная мощность, КПД и коэффициент мощности АД, если в нем заменить ротор на аналогичный, но несколько меньшего диаметра?
10. Для какой цели АД, обмотки которого в номинальном режиме соединяются треугольником, при пуске включают «звездой»? Для какой нагрузки это возможно?
11. Почему изменяется ток, потребляемый АД, при изменении нагрузки на его валу? Объяснить с физической точки зрения.
12. Как и почему изменяется ток АД во времени с момента включения в сеть до установившегося режима?
13. Почему в преобразователе частоты, питающем АД, с изменением частоты необходимо регулировать напряжения питания?
14. Показать графически принцип образования вращающегося магнитного поля: а) для двухфазной системы токов; б) для трехфазной системы токов.
15. АД с известными техническими характеристиками подключен к трехфазной сети напряжением 220 В. С помощью редуктора с коэффициентом редукции 1:10 и КПД 0,8 поднимается груз весом Q (см. рис.). Диаметр барабана 20 см; $P = 0,25$ кВт; $n_H = 1440$ об/мин; 220/380 В; КПД 0,68; $\cos\phi = 0,65$; $M_{\max}/M_H = 2,2$; $I_{\text{пуск}}/I_H = 5$.



Определить:

- 1) сможет ли АД поднимать груз весом $Q_1 = 0$; $Q_2 = 10$ кг; $Q_3 = 50$ кг; $Q_4 = 100$ кг; $Q_5 = 120$ кг; $Q_6 = 200$ кг;
- 2) показания амперметра во всех случаях;
- 3) сможет ли АД поднимать эти грузы, если поменять схему соединения обмоток статора?

10. СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Если асинхронные машины нашли применение в основном как двигатели переменного тока, то синхронные машины (СМ) используются и как двигатели, и, в большей степени, как генераторы переменного тока.

10.1. Устройство синхронных машин

Статор СМ вместе с обмотками аналогичен статору асинхронного двигателя. Трехфазная обмотка статора служит для создания вращающегося магнитного поля, если она включена в сеть для работы в режиме двигателя, или является источником трехфазной ЭДС, если машина работает в режиме генератора (рис. 10.1).

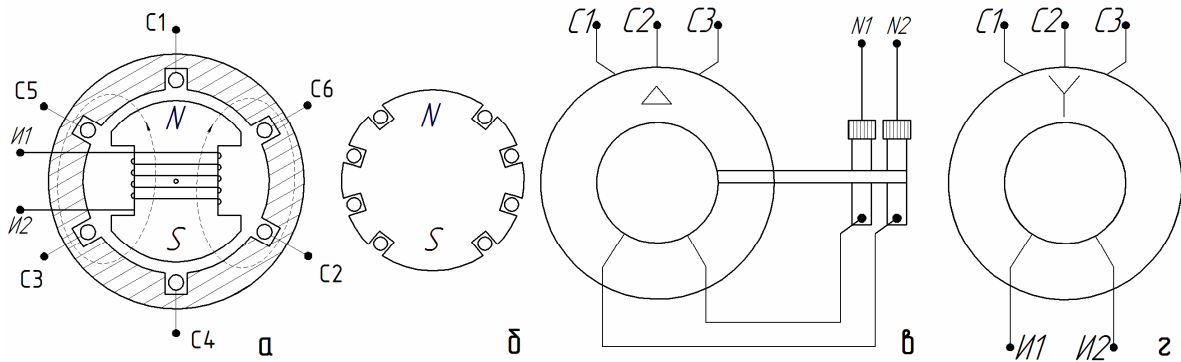


Рис. 10.1. Синхронная машина: *а* – основные конструктивные элементы и обмотки; *б* – неявнополюсный ротор; *в* – схема подключения обмотки возбуждения; *г* – условное графическое обозначение

Ротор представляет собой электромагнит, обмотка возбуждения которого питается постоянным током от независимого источника. Он может иметь явно выраженные полюса (см. рис. 10.1, *а*) или быть неявнополюсным (см. рис. 10.1, *б*). Явнополюсные роторы имеют, например, синхронные генераторы, первичными двигателями для которых служат тихоходные гидротурбины со скоростями не более 1000 об/мин, а более прочный неявнополюсный ротор используется в быстроходных турбогенераторах со скоростями 1500 или 3000 оборотов в минуту.

Ротор и статор могут иметь несколько пар полюсов, но число пар полюсов должно быть одинаковым.

Ток к обмотке возбуждения синхронной машины поступает от сети постоянного тока через неподвижные щетки и контактные кольца, закрепленные на втулке изолятора и вращающиеся вместе с ротором (см. рис. 10.1, *в*).

Условное графическое обозначение СМ показано на рис. 10.1, *г*.

10.2. Работа синхронной машины в режиме генератора

В режиме генератора ротор вращается первичным двигателем (гидротурбиной, паровой турбиной, дизелем) со скоростью $n_0=60 f/p$ (об/мин), где f – требуемая частота переменного тока; p – число пар полюсов. Если $p = 1$, то для получения $f = 50$ Гц необходимо вращать ротор со скоростью $n = 3000$ об/мин. Если генератор вращается тихоходной гидротурбиной, то для получения стандартизированной частоты тока 50 Гц он должен быть многополюсным.

Обмотка возбуждения, включенная в цепь постоянного тока, создает магнитный поток. Вращающийся магнитный поток индуцирует в неподвижных обмотках статора синусоидальную ЭДС, а так как обмотки статора смещены в пространстве на 120° , то образуется трехфазная система напряжений, служащая для питания электрической нагрузки. Величину ЭДС якоря (статора) можно регулировать величиной магнитного потока, т.е. током возбуждения.

Если обмотку статора подключить к трехфазной нагрузке (рис. 10.2, а), то под действием ЭДС в цепи возникает ток, направление которого совпадает с направлением ЭДС (см. рис. 10.2, б).

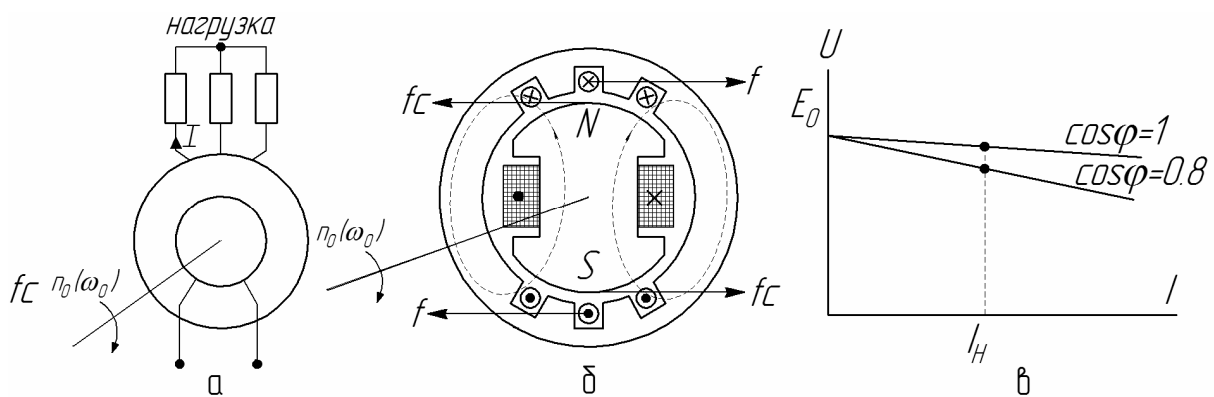


Рис. 10.2. Режим генератора синхронной машины: а – схема включения; б – направление тока и электромагнитных сил; в – внешняя характеристика

На ток статора, находящийся в магнитном поле ротора, действует сила f , направление которой определяется правилом левой руки. С такой же силой, но противоположно направленной, на ротор будет действовать сила f_c , создающая момент сопротивления, преодолеваемый первичным двигателем.

Чем больше электрическая нагрузка (величина тока), тем большие силы и моменты создаются в генераторе, тем большую мощность должен развивать первичный двигатель.

Внешняя характеристика синхронного генератора (см. рис. 10.2, в) является падающей, т.к. с увеличением нагрузки возрастает падение напряжения в обмотке генератора, а реакция якоря ослабляет основной магнитный поток. Если требуется поддерживать напряжение на зажимах генератора постоянным при изменении нагрузки, необходимо изменять величину ЭДС E_0 регулировкой тока возбуждения.

10.3. Работа синхронной машины в режиме двигателя

В режиме двигателя обмотка возбуждения подключается к сети постоянного тока, как и в режиме генератора, а обмотка статора – к трехфазной цепи. Трехфазный ток обмотки статора создает вращающееся магнитное поле. На рис. 10.3 магнитное поле статора условно изображено постоянными магнитами, вращающимися со скоростью ω_0 .

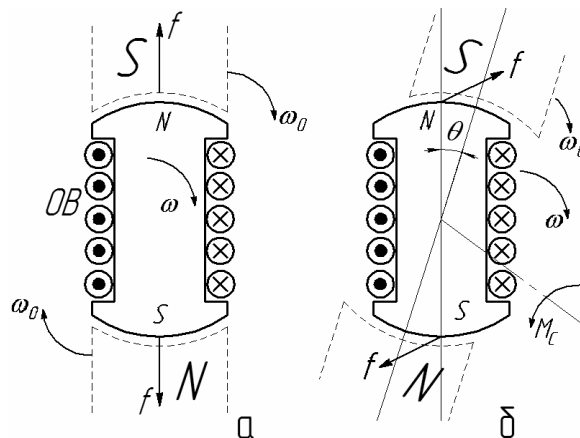


Рис. 10.3. Режим двигателя СМ: а – холостой ход; б – под нагрузкой

При отсутствии механической нагрузки на валу двигателя (режим холостого хода) в соответствии с принципом работы электромагнитных устройств общий магнитный поток будет максимальным, если магнитное поле, образованное током возбуждения, и вращающееся магнитное поле статора будут направлены в одну сторону. При этом ротор должен вращаться с той же частотой, что и поле статора. Между полюсами возникает электромагнитная сила, стремящаяся уменьшить воздушный зазор, так что ротор будет испытывать растягивающее усилие, а статор – сжимающее (см. рис. 10.3, а). В этом случае электромагнитный момент, действующий на ротор, будет отсутствовать, так как плечо между этими силами равно нулю.

Под нагрузкой в результате действия тормозного момента сопротивления M_c ротор приотстанет от поля статора на угол θ (см. рис 10.3, б). Но при этом между электромагнитными силами возникает плечо и, таким образом, создается вращающий момент, который должен уравновесить тормозной момент. Чем больше механическая нагрузка, тем больше величина угла θ , тем больший создается вращающий момент. Можно показать, что электромагнитный вращающий момент пропорционален синусу угла θ между осями магнитных потоков: $M = M_{\max} \sin \theta$.

10.4. Работа синхронной машины параллельно с сетью

Независимо от режима работы синхронная машина (СМ) практически всегда работает параллельно с сетью (кроме автономного режима генератора). Схему замещения СМ можно представить последовательным соединением сопротивления обмотки статора и источника с ЭДС E_0 , которая создается в обмотке статора вращающимся электромагнитом ротора.

На рис. 10.4, а представлен контур одной фазы системы СМ – сеть, в котором X_c представляет собой реактивное синхронное сопротивление обмотки статора (активным сопротивлением пренебрегаем), а сеть имеет бесконечно большую мощность, т.е. ее внутреннее сопротивление равно нулю.

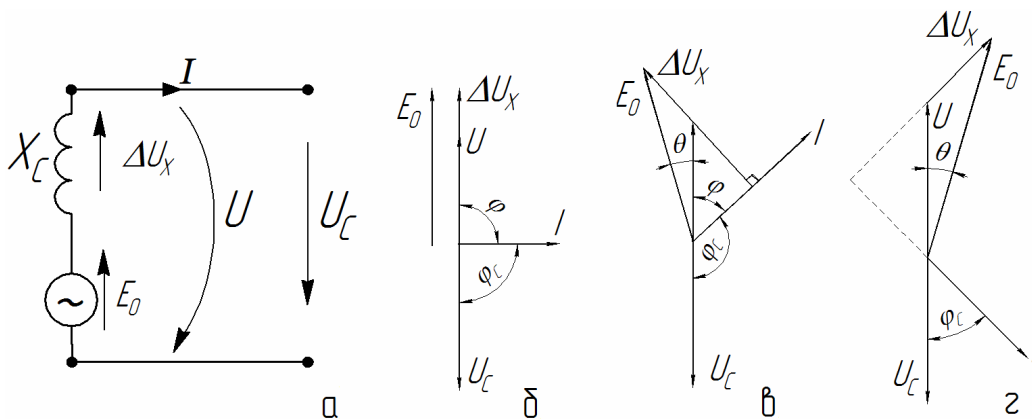


Рис. 10.4. Работа СМ параллельно с сетью: а – схема; б – режим холостого хода; в – режим генератора; г – режим двигателя

Величину ЭДС E_0 можно регулировать величиной магнитного потока ротора, т.е. потоком возбуждения. Если $E_0 < U_c$, то СМ считается недо возбужденной, если $E_0 > U_c$, то СМ перевозбуждена. Рассмотрим работу перевозбужденной СМ во всех режимах.

По второму закону Кирхгофа для выбранного направления тока $\bar{E}_0 = \Delta\bar{U}_x + \bar{U}$, где \bar{U} – напряжение на зажимах обмотки статора СМ, равное напряжению сети. Но если для выбранного направления тока обмотка СМ является генератором, то сеть является приемником, поэтому эти напряжения находятся в противофазе ($\bar{U} = -\bar{U}_c$).

В режиме холостого хода СМ не отдает и не потребляет электрическую энергию ($P = 0$), а это будет иметь место, когда фазный сдвиг между током и напряжением равен 90° . Падение напряжения на реактивном сопротивлении ΔU_x должно опережать ток на 90° , т.е. должно быть направлено вдоль вектора \bar{U} . Но так как в перевозбужденной машине $E_0 > U_c$, то, направив произвольно вектор U (вертикально вверх), ток следует направить в сторону отставания от него, чтобы выполнилось условие $\bar{E}_0 = \Delta\bar{U}_x + \bar{U}$ (см. рис. 10.4, б).

Относительно сети ток холостого хода является опережающим, т.е. **первозбужденная СМ, работающая на холостом ходу, ведет себя как конденсатор**. Специальные СМ, которые используются для повышения коэффициента мощности какой-либо нагрузки, называются синхронными компенсаторами. По сравнению с конденсаторными батареями они дешевле и имеют меньшие габариты.

В режиме генератора фазный сдвиг между напряжением и током меньше 90° , а между напряжением сети и током угол φ_c – тупой. Это означает, что сеть является не источником, а приемником электроэнергии (см. рис. 10.4, в).

Практически, чтобы перевести СМ в режим генератора, необходимо к валу ротора приложить момент от первичного двигателя в сторону вращения ротора. При этом ротор кратковременно получит ускорение, и ось поля ротора начнет опережать поле статора на угол θ , при котором вращающий момент первичного двигателя уравнивает тормозной момент, создаваемый током нагрузки.

В режиме двигателя СМ является приемником электроэнергии и угол φ_c между напряжением сети и током должен быть острым (см. рис. 10.4, г). Это будет иметь место, если к валу СМ приложить тормозной момент какой-либо рабочей машины, который вызовет отставание ротора. Поворот вектора E_0 в сторону отставания (по часовой стрелке) повлечет за собой поворот вектора ΔU_{x0} , а т.к. ток должен отставать от напряжения ΔU_x на 90° , то для сети он будет опережающим и образовывать с вектором напряжения сети острый угол.

Как видно из векторной диаграммы, перевозбужденный синхронный двигатель потребляет из сети опережающий ток, что способствует повышению коэффициента мощности нагрузки, имеющей активно-индуктивный характер (асинхронные двигатели). Обычно синхронный двигатель целесообразно применять в установках большой мощности, которые работают в условиях редких пусков.

10.5. Пуск в ход синхронного двигателя

Запуск синхронного двигателя прямым включением в сеть невозможен из-за инерционности ротора. Действительно, если двигатель возбужден, т.е. обмотка возбуждения включена в сеть постоянного тока, а обмотка статора подключена к трехфазной сети, то вращающееся магнитное поле будет взаимодействовать с неподвижным полем ротора в один полупериод, создавая вращающий момент, например, по часовой стрелке, а в другой полупериод – в обратном направлении. Эти равные по величине, но обратные по направлению толчки частотой 50 Гц не могут вызвать вращение инерционного ротора. По этой причине для запуска двигателя ротору необходимо сообщить скорость, близкую к скорости вращения поля, в результате чего двигатель втянется в синхронизм и ротор будет вращаться с синхронной скоростью ω_0 .

Пуск трехфазных синхронных двигателей можно осуществить с помощью вспомогательного асинхронного двигателя, который разгоняет ротор почти до синхронной скорости, после чего двигатель включают на параллельную работу с сетью. Таким образом запускаются мощные синхронные компенсаторы.

В современных трехфазных синхронных двигателях на роторе располагается короткозамкнутая обмотка, с помощью которой ротор разгоняется до предсинхронной скорости. Принцип асинхронного пуска синхронных машин поясняет рис. 10.5.

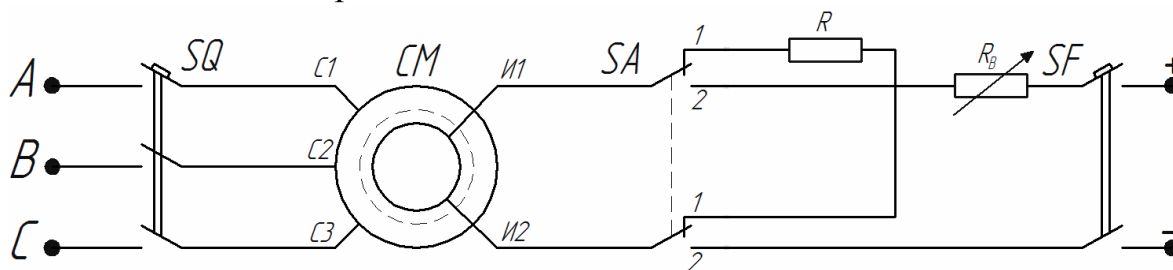


Рис. 10.5. Асинхронный пуск синхронного двигателя

Перед пуском двухполюсный переключатель SA устанавливают в первое положение, при котором обмотка возбуждения отключается от сети и замыкается на разрядный резистор R. Это исключает толчковый знакопеременный момент на ротор, снижает величину перенапряжения, которая возникла бы на разомкнутой обмотке возбуждения, и увеличивает пусковой момент.

При замыкании автоматического воздушного выключателя SQ на обмотки статора подается трехфазное питание и двигатель начинает разгоняться подобно асинхронному с короткозамкнутым ротором. Дополнительный вращающий момент будет создаваться за счет обмотки возбуждения, замкнутой на резистор R.

После достижения предсинхронной скорости включают автомат SF, а переключатель SA устанавливают во второе положение, подключая обмотку ротора к сети постоянного тока, в результате чего синхронный двигатель втягивается в синхронизм и асинхронный момент исчезает. В явнополюсном двигателе синхронный вращающий момент усиливается реактивным моментом.

Управление пуском синхронных двигателей в современных приводах автоматизируется, но относительная сложность запуска ограничивает область их применения. Они используются для нерегулируемого электропривода компрессоров, насосов, воздуходувок, различных мельниц и других нагрузок.

10.6. Синхронные машины малой мощности

Синхронные машины небольшой мощности используются как двигатели маломощных электрических приводов, например, в устройствах автоматического управления, контроля и других случаях, когда требуется постоянная скорость вращения.

Обмотки статора этих машин могут быть трехфазными или двухфазными, они подключаются к трехфазной или однофазной сети и служат для создания вращающегося магнитного поля. Обмотка возбуждения в микромашинах отсутствует, а синхронный момент в них создается или за счет предварительного намагничивания магнитно-твердого сплава, из которого изготовлен ротор, или за счет явнополюсного ротора (синхронный реактивный момент).

10.6.1. Синхронные двигатели с постоянными магнитами

Этот двигатель имеет явнополюсный ротор из магнитно-твердого сплава и короткозамкнутую пусковую обмотку. Электромагнитные процессы в магнитоэлектрических синхронных двигателях аналогичны процессам в СМ с электромагнитным возбуждением. Эти двигатели используют в приборостроении и устройствах автоматики, где требуется постоянная частота вращения.

10.6.2. Синхронные реактивные двигатели

Синхронные реактивные двигатели (СРД) имеют явнополюсный ротор из магнитно-твердого сплава и короткозамкнутую пусковую обмотку (рис. 10.6). При включении обмотки статора в сеть возникает вращающееся магнитное поле.

Пусть в начальный момент времени ось поля будет вертикальна. Так как в соответствии с принципом работы электромагнитных устройств магнитное поле должно быть максимальным, то ротор установится соосно с полем, т.к. воздушный зазор и магнитное сопротивление потоку будут минимальными.

Если при своем вращении поле повернется на какой-либо угол, то и ротор будет стремиться повернуться на тот же угол, при котором сохранится максимальный магнитный поток. Недостатками СРД являются низкие энергетические параметры ($\cos\phi$ и η). Однако простота конструкции и высокая эксплуатационная надежность обеспечили СРД широкое применение в устройствах автоматики для привода самопишущих приборов, в устройствах звукозаписи и видеозаписи. Известны СРД типа СД-10 (10 Вт), Сд-54, которые имеют встроенный редуктор и широко используются для привода лентопротяжных механизмов в автоматических мостах и потенциометрах.

10.6.3. Синхронные гистерезисные двигатели

Конструктивной особенностью синхронного гистерезисного двигателя (СГД) является наличие цилиндрического неявнополюсного ротора, выполненного из магнитно-твердого сплава без предварительного подмагничивания.

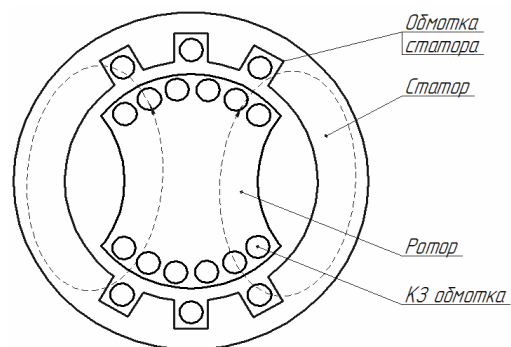


Рис. 10.6. Синхронный реактивный двигатель

Двухфазная или трехфазная обмотка статора создает вращающееся магнитное поле. При этом ротор намагничивается, т.е. частицы ферромагнитного материала ротора стремятся ориентироваться вдоль направления поля. Если магнитное поле повернется на угол α , то, казалось бы, и ось намагниченности ротора будет совпадать с новым направлением, а силы, действующие на ротор, будут только растягивающими, направленными вдоль одной прямой, и вращающий момент при этом не создается.

Однако элементарные частицы магнитно-твердого материала из-за сил молекулярного трения не успевают ориентироваться вдоль нового направления внешнего магнитного потока. В результате этого появляется пара сил, между которыми создается плечо, благодаря чему возникает вращающий момент, направленный в сторону вращения поля, и ротор будет вращаться с синхронной скоростью.

В двигателях с массивным ротором скорость его вращения может быть меньше скорости вращения поля. При этом в массивном роторе будут возникать вихревые токи, создающие асинхронный момент вращения. Таким образом, СГД может работать как с синхронной, так и с асинхронной частотой вращения.

Достоинствами СГД являются простота конструкции, бесшумная работа, высокая эксплуатационная надежность, большой пусковой момент, сравнительно высокий КПД, небольшая величина пускового тока ($I_{II} / I_H = 1,3 \dots 1,4$). К недостаткам СГД следует отнести низкий $\cos\phi$ и сравнительно высокую стоимость.

10.6.4. Синхронные реактивно-гистерезисные двигатели

Статор реактивно-гистерезисного двигателя (РГД) представляет собой П-образный сердечник 1 с явно выраженными полюсами 2 (рис. 10.7). Каждый полюс разделен продольным пазом на две части, одна из которых охватывается короткозамкнутым витком 3. Обмотка статора 4 наматывается на каркас подобно обмотке трансформатора. Ротор 5 собирается из 6 – 7 пластин закаленной магнитно-твердой стали. Форма сердечника явнополюсная, но имеется тонкий кольцевой обод.

Если включить обмотку статора в сеть переменного тока, то благодаря расщепленным экранированным полюсам образуется вращающееся магнитное поле.

При пуске РГД на ротор действует асинхронный и гистерезисный моменты. После пуска ротор втягивается в синхронизм и асинхронный момент становится равным нулю, но благодаря явнополюсному ротору появляется синхронный реактивный момент.

Известны однофазные синхронные реактивно-гистерезисные двигатели серии ДСД и ДСДР. Эти двигатели имеют большие габариты и низкие энергетические показатели (кпд и $\cos\phi$). Но достоинством РГД является простота конструкции и технологичность при изготовлении.

Применяются РГД в приборной технике и автоматических устройствах для привода программных и временных механизмов (лентопротяжные механизмы, реле времени, электрические часы).

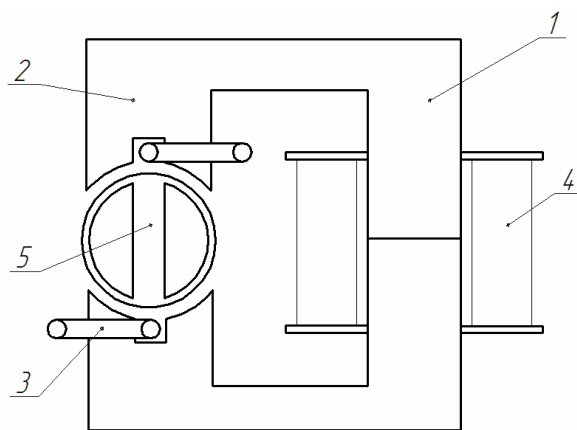


Рис. 10.7. Синхронный реактивно-гистерезисный двигатель:
1 – статор; 2 – полюс; 3 – короткозамкнутый виток; 4 – обмотка статора; 5 – ротор

10.6.5. Двигатели с электромагнитной редукцией скорости

Статор двигателя похож на статор обычного традиционного двигателя, но на внутренней поверхности имеет z_1 зубцов. Угловой шаг зубцов статора $\alpha_1 = 360/z_1$. По внешней поверхности ротора также вырезаны зубцы. Число зубцов ротора $z_2 > z_1$, так что угловой шаг зубцов ротора $\alpha_2 = 360/z_2$ (рис. 10.8).

При включении обмотки статора (на рисунке не показан) в трехфазную или однофазную сеть образуется вращающееся магнитное поле. По принципу действия двигатель является синхронным реактивным.

Пусть в начальный момент времени ось магнитного потока совпадает с осью первого зубца статора. Тогда ближайший к нему зубец ротора установится соосно с зубцом статора, т.к. в этом положении магнитное сопротивление минимально, а магнитный поток наибольший (принцип работы электромагнитных устройств).

Когда ось магнитного поля повернется на угол α_1 и будет проходить через второй выступ, ближайший к нему зубец 2 ротора ус-

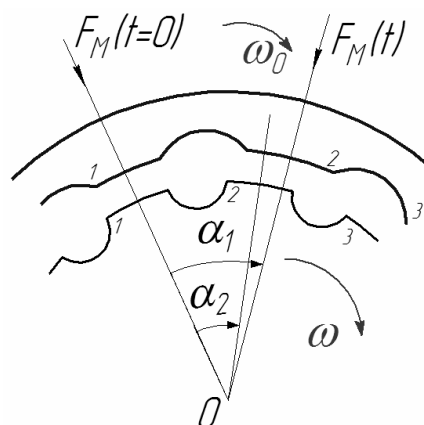


Рис. 10.8. Схема устройства синхронного двигателя с электромагнитной редукцией скорости

тановится соосно со вторым зубцом статора, т.е. повернется по часовой стрелке на угол $\alpha_1 - \alpha_2$. Скорость вращения поля ω_0 и скорость вращения ротора ω будут пропорциональны их угловому перемещению, соответственно α_1 и $\alpha_1 - \alpha_2$.

$$\frac{\omega_0}{\omega} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} = \frac{\frac{360}{z_1}}{\frac{360}{z_1} - \frac{360}{z_2}}.$$

Отсюда скорость вращения ротора двигателя

$$\omega = \frac{z_2 - z_1}{z_2} \omega_0 \text{ (с}^{-1}\text{)} \quad \text{или} \quad n = \frac{z_2 - z_1}{z_2} n_0 \text{ (об/мин)}.$$

Например,

при $n_0 = 3000$ об/мин, $z_1 = 16$, $z_2 = 18$ $n = 333$ об/мин;

при $n_0 = 3000$ об/мин, $z_1 = 398$, $z_2 = 400$ $n = 15$ об/мин.

10.6.6. Двигатель с катящимся ротором

Особенностью двигателя с катящимся ротором (ДКР) является эксцентричное расположение ротора и статора. По принципу действия ДКР является синхронным реактивным двигателем с электромагнитной редукцией скорости. На рис. 10.9, *а* показано расположение ротора и статора в момент времени $t = 0$, когда магнитное поле статора направлено вертикально вверх и радиус ротора A_2O_2 занимает вертикальное положение, а на рис. 10.9, *б* – в момент времени t , когда вращающееся поле статора повернулось против часовой стрелки на угол α_1 и радиус ротора O'_2A_2 повернулся на угол α_2 .

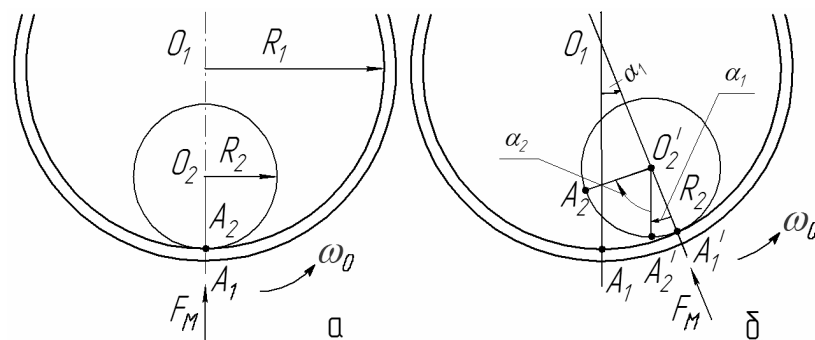


Рис. 10.9. Расположение ротора и статора ДКР:
а – в момент времени $t = 0$; *б* – в момент времени t

Очевидно, отношение скоростей ротора и поля статора пропорционально отношению углов α_1 и α_2 , на которые они повернулись за одно и то же время t :

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{\angle A_2 O_2 A_1' - \angle A_2' O_2' A_1'}{\angle A_1 O_1 A_1'} = \frac{\overset{\cup}{A_2 A_1'} / R_2 - \alpha_1}{\overset{\cup}{A_1 A_1'} / R_1}.$$

Заменим в числителе α_1 на отношение дуги к радиусу $\overset{\cup}{A_1 A_1'} / R_1$. Если ротор перекачивается без скольжения, то $\overset{\cup}{A_2 A_1'} = \overset{\cup}{A_1 A_1'}$ и отношение $\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{1/R_2 - 1/R_1}{1/R_1} = R_1 - R_2 / R_2 = K_p$ (коэффициент редукции).

Таким образом, $\omega = K_p \omega_0$.

Если $R_2 \approx R_1$, то коэффициент редукции может достигать значения $K_p = 10^{-4}$. Например, при скорости вращения поля $n_0 = 3000$ об/мин ротор будет вращаться очень медленно со скоростью $n = 0,3$ об/мин.

Так как ротор ДКР расположен эксцентрично относительно статора, то для передачи вращающего момента к рабочему механизму применяют карданную передачу.

Преимуществами ДКР являются отсутствие механического редуктора, большой пусковой момент при малом пусковом токе, а также небольшое время разгона. К недостаткам ДКР следует отнести значительные вибрации, шумы и низкий КПД.

10.6.7. Волновые двигатели

Отличительной особенностью волнового двигателя (ВД) является наличие гибкого эластичного ротора, который способен деформироваться (растягиваться) под действием электромагнитных сил. На внутренней поверхности статора и внешней поверхности ротора имеются зубцы с одинаковым шагом, но число зубцов статора z_1 больше числа зубцов ротора z_2 .

По принципу действия ВД являются синхронными реактивными двигателями с катящимся ротором, но оси ротора и статора в них совпадают (рис. 10.10).

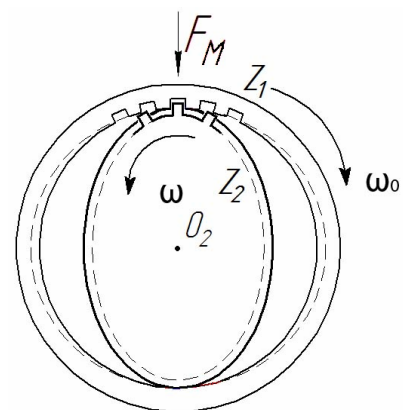


Рис. 10.10. Волновой двигатель

При вращении поля статора со скоростью ω_0 ротор растягивается в эллипс таким образом, что его большая ось совпадает с направлением магнитного потока в данный момент времени. При этом магнитное сопротивление будет минимальным, а магнитный поток – максимальным. Как и в двигателе с катящимся ротором, коэффициент редукции

$$K_p = \frac{z_1 - z_2}{z_2} \quad \text{и} \quad \omega = K_p \omega_0.$$

Так как число зубьев ротора меньше числа зубьев статора, то при вращении поля статора ротор будет вращаться в противоположном направлении.

Волновой двигатель работает бесшумно, т.к. в нем нет вибраций, характерных для ДКР, он обладает небольшой инерцией и обеспечивает высокую точность перемещений.

10.6.8. Шаговые двигатели

Шаговые двигатели (ШД) служат для преобразования электрических сигналов в угловое (скачкообразное) перемещение вала. По назначению ШД являются исполнительными двигателями, а по принципу действия – синхронными реактивными или активными двигателями. Реактивный ротор выполняют явнополюсным без обмотки возбуждения, а активный ротор представляет собой постоянный магнит. На статоре располагается многофазная обмотка управления.

Принцип работы ШД рассмотрим на примере реактивного двигателя с явно выраженными полюсами, на статоре которого располагается трехфазная обмотка управления ОУ.

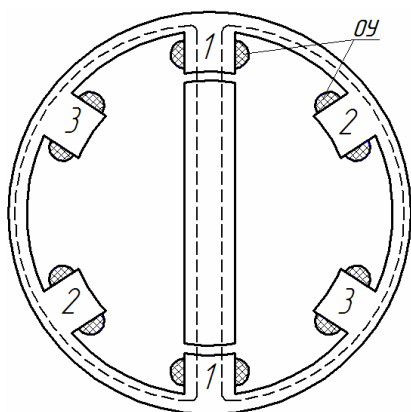


Рис. 10.11. Шаговый двигатель с явно полюсным ротором

Если подать управляющий импульс тока на первую фазу, то явнополюсный ротор установится соосно с магнитным полем статора, образованным током этой фазы (рис. 10.11). Если перенести управляющий импульс на вторую фазу, то ротор по кратчайшему пути установится соосно с магнитным полем второй фазы, т.е. повернется по часовой стрелке на угол 60° .

Таким образом, если подавать поочередно импульсы тока на фазные обмотки статора по схеме $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots$ и т.д.

с частотой f , ШД будет вращаться с частотой $1/6f$, совершая один оборот после подачи шести импульсов. Чтобы поменять направление вращения ротора, необходимо изменить порядок следования импульсов тока по фазам: $1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow \dots$ и т.д.

Для уменьшения шага увеличивают число пар полюсных выступов. Но возможно и другое техническое решение, позволяющее значительно уменьшить угловой шаг.

Полюсные выступы статора такого ШД имеют гребенчатую зубцовую конструкцию. Цилиндрический ротор также выполняют зубчатым (рис. 10.12). Зубцы статора и ротора нарезаны с одинаковым шагом, но смежные полюсные выступы статора смещены относительно зубцов ротора на $1/3$ зубцового деления.

На рис. 10.12 показано положение ротора, когда на обмотку управления третьего полюсного выступа подан электрический сигнал. При этом зубцы ротора установятся напротив зубцов третьего полюсного выступа статора. Если перенести управляющий импульс на первую фазу обмотки статора, то ротор повернется на $1/3$ зубцового деления и вновь зубцы ротора и статора первого полюса установятся напротив друг друга.

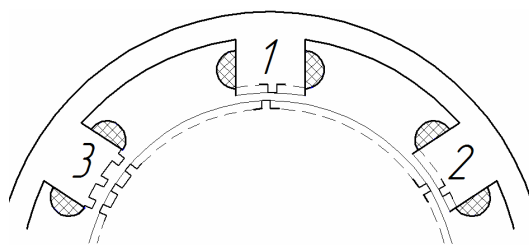


Рис. 10.12. ШД с зубцовым рядом

Таким образом, каждый импульс поворачивает ротор на угол $\alpha = \frac{360}{3 \cdot z}$, где z – число зубцов ротора. Например, двигатель ШД4 имеет на роторе 40 зубцов, следовательно, зубцовый шаг равен $360/40 = 9^\circ$, а каждый импульс поворачивает ротор на 3° .

Суммарный угол поворота ротора ШД пропорционален числу подаваемых импульсов, а скорость вращения – частоте следования импульсов. Наибольшая частота следования импульсов, при которой ШД работает без сбоев (т.е. без пропуска импульсов даже при пуске или остановке), называется *приемистостью* двигателя. Современные ШД имеют приемистость до 10 кГц.

Наибольшее применение получили ШД в электроприводе с программным управлением.

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторная работа № 1

Работа источника на переменную нагрузку

Контрольное задание

На рис. 1 показана цепь питания нагрузки от источника, внешняя характеристика которого приведена на рис. 2.

По заданному напряжению U_A в режиме, соответствующем точке А, току I_B в режиме В и току нагрузки $I = 1$ А определить все величины, указанные в табл. 1, и заполнить ее. Здесь E и $R_{вн}$ – ЭДС и внутреннее сопротивление источника; $I_{КЗ}$ – ток короткого замыкания ($R = 0$); ΔP – потери мощности внутри источника; P_1 – мощность источника; P_2 – мощность нагрузки; η – кпд источника. Определить режим работы источника, если номинальное напряжение его $U_H = 0,9U_A$. Показать на внешней характеристике в выбранном масштабе точку номинального режима и рабочую точку (при токе нагрузки 1 А).

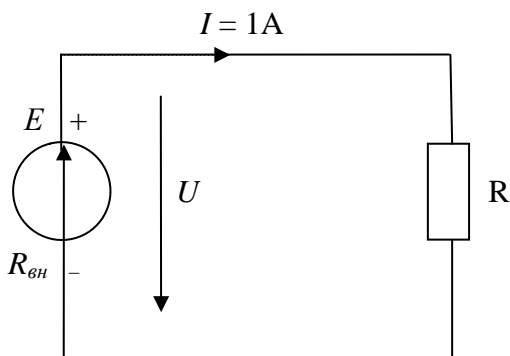


Рис. 1. Цепь питания нагрузки

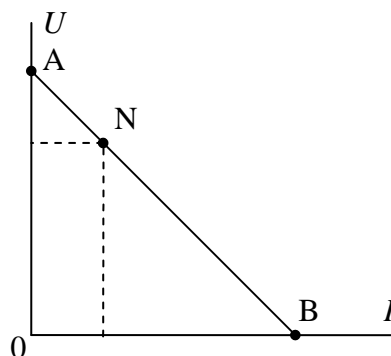


Рис. 2. Внешняя характеристика источника

Таблица 1

Расчетная таблица

E	$I_{КЗ}$	U	$R_{вн}$	R	P_1	P_2	ΔP	η	Режим работы
В	А	В	Ом	Ом	Вт	Вт	Вт	–	

Исходные данные для каждого варианта определяются по табл. 2 на пересечении горизонтальных и вертикальных прямых, проходящих через номер варианта до заданного значения того или иного параметра. Например, для варианта 11 $U_A = 200$ В; $I_B = 5$ А.

Таблица 2

Таблица вариантов

U_A (В) \ I_B (А)	10	20	50	100	200	500
2	1	2	3	4	5	6
5	7	8	9	10	11	12
10	13	14	15	16	17	18
20	19	20	21	22	23	24

Лабораторная работа № 2

Изучение и испытание аппаратов ручного и автоматического управления

Контрольные вопросы:

1. На каком принципе основана работа электромагнитных аппаратов?
2. Чем отличается электромагнитное реле от контактора?
3. Чем отличаются контакторы постоянного и переменного тока?
4. Почему якорь электромагнитного аппарата иногда «залипает» и как борются с этим явлением?
5. Как исключается вибрация электромагнитных аппаратов переменного тока?
6. Чем отличается тепловое реле от реле тока:
 - а) по принципу действия;
 - б) конструктивно;
 - в) по назначению.
7. Изменится ли ток срабатывания, если обмотки теплового реле соединить:
 - а) последовательно;
 - б) параллельно.
8. Является ли инерционность теплового реле положительным свойством этого аппарата?
9. Как изменится ток срабатывания реле тока, если его обмотки пересоединить с последовательного соединения на параллельное?

10. Как изменится ток срабатывания реле тока, если отсоединить одну из параллельно включенных обмоток?
11. Как изменится ток срабатывания реле тока, если уменьшить вдвое число витков?
12. Какие технические решения можно предложить, чтобы увеличить ток срабатывания теплового реле (реле тока)?
13. Какие аппараты изображены на рис. 3? Пояснить, из каких электрических элементов они состоят, и обозначить их буквенно.

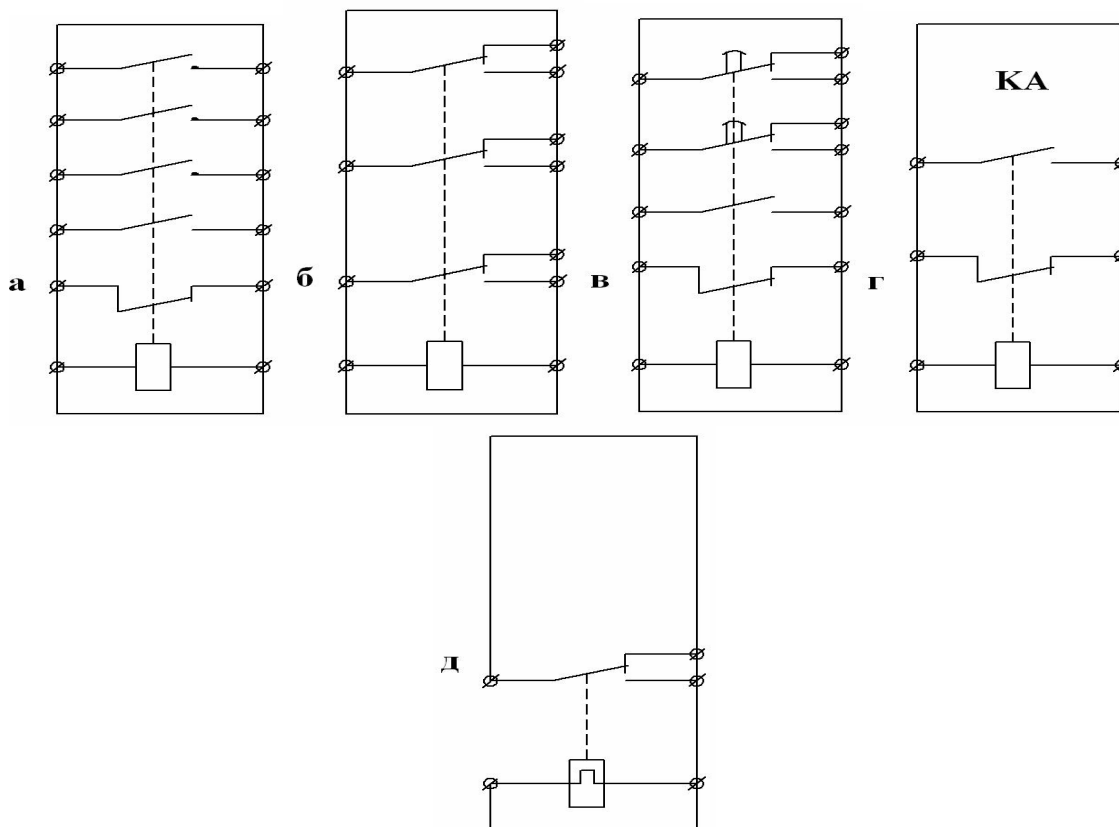


Рис. 3. Схемы аппаратов

14. Пояснить, как будут коммутировать во времени сигнальные лампы:
 - а) при включении тумблера SA;
 - б) при выключении тумблера SA
 (рис. 4).

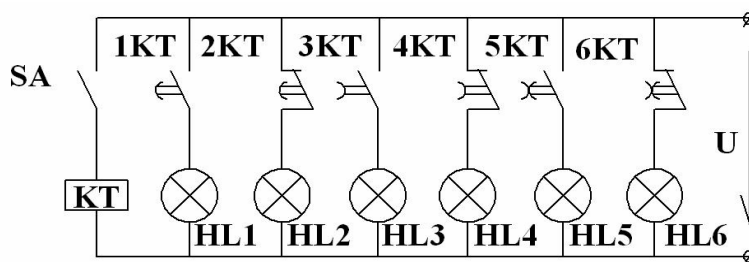


Рис. 4. Схема включения сигнальных ламп

Лабораторная работа № 3

Максимальная токовая защита электрических цепей (Часть I)

Контрольное задание

Объяснить работу заданной электрической схемы в нормальном режиме и при перегрузке (рис. 5). Обеспечивает ли схема нулевую защиту?

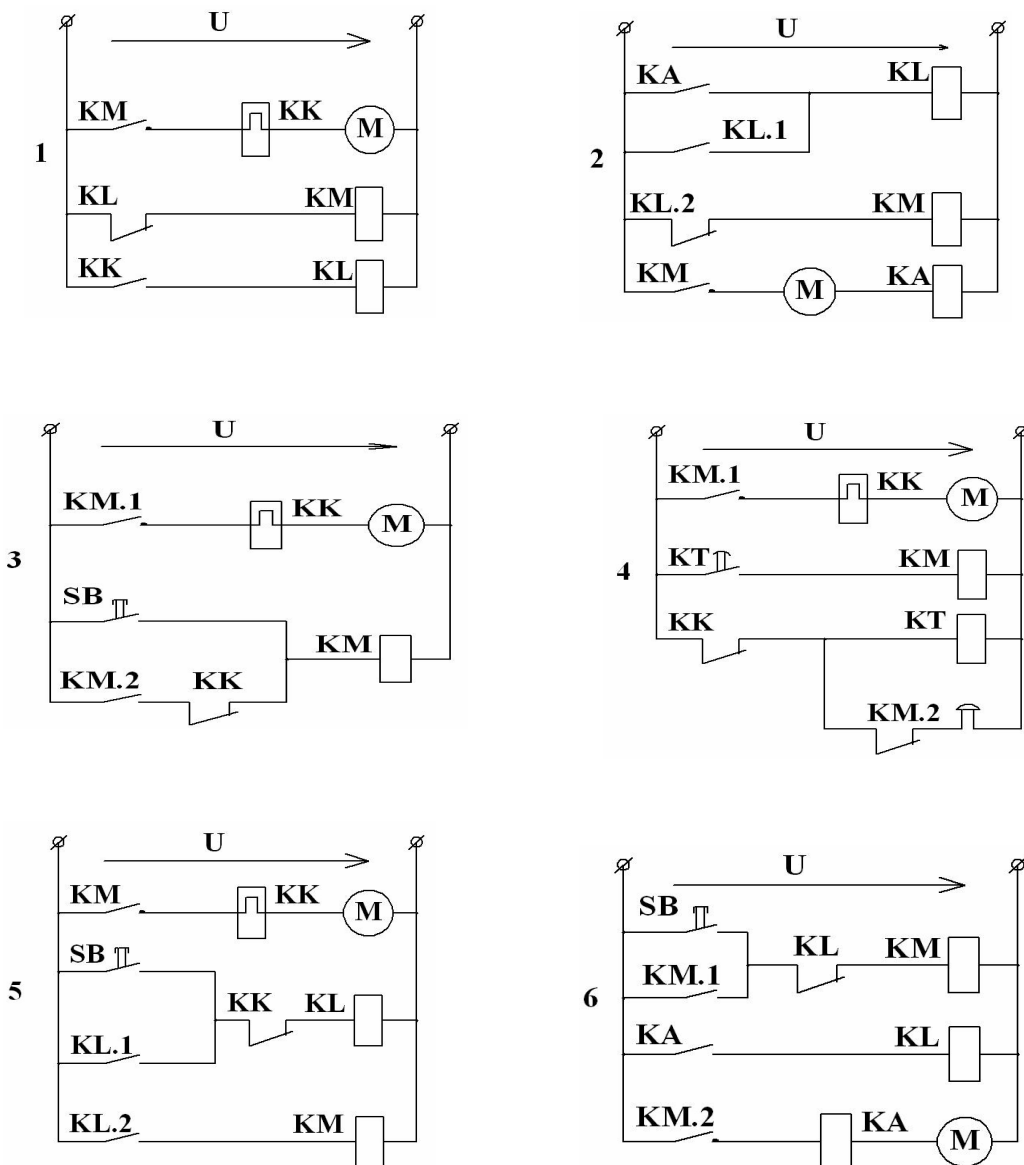


Рис. 5. Электрические схемы (см. также с. 201)

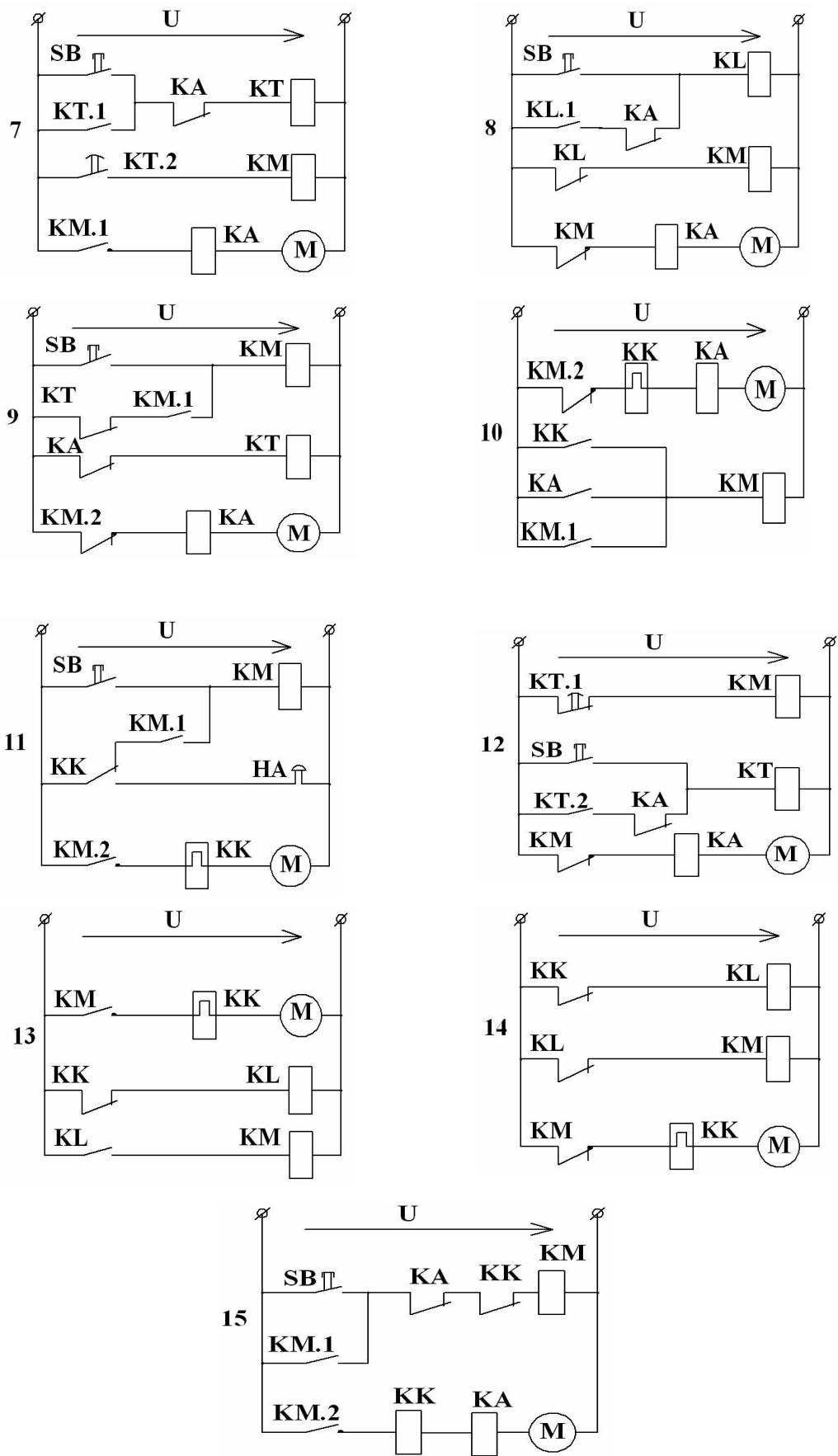


Рис. 5. Окончание

Лабораторная работа № 4

Максимальная токовая защита электрических цепей (часть II)

Контрольное задание

По заданной монтажной схеме питания электродвигателя с максимальной токовой защитой нарисовать принципиальную схему, на которой буквенно обозначить все элементы цепи, цифрами – участки цепи в соответствии с монтажной схемой и объяснить принцип работы.

Как будет работать схема, если:

в схеме 1 провод 5-1 подсоединить не к 5-й, а к 4-й клемме КК;

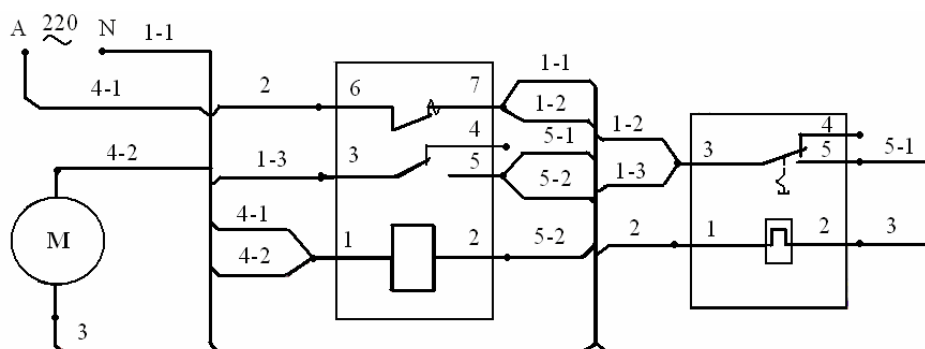


Схема 1

в схеме 2 провод 1-2 подсоединить не к 4-й, а к 3-й клемме КК;

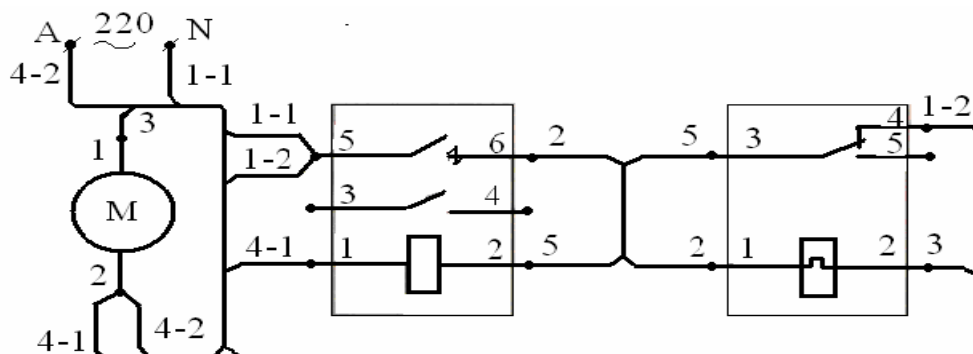


Схема 2

в схеме 3 провод 2 подсоединить не ко 2-й, а к 1-й клемме КК;

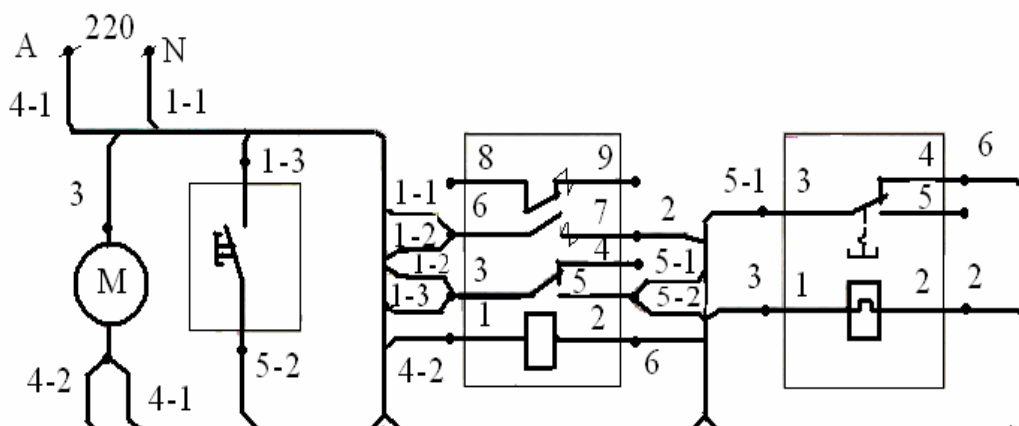


Схема 3

в схеме 4 провод 5-2 подсоединить не к 5-й, а к 4-й клемме КМ;

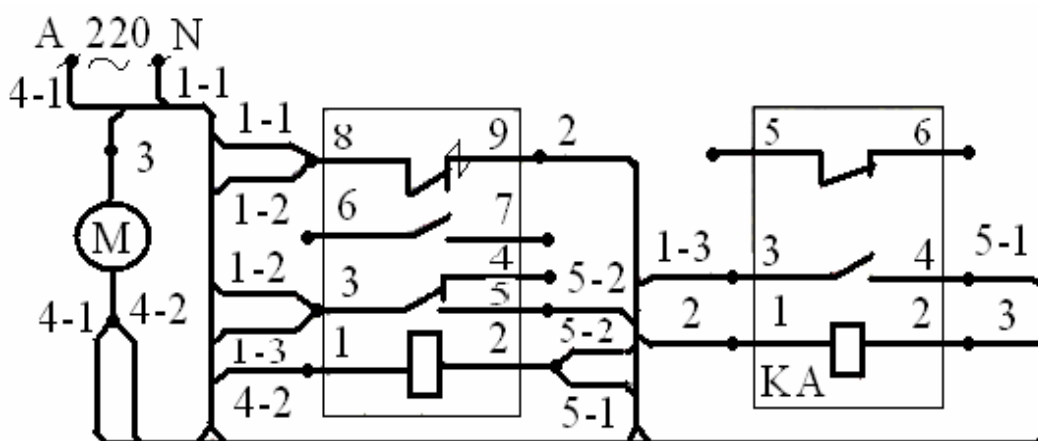


Схема 4

в схеме 5 провод 1-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме М;

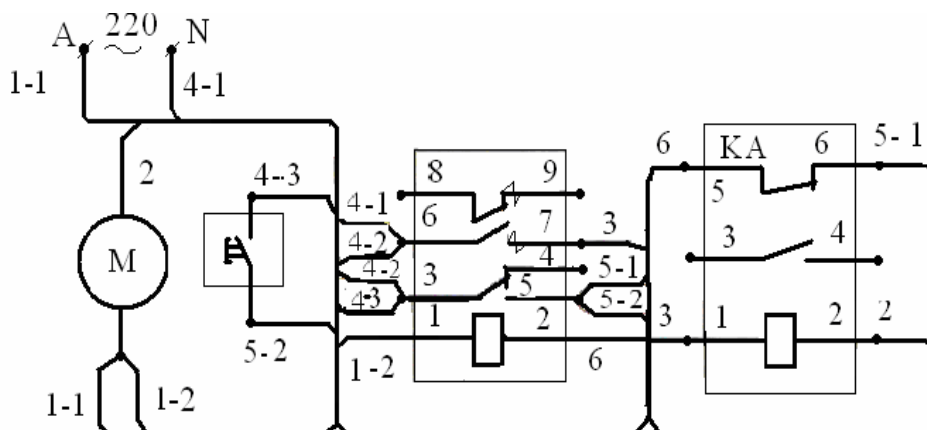


Схема 5

в схеме 6 провод 4-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме КК;

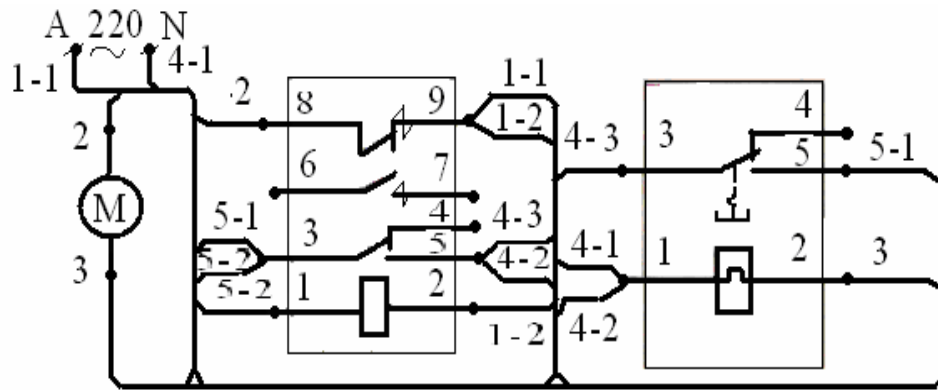


Схема 6

в схеме 7 провод 1-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме КК;

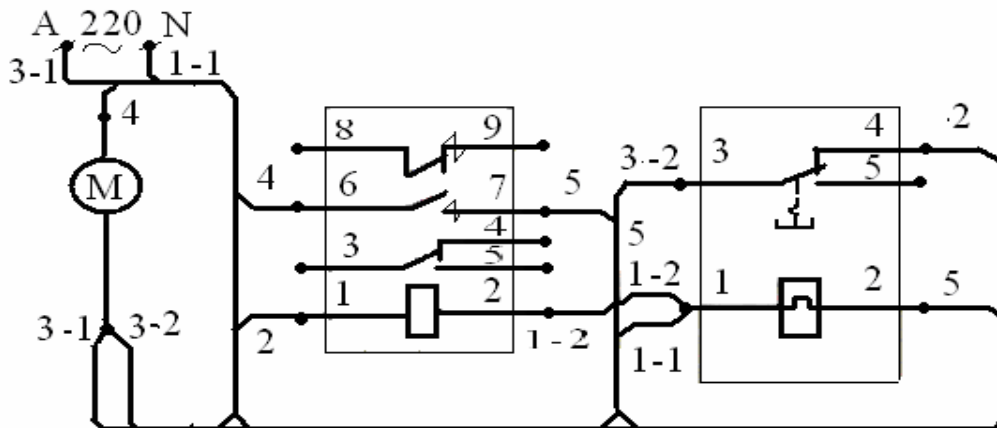


Схема 7

в схеме 8 провод 4-3 подсоединить не к 3-й, а к 5-й клемме КМ;

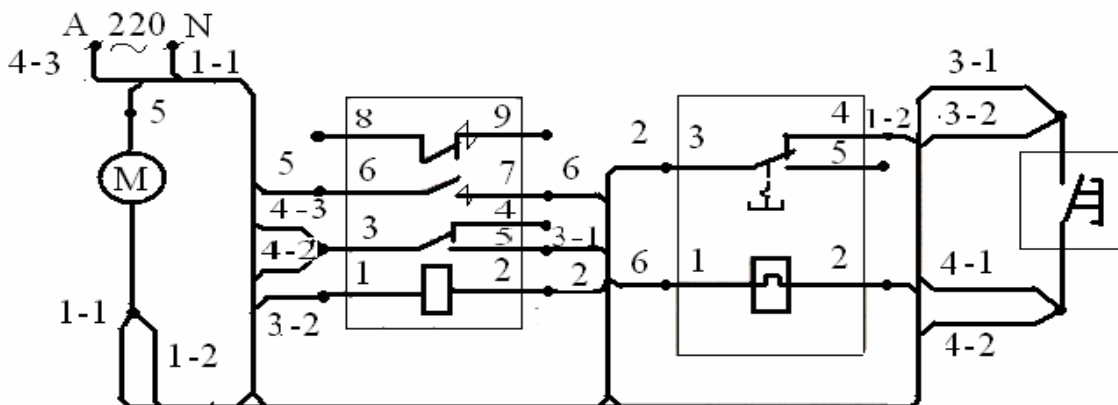


Схема 8

в схеме 9 провод 1-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме М;

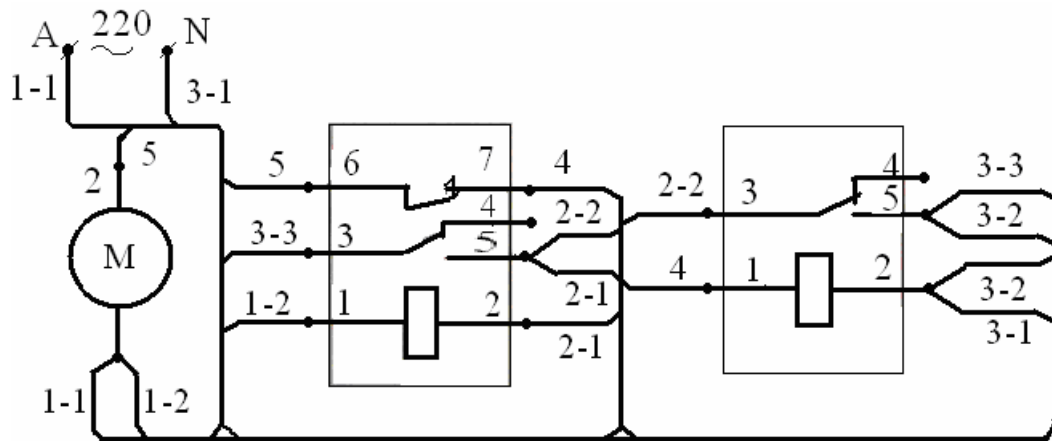


Схема 9

в схеме 10 провод 1-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме КА;

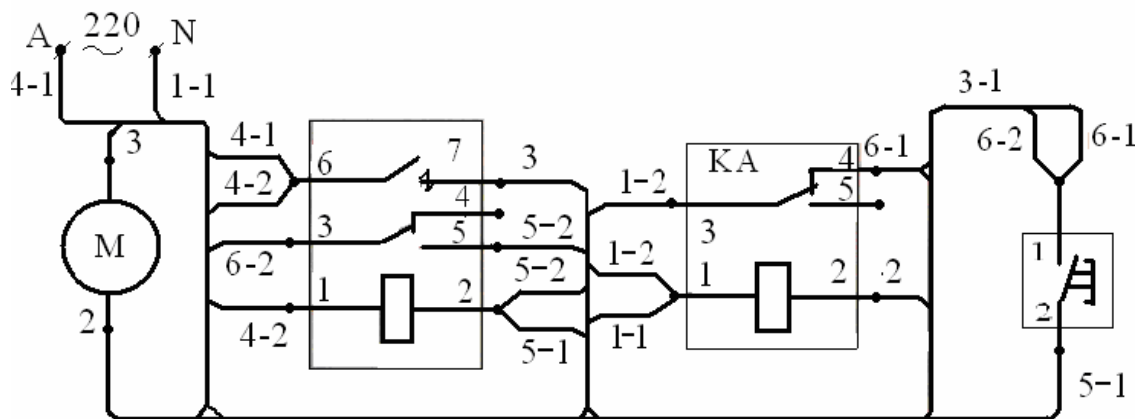


Схема 10

в схеме 11 оборван провод 4-3;

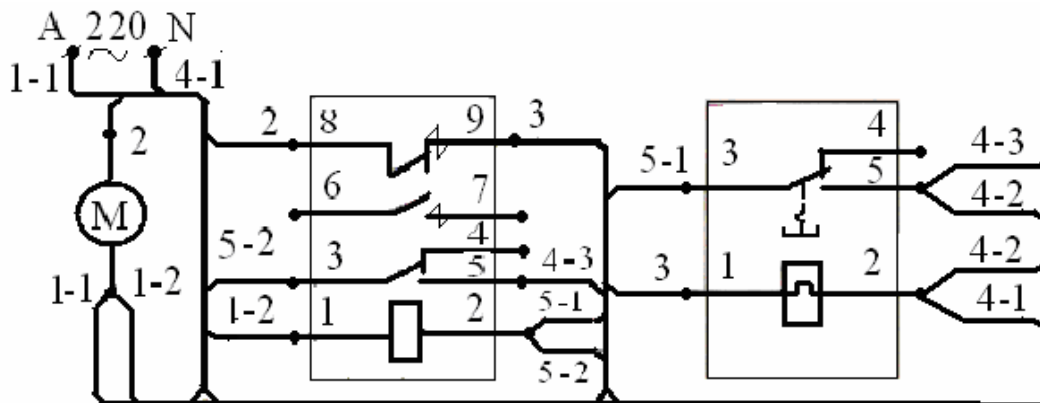


Схема 11

в схеме 12 соединить перемычкой 2-ю и 4-ю клеммы КК;

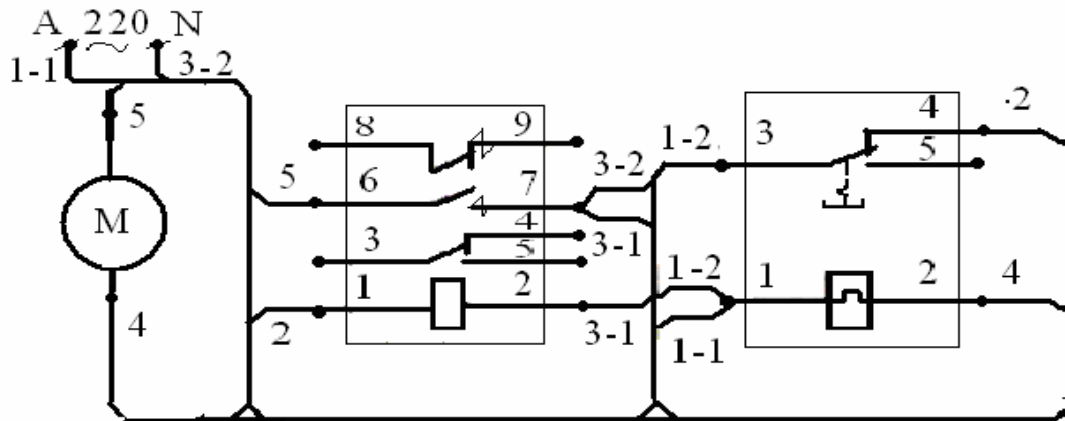


Схема 12

в схеме 13 провод 2-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме КК;

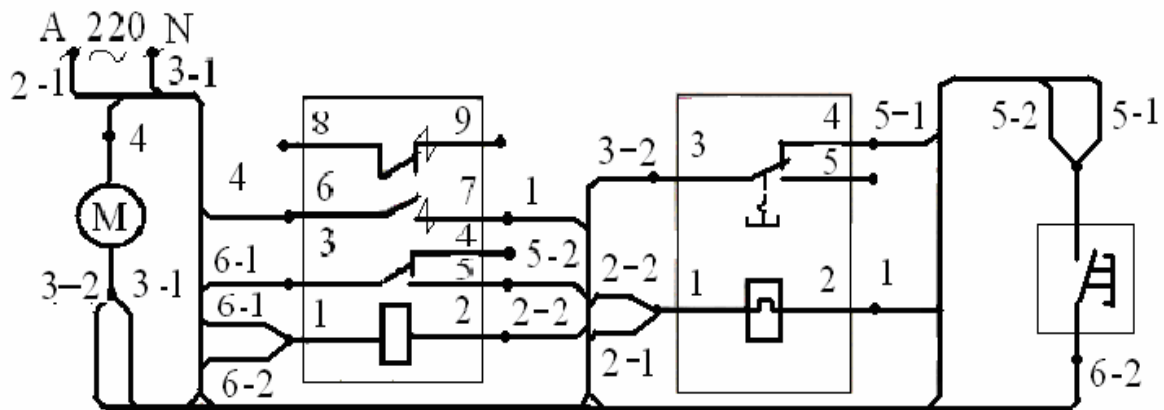


Схема 13

в схеме 14 провод 4-3 подсоединить не к 3-й, а к 9-й клемме КМ;

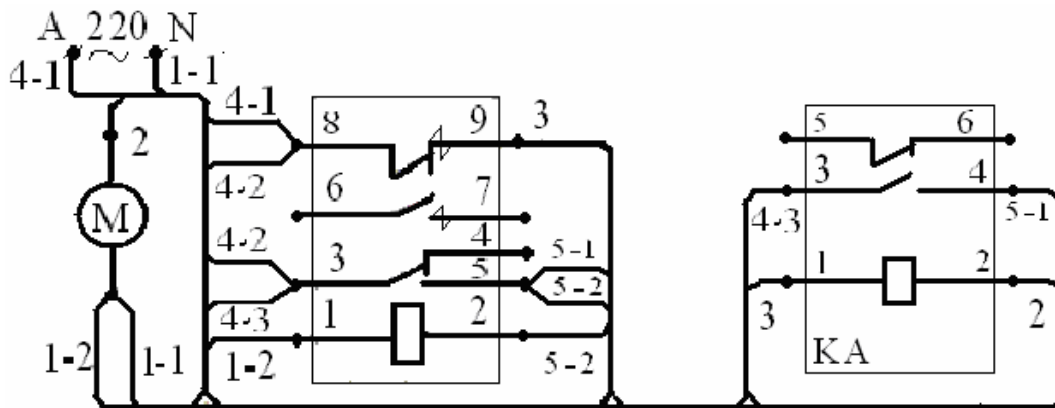


Схема 14

в схеме 15 оборван провод 4-1;

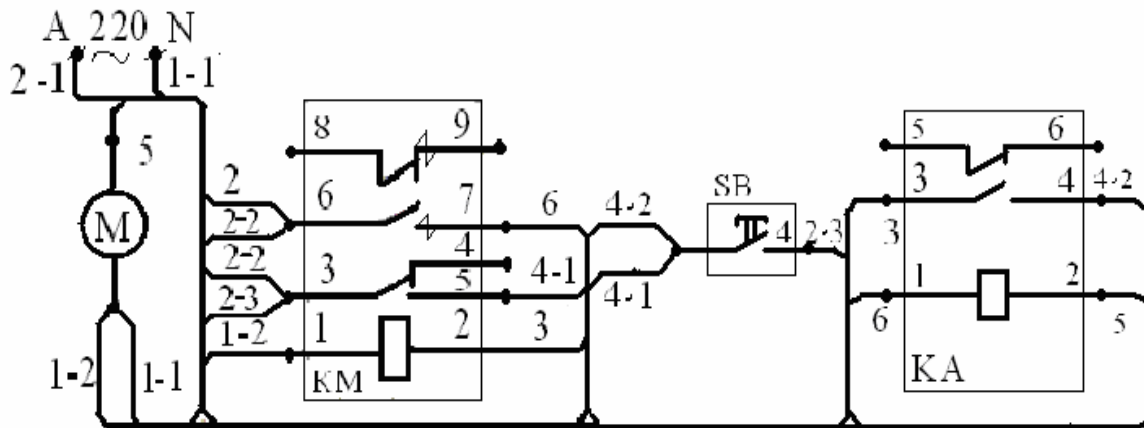


Схема 15

в схеме 16 оборван провод 2-2;

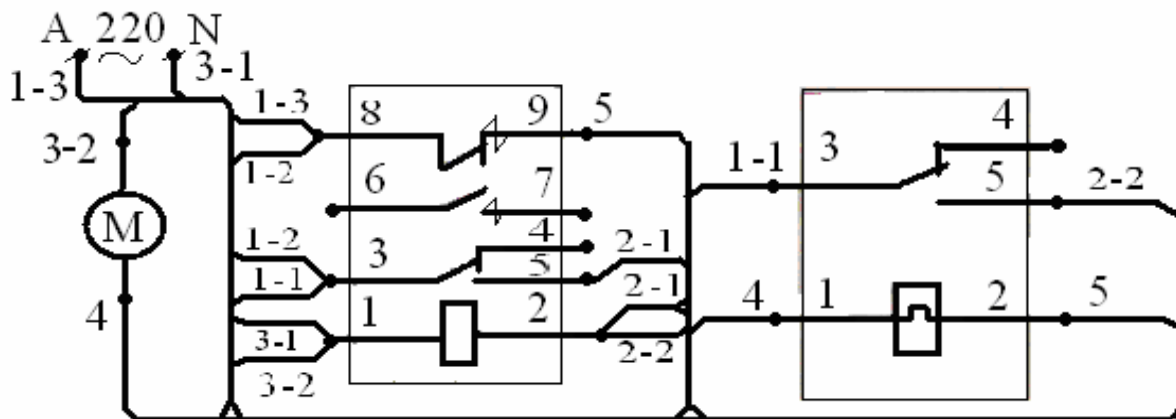


Схема 16

в схеме 17 соединить перемычкой 4-ю и 2-ю клеммы КМ;

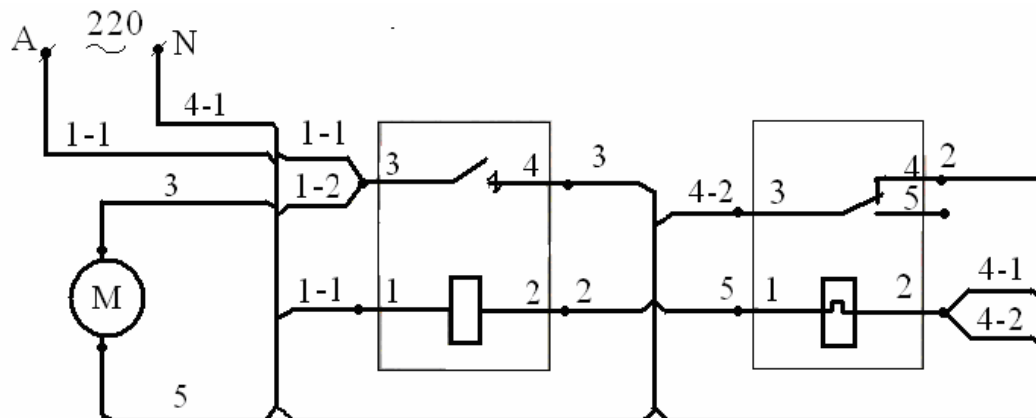


Схема 17

в схеме 18 провод 4-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме КМ;

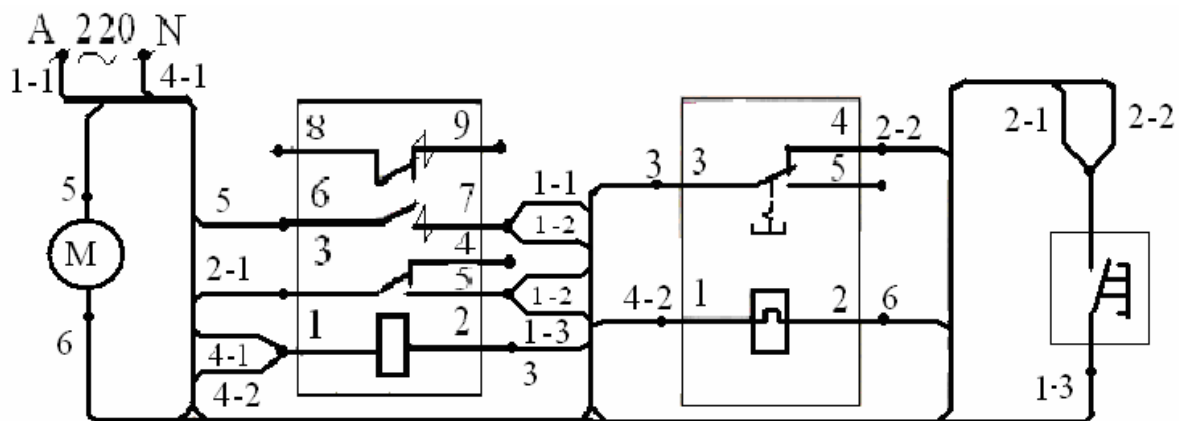


Схема 18

в схеме 19 провод 3-2 подсоединить не ко 2-й, а к 1-й клемме КА;

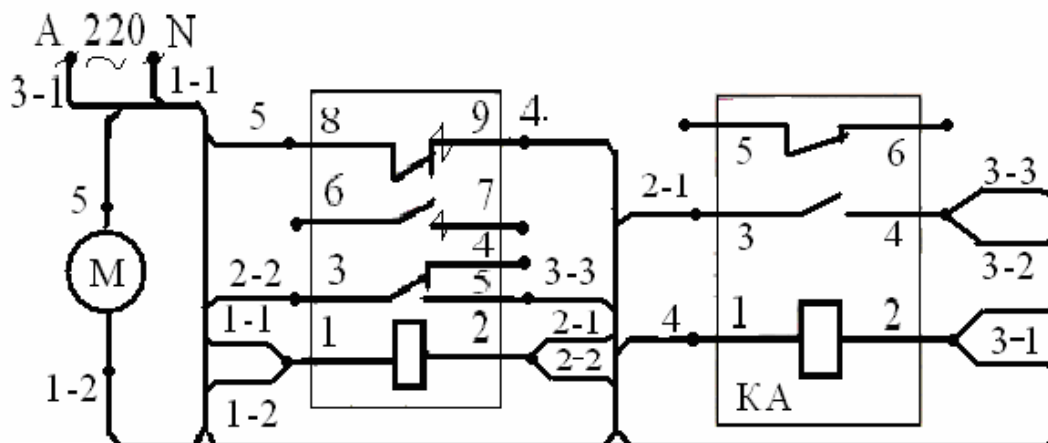


Схема 19

в схеме 20 провод 2-2 подсоединить не ко 2-й, а к 1-й клемме КА.

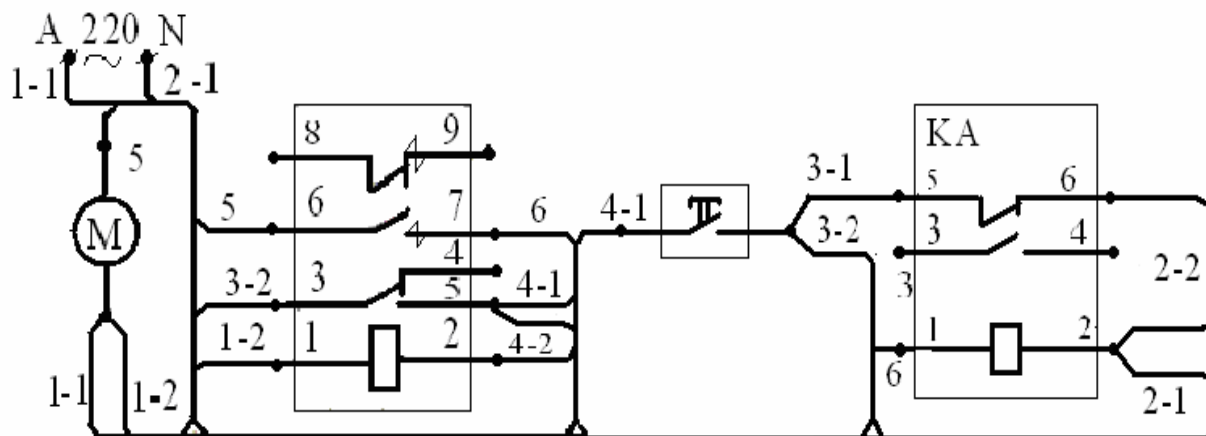


Схема 20

Лабораторная работа № 5

Исследование трехфазных цепей

Контрольное задание

Трехфазный генератор, фазное напряжение которого равно 220 В, питает симметричную активную нагрузку, состоящую из трех групп ламп накаливания.

На какое номинальное напряжение должны быть рассчитаны лампы, если они включены по схеме, заданной в табл. 3?

Определить линейное напряжение нагрузки, а при соединении ламп звездой – и фазные напряжения нагрузки, если сгорел один из заданных в таблице предохранителей, включенных в линию на выходе генератора.

На рис. 6 в качестве примера показано соединение генератор – нагрузка по схеме звезда – звезда с нулевым проводом.

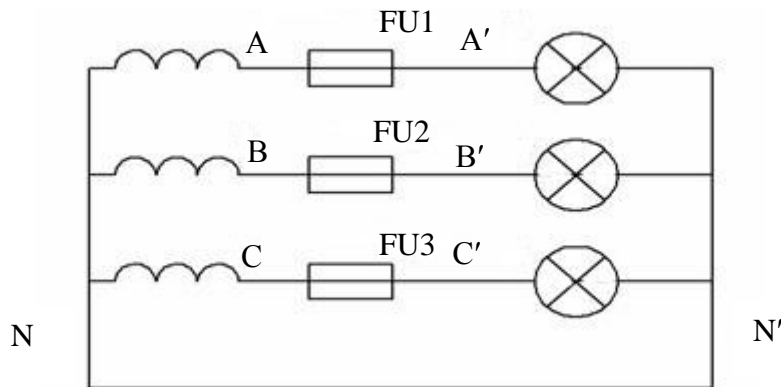


Рис. 6. Схема питания нагрузки

Таблица 3

Таблица вариантов

Схема	Сгорел предохранитель линии			Определить					
	AA'	BB'	CC'	$U_{A'B'}$	$U_{BC'}$	$U_{CA'}$	$U_{AN'}$	$U_{BN'}$	$U_{CN'}$
Y – Y _N	1	6	11						
Y – Y	2	7	12						
Δ – Y	3	8	13						
Y – Δ	4	9	14				–	–	–
Δ – Δ	5	10	15				–	–	–

Лабораторная работа № 6

Исследование машины постоянного тока в режиме генератора и двигателя

Контрольное задание:

1. При исследовании генератора постоянного тока независимого возбуждения (рис. 7) снимались характеристика холостого хода (см. рис. 7, б) и семейство внешних характеристик (см. рис. 7, в) с помощью трех приборов: амперметра в цепи возбуждения, амперметра и вольтметра в цепи якоря. Как по заданным преподавателем конкретным цифрам, соответствующим показаниям двух приборов, определить два других параметра из четырех: показание третьего прибора, напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, сопротивление обмотки якоря (табл. 4).

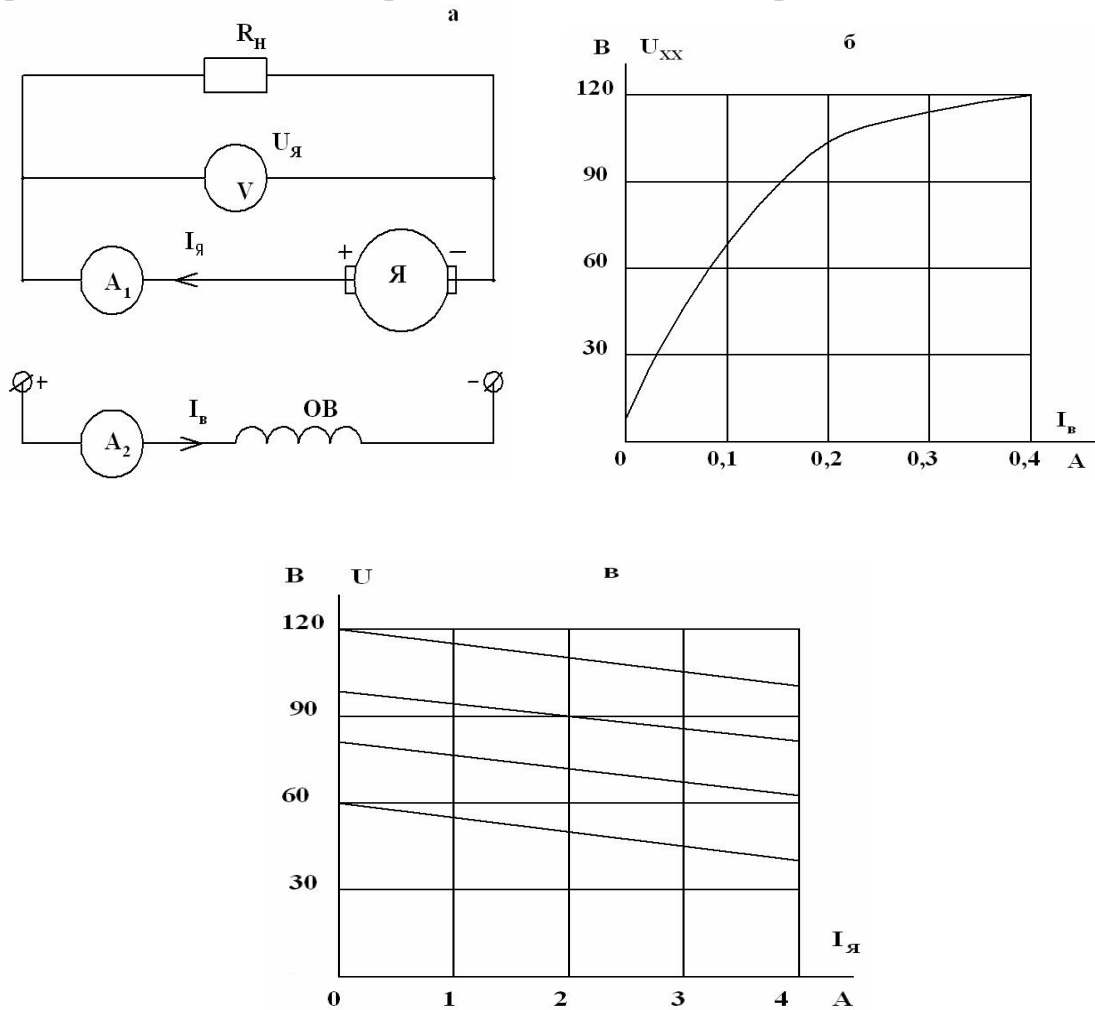


Рис. 7. Генератор постоянного тока: а – схема включения; б – характеристика холостого хода; в – семейство внешних характеристик

Таблица 4

Таблица вариантов

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
U_{xx} (В)	x	x		x			x	x		x			x	x			x	x
$I_{кз}$ (А)	x		x		x		x		x		x		x		x		x	
$r_{я}$ (Ом)		x	x			x		x	x			x		x	x	x		x
I_{ϵ} (А)				x	x	x	0,25					0,3						
$I_{я}$ (А)	1									x	x	x	4					
U (В)	100					80								x	x	x		

2. Электродвигатель постоянного тока независимого возбуждения, включенный в сеть с напряжением U , вращается со скоростью n под нагрузкой с моментом сопротивления M_c . В рабочем режиме двигатель характеризуется следующими параметрами: током в цепи возбуждения I_{ϵ} , сопротивлением в цепи якоря $r_{я}$, током и ЭДС обмотки якоря $I_{я}$ и $E_{я}$ и электромагнитным вращающим моментом $M_{эм}$. Определить, как изменятся в установившемся режиме два из четырех параметров (n , $I_{я}$, $E_{я}$, $M_{эм}$), если изменить один из независимых параметров (U , $r_{я}$, I_{ϵ} , M_c) (табл. 5).

Таблица 5

Таблица вариантов

Определяемые параметры	Изменяемый независимый параметр							
	увеличить				уменьшить			
	U	$r_{я}$	I_{ϵ}	M_c	U	$r_{я}$	I_{ϵ}	M_c
$n, I_{я}$	1	2	3	4	17	18	19	20
$E_{я}, M_{эм}$	5	6	7	8	21	22	23	24
$E_{я}, I_{я}$	9	10	11	12	25	26	27	28
$n, M_{эм}$	13	14	15	16	29	30	31	32

Лабораторная работа № 7

Маркировка обмоток статора асинхронного двигателя и пуск его в ход с помощью магнитного пускателя

Контрольное задание

Для включения однофазного асинхронного электродвигателя, потребляющего ток порядка 20 А, начинающий электрик собрал схему магнитного пускателя.

Какие ошибки допущены в принципиальной схеме и какие последствия они вызовут?

Объяснить электрическое состояние схемы в трех случаях: а) в исходном состоянии; б) при нажатии кнопки «Пуск»; в) при нажатии кнопки «Стоп». Во всех случаях определить те элементы электрических аппаратов, которые будут перегружены по току.

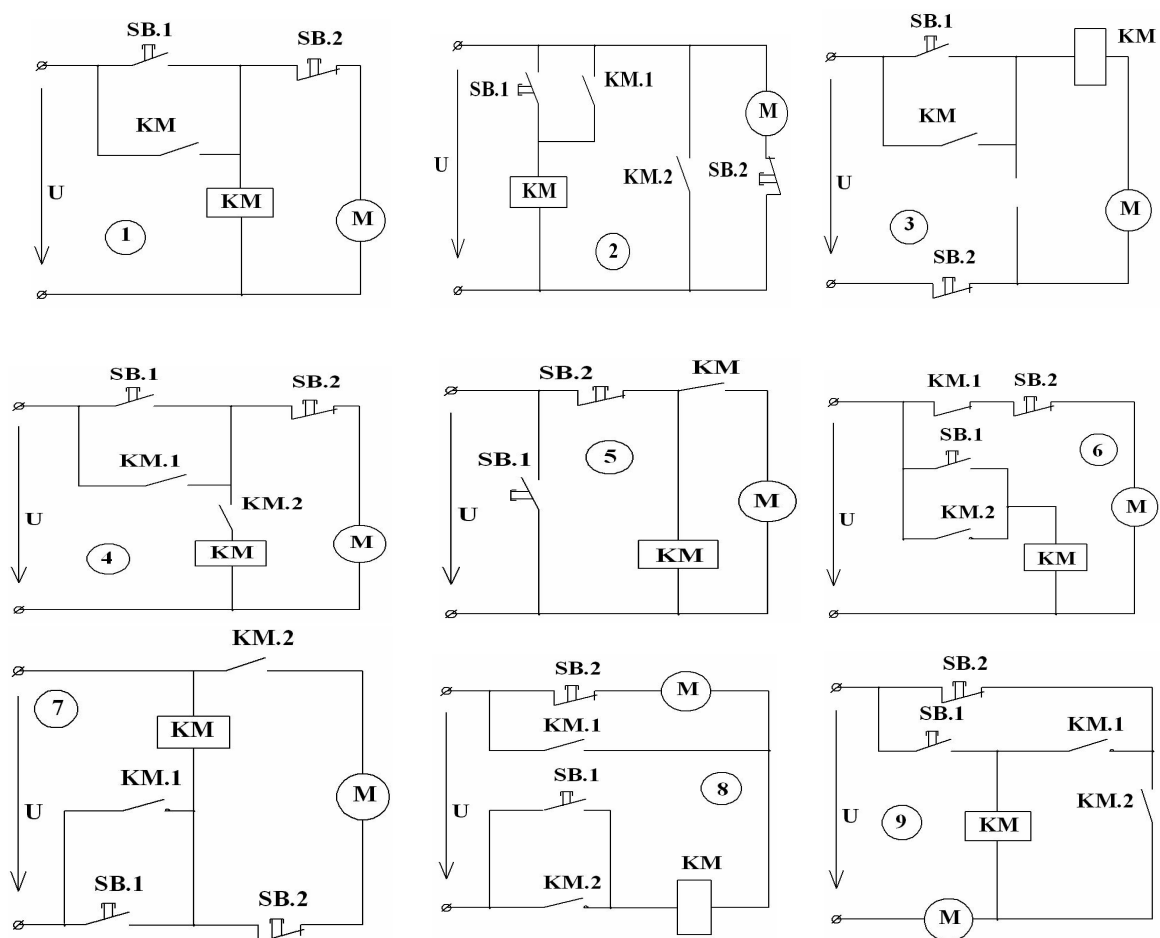


Рис. 8. Схемы для выполнения задания (см. также с. 215)

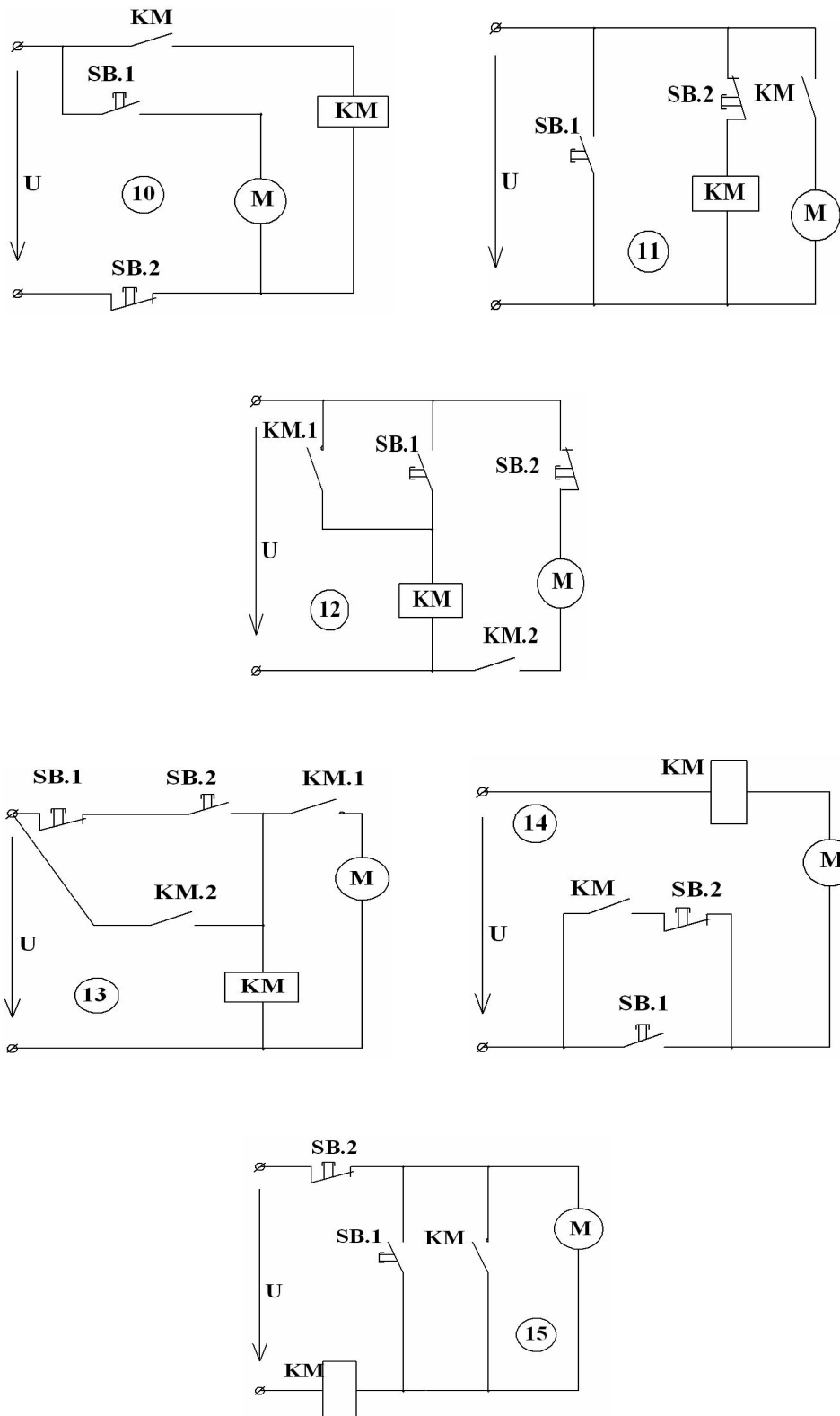


Рис. 8. Окончание

Лабораторная работа № 8

Автоматическое управление асинхронным двигателем в функции пути и времени

Контрольное задание

Реверсивный асинхронный двигатель при работе перемещает рабочий орган (РО) станка вправо, если включен контактор КМ1, и влево, если включен контактор КМ2 (рис. 9).

На пути движения РО установлены путевые переключатели SQ1 и SQ2, контакты которых вместе с другой коммутационной аппаратурой управляют работой асинхронного двигателя (рис. 10).

Время перемещения РО на расстояние между путевыми переключателями равно 20 с. Реле времени имеют выдержку 5 с. В начальном положении РО установлен посередине между SQ1 и SQ2. В соответствии с вариантом показать на временной диаграмме время срабатывания контакторов, реле времени, путевых переключателей и асинхронного двигателя. Объяснить работу электропривода (см. пример выполнения задания).

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАНИЯ

Пусть требуется нарисовать временную диаграмму срабатывания аппаратуры для схемы, изображенной на рис. 10.

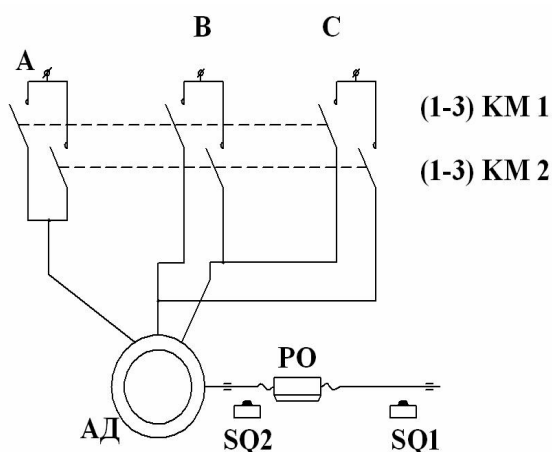


Рис. 9. Электрическая и кинематическая схемы силовой части электропривода

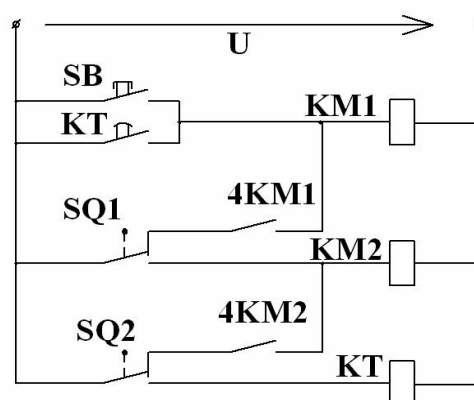


Рис. 10. Схема управления движением рабочего органа станка

Схеме управления (см. рис. 10) будет соответствовать временная диаграмма, изображенная на рис. 11.

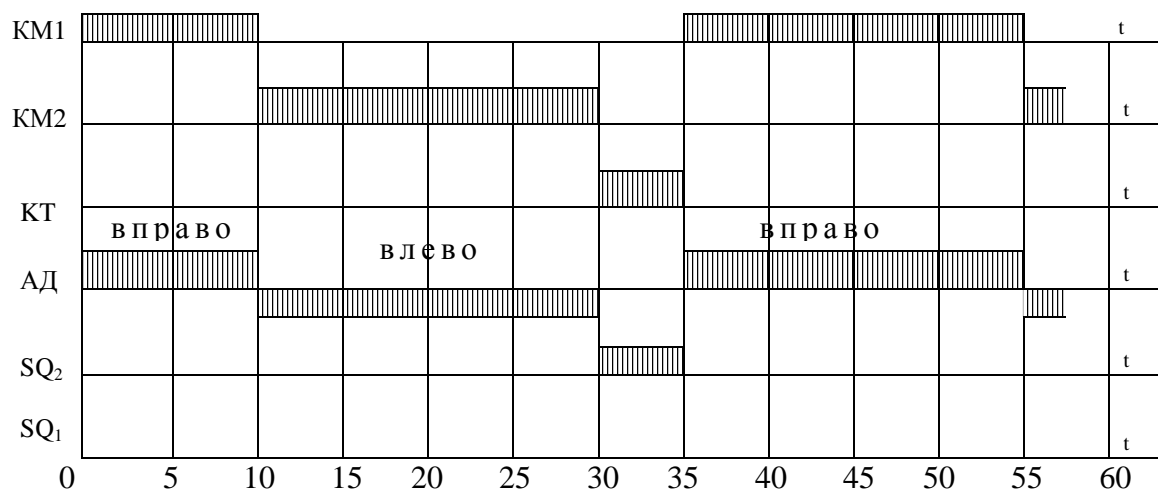


Рис. 11. Временная диаграмма срабатывания аппаратуры управления.

Действительно, при нажатии на кнопку SB «Пуск» получает питание катушка контактора KM1. После срабатывания контактора замыкаются три контакта (1 – 3) KM1 в силовой цепи и рабочий орган будет перемещаться вправо. Контакт 4KM1 включает катушку на самопитание. В результате этого кнопку SB можно отпустить, так как катушка KM1 будет питаться через замыкающий контакт SQ1 и замкнувшийся контакт 4KM1.

Когда рабочий орган подойдет к месту расположения путевого переключателя SQ1 (через 10 с), срабатывает SQ1, разрывая цепь питания KM 1 и включая обмотку контактора KM2. При этом включаются контакты (1 – 3) KM1 и выключаются контакты (1 – 3) KM2. Двигатель реверсируется, и рабочий орган будет перемещаться влево. Контакт 4KM2 включает свою обмотку на самопитание, благодаря чему она будет запитана даже после того, как переключатель SQ1 займет исходное положение. Но контактор KM 1 повторно не включится, так как его контакт 4KM1 будет разомкнут.

При достижении РО путевого переключателя SQ2 его контакты отключают обмотку KM2 и включают обмотку реле времени KT. Двигатель останавливается, но через 5 с замыкается контакт KT, который шунтирует кнопку SB «Пуск». При этом включается контактор KM1, двигатель отрабатывает движение рабочего органа вправо, и работа схемы повторяется.

В различных заданных схемах движение рабочего органа не обязательно должно носить циклический характер. Чаще всего схема предусматривает автоматическую остановку двигателя после того, как он отработает заданную программу.

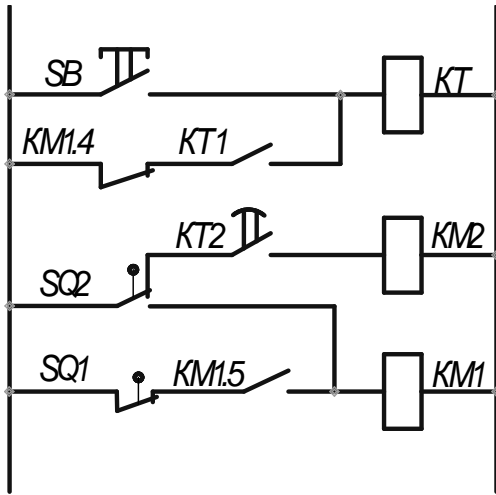


Схема 1

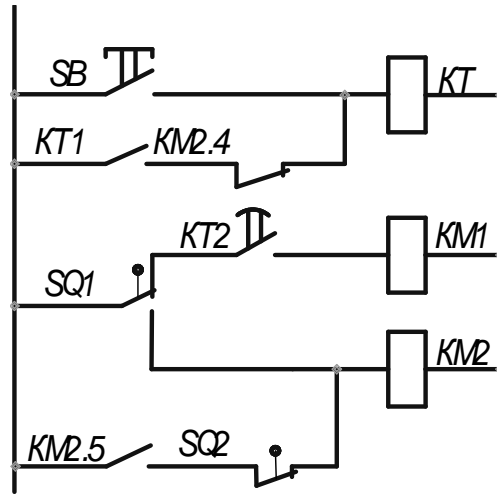


Схема 2

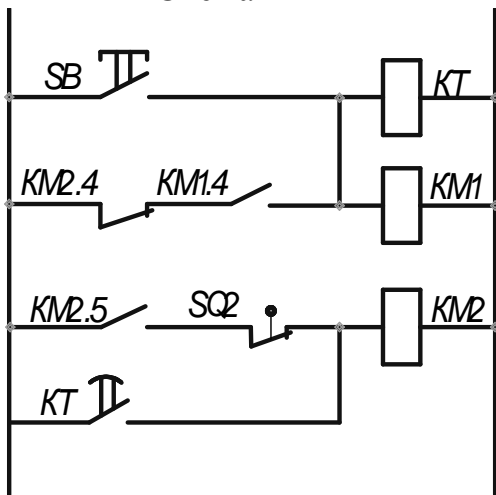


Схема 3

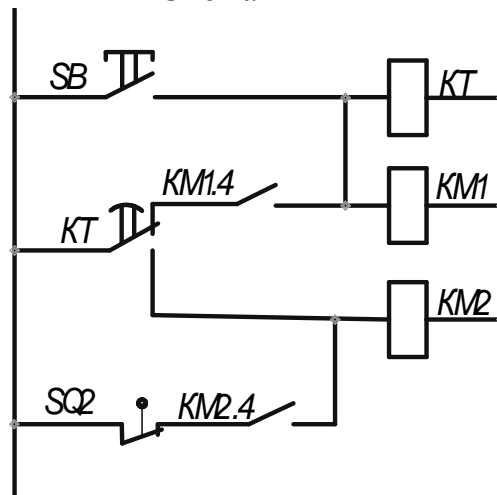


Схема 4

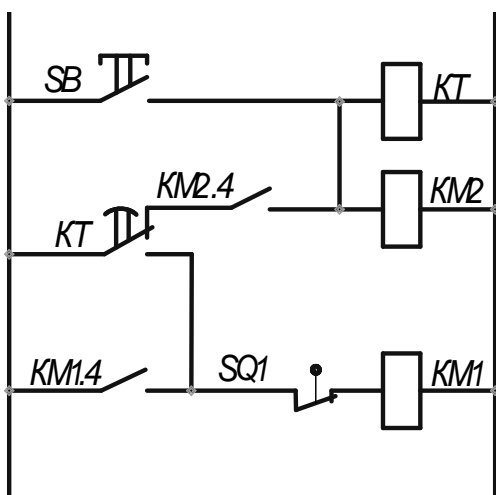


Схема 5

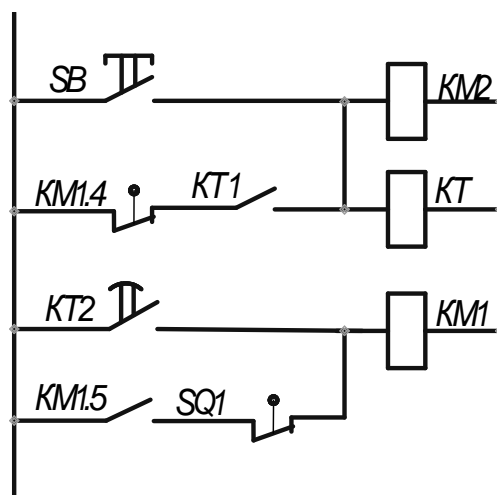


Схема 6

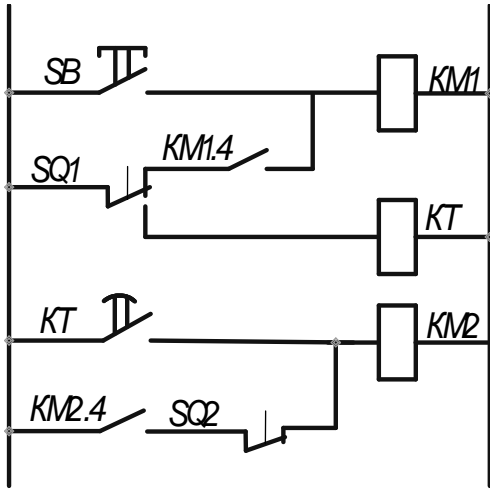


Схема 7

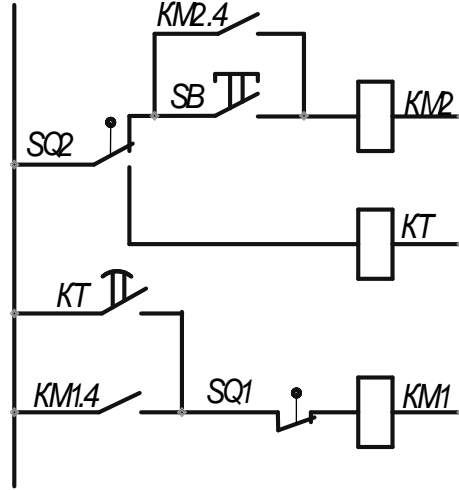


Схема 8

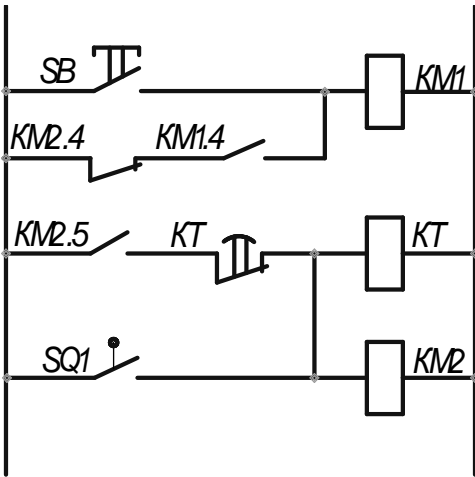


Схема 9

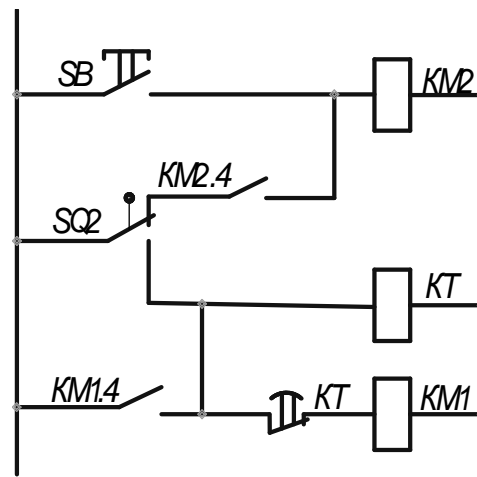


Схема 10

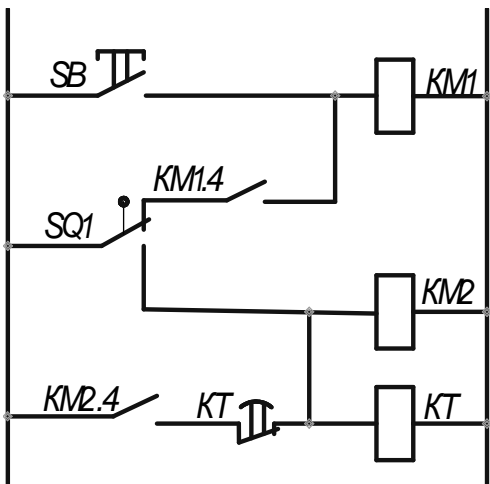


Схема 11

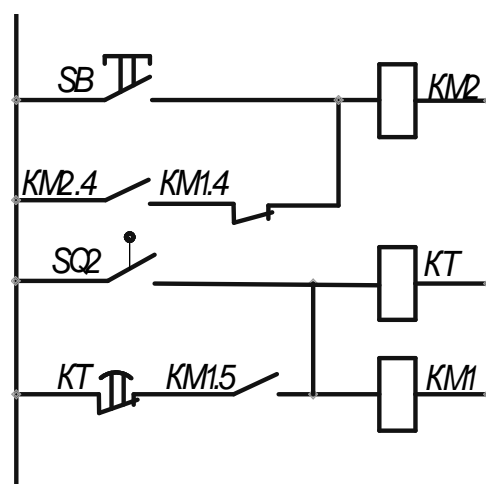


Схема 12

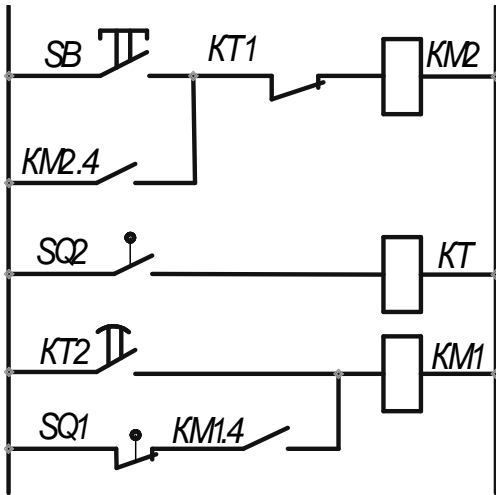


Схема 13

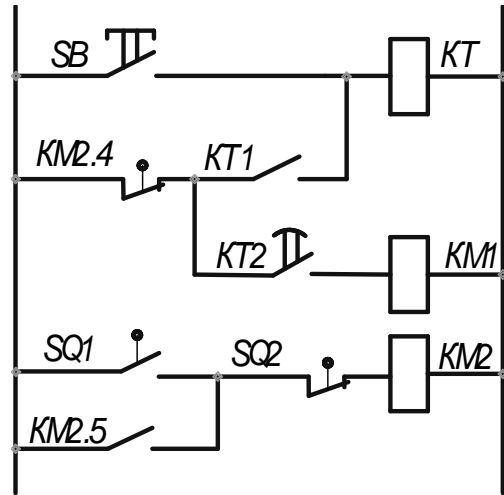


Схема 14

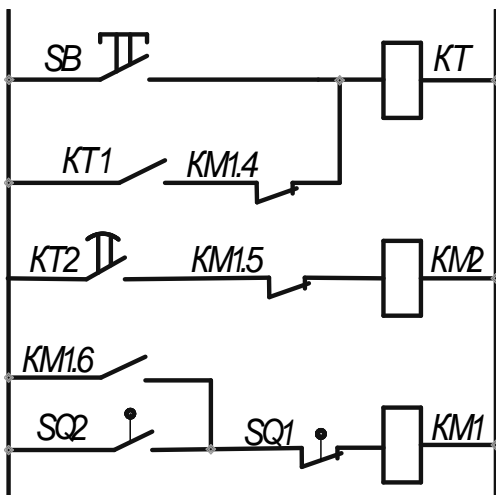


Схема 15

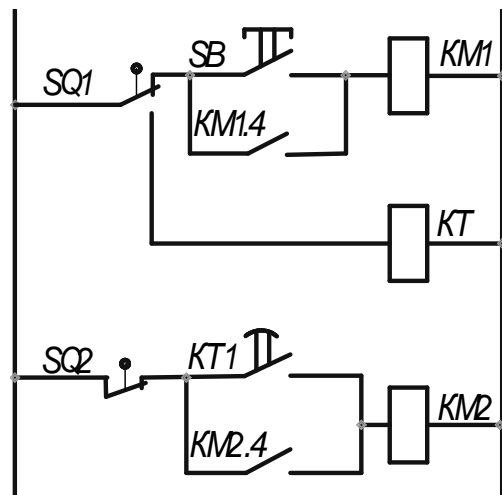


Схема 16

ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

Задача № 1

Нарисовать картину магнитного поля, создаваемую трехфазной системой токов (на рис. 1 показан один виток каждой фазы), в момент времени $t = 2N$ (мс), где N – номер варианта.

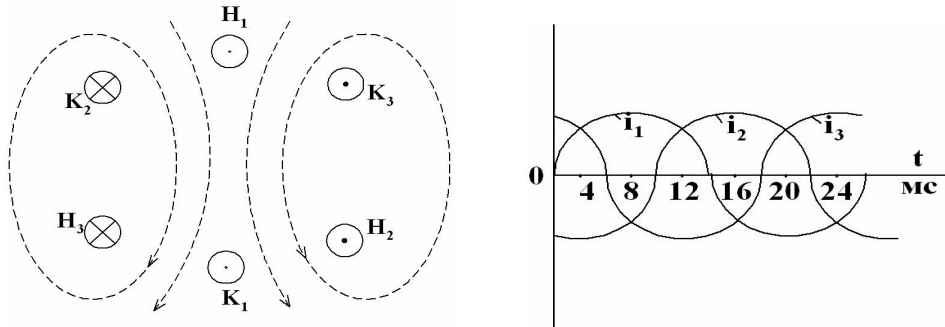


Рис. 1

Указание. Считать, что положительный ток входит в начало обмотки и обозначить его крестиком. На рис. 1 показаны направления токов и картина магнитного поля для начального момента времени $t = 0$.

Задача № 2

Три одинаковых ферромагнитных бруска, среди которых один является постоянным магнитом, могут вращаться вокруг оси, проходящей через их центры. Длина брусков l , а оси вращения отстоят друг от друга на расстояние l , так что при своем вращении они едва касаются (рис. 2).

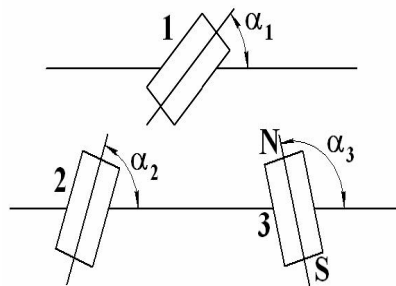


Рис. 2

Вначале все бруски установили в положение, соответствующее заданным углам α_1 , α_2 и α_3 , а затем освободили, предоставив возможность свободно вращаться.

Нарисовать первоначальное положение брусков в соответствии с заданием и конечное, установившееся положение. Варианты заданы в табл. 1.

$$\alpha_2 = \alpha_1 + 30^\circ; \quad \alpha_3 = \alpha_1 + 60^\circ.$$

Таблица 1

Таблица вариантов

Постоянный магнит	α_1					
	0	30	60	90	120	150
1-й брус	1	2	3	4	5	6
2-й брус	7	8	9	10	11	12
3-й брус	13	14	15	16	17	18

Примечание. Условия, соответствующие данному варианту, необходимо определять по направлениям влево и вверх от номера варианта. Например, для варианта 9 постоянным магнитом является второй брус (влево от номера варианта), угол $\alpha_1 = 60^\circ$. Тогда $\alpha_2 = \alpha_1 + 30^\circ = 60^\circ + 30^\circ = 90^\circ$, $\alpha_3 = 120^\circ$.

Задача № 3

Определить магнитодвижущую силу (ампервитки) катушки, необходимую для создания подъемной силы F электромагнита при наличии воздушного зазора δ (рис. 3, табл. 2).

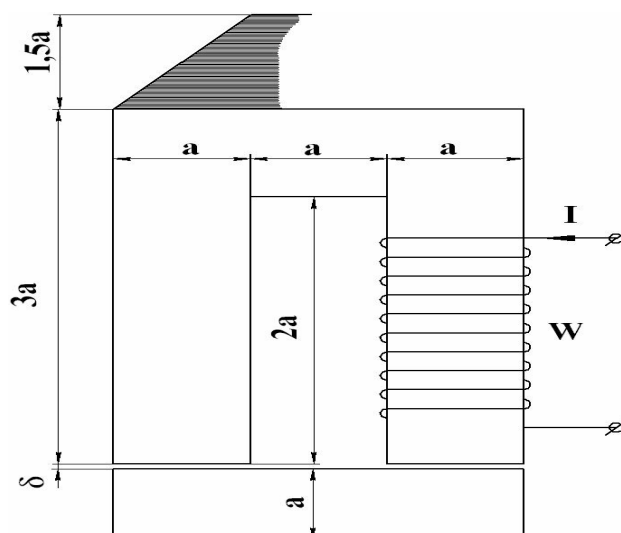


Рис. 3

Определить электромагнитную силу F' взаимодействия якоря и сердечника в притянутом положении якоря, если мдс катушки осталась прежней. Кривые намагничивания стали взять из [5, прил. 3.1].

Таблица 2

Таблица вариантов

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
F (кГ)	2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4
δ (мм)	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2
a (мм)	10	8	12	10	12	8	10	16	14	10	12	8	10	12	14
Материал магнитопровода	Э 42	Э 310	Э 12	Э 31	Э 42	Э 310	Э 12	Э 31	Э 42	Э 310	Э 12	Э 31	Э 42	Э 310	Э 12

Окончание табл. 2

Вариант	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
F (кГ)	2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4	2	2,5	3	3,5	4
δ (мм)	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2	1	1,5	2
a (мм)	12	10	12	14	16	16	12	14	8	14	10	14	16	10	12
Материал магнитопровода	Э 31	Э 42	Э 310	Э 12	Э 31	Э 42	Э 310	Э 12	Э 31	Э 42	Э 310	Э 12	Э 31	Э 42	Э 310

Задача № 4

Как изменится ток в цепи, напряжения на резисторах и потенциалы точек, если изменится одно из сопротивлений (рис. 4)? В соответствии с вариантом (табл. 3) нарисовать заземленную точку и обозначить переменное сопротивление.

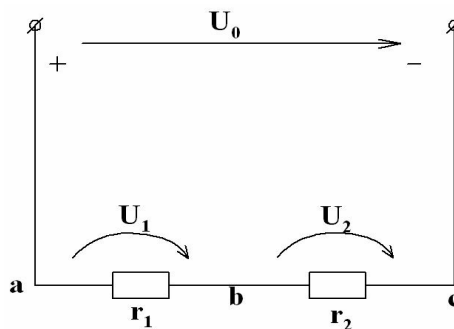


Рис. 4

Таблица 3

Таблица вариантов

Заземленная точка	a	b	c
Увеличивается r_1	1, 13	2, 14	3, 15
Увеличивается r_2	4, 16	5, 17	6, 18
Увеличивается r_1	7, 19	8, 20	9, 21
Увеличивается r_2	10, 22	11, 23	12, 24

Указание. Для вариантов 13 – 24 изменить полярность источника питания.

Результаты анализа свести в таблицу (табл. 4).

Таблица 4

Результаты анализа

Величина	I	U_1	U_2	Φ_a	Φ_b	Φ_c
Изменение величины						

Задача № 5

Три резистора сопротивлением по 1 кОм включены последовательно на напряжение источника $U_0 = 12$ В (рис. 5).

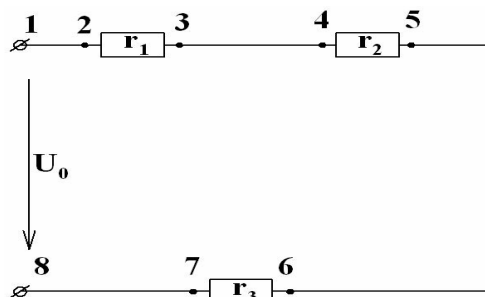


Рис. 5

Определить:

1. Что покажет вольтметр, подключенный к указанным в табл. 5 клеммам?

2. Что покажет этот вольтметр, если:

а) сгорел указанный в таблице резистор;

б) закорочен этот резистор.

3. На каком участке произошел обрыв цепи, если заданный вольтметр показал: а) 12 В; б) 0?

4. Что покажет амперметр (п.п. 1, 2а и 2б), который ошибочно включен вместо вольтметра?

Показания приборов во всех случаях внести в табл. 6.

Таблица 5

Таблица вариантов

Вольтметр (амперметр) подключен к клеммам		1-3	3-5	6-8	1-5	3-7	2-7	4-8	2-6
Сгорел (закорочен) резистор	r_1	1	2	3	4	5	6	7	8
	r_2	9	10	11	12	13	14	15	16
	r_3	17	18	19	20	21	22	23	24

Таблица 6

Расчетная таблица

Вопрос	1	2а	2б	Обрыв на участке
Показание вольтметра (В)				если $U = 12$ В –
Показание амперметра (мА)				если $U = 0$ –

Задача № 6

Вольтметр с нулем посередине включен в цепь постоянного тока напряжением $U_0 = 12$ В полярностью, указанной на рис. 6.

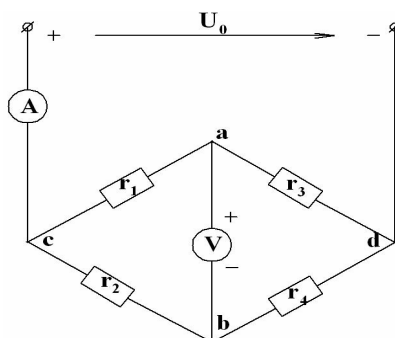


Рис. 6

Определить величину и знак напряжения U_{ab} и показание амперметра в исходной схеме и схеме, в которой сопротивление одного из резисторов равно нулю, а также в схеме, в которой сопротивление этого резистора равно бесконечности (табл. 7).

Данные расчета внести в табл. 8

Таблица 7

Таблица вариантов

Сопротивление резисторов (кОм)	Переменный резистор			
	r_1	r_2	r_3	r_4
$r_1 = 1, r_2 = 2, r_3 = 2, r_4 = 4$	1	2	3	4
$r_1 = 2, r_2 = 2, r_3 = 4, r_4 = 1$	5	6	7	8
$r_1 = 3, r_2 = 4, r_3 = 3, r_4 = 2$	9	10	11	12
$r_1 = 4, r_2 = 2, r_3 = 2, r_4 = 1$	13	14	15	16
$r_1 = 1, r_2 = 4, r_3 = 3, r_4 = 2$	17	18	19	20
$r_1 = 2, r_2 = 3, r_3 = 2, r_4 = 3$	21	22	23	24

Таблица 8

Расчетная таблица

Величина	U_{ab} (В)	I (мА)
Исходная схема		
Сопротивление резистора $r_x = 0$		
Сопротивление резистора $r_x = \infty$		

Задача № 7

В соответствии с номером варианта (табл. 9) определить показания указанных в таблице приборов при различных положениях тумблеров SA1

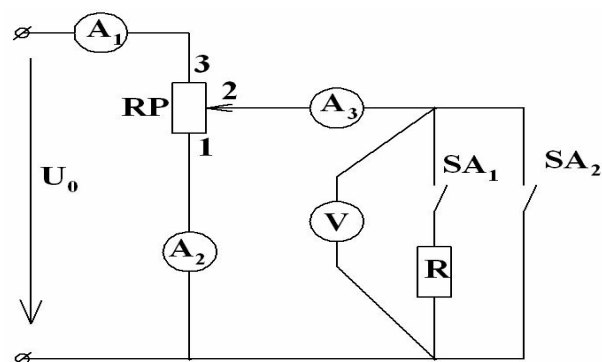


Рис. 7

и SA2 и движка потенциометра RP. Положение движка потенциометра:

- 1) крайнее нижнее;
- 2) в середине потенциометра;
- 3) крайнее верхнее (рис. 7).

Сопротивление потенциометра в 2 раза больше сопротивления нагрузки R . Напряжение источника питания $U_0 = 36$ В.

Таблица вариантов

Положение переключателей	Положение движка потенциометра								
	1			2			3		
SA1 и SA2 разомкн.	1	4	7	10	13	16	19	22	25
SA1 замкн., SA2 разомкн.	2	5	8	11	14	17	20	23	26
SA1 разомкн., SA2 замкн.	3	6	9	12	15	18	21	24	27
Приборы	A1	A2	A3	A1	A2	A3	A1	A2	A3

Примечание. Условия, соответствующие данному варианту, следует искать по направлениям вверх, влево и вниз от номера варианта. Например, в варианте 18 движок потенциометра должен находиться в среднем положении (цифра 2 сверху), тумблер SA1 разомкнут, а SA2 замкнут. Для этой схемы необходимо определить показание вольтметра и амперметра A3 (направление вниз).

Задача № 8

Определить показание заданного вольтметра в трех случаях:

- в исходной, изображенной на рис. 8, схеме;
- в этой схеме, если сгорел указанный резистор;
- в этой схеме, если закорочен этот резистор (табл. 10).

Таблица 10

Таблица вариантов

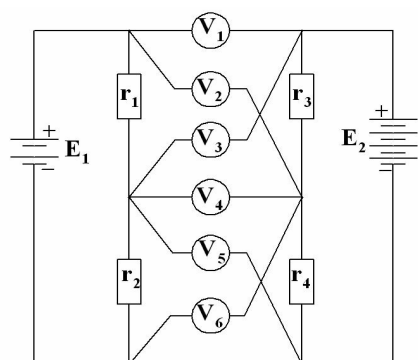


Рис. 8

Переменный резистор	Заданный вольтметр					
	V1	V2	V3	V4	V5	V6
r_1	1	2	3	4	5	6
r_2	7	8	9	10	11	12
r_3	13	14	15	16	17	18
r_4	19	20	21	22	23	24

$$E_1 = 6 \text{ В}, \quad E_2 = 8 \text{ В}, \quad r_1 = r_2 = r_3 = r_4.$$

Задача № 9

Определить потенциалы всех точек схемы относительно заземленной, потенциал которой принят равным нулю, и показания вольтметров PV1 и PV2, если $r_1 = r_4 = r$, $r_2 = r_3 = 2r$ и $U = 6N$ В, где N – номер варианта (рис. 9).

Как изменятся потенциалы всех точек и показания вольтметров, если сопротивление одного из резисторов (указан в табл. 11) принимает два крайних значения – ∞ и 0 .

Данные расчета внести в табл. 12.

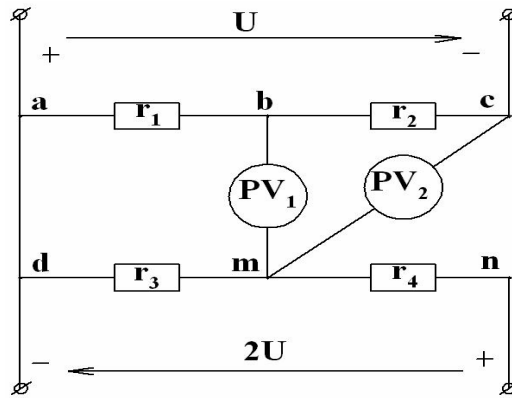


Рис. 9

Таблица 11

Таблица вариантов

Заземленная точка		a	b	c	d	m	n
Переменный резистор	r_1	1	5	9	13	17	21
	r_2	2	6	10	14	18	22
	r_3	3	7	11	15	19	23
	r_4	4	8	12	16	20	24

Таблица 12

Расчетная таблица

Схема	Потенциалы точек и показания вольтметров							
	a	b	c	d	m	n	PV1	PV2
Исходная								
$r_x = \infty$								
$r_x = 0$								

Указание. Для определения потенциалов всех точек схемы необходимо определить величину и направление напряжений на всех резисторах. Положительное направление напряжения совпадает с направлением тока. Ток течет от точки большего потенциала к точке, потенциал которой ниже первой на величину падения напряжения между этими точками. Следовательно, зная потенциал одной из точек схемы, определяют потенциал соседней точки, и таким образом вычисляют потенциалы всех точек схемы.

Задача № 10

Выбрать стандартное сечение двухжильного кабеля с бумажной изоляцией с медными (для нечетных вариантов) или алюминиевыми (для четных) жилами для питания электродвигателя мощностью $P = N$ кВт и номинальным напряжением $U = 220$ В, отстоящим от генератора на расстояние $l = (250 - 10N)$ м. При этом необходимо выполнить два условия: кабель не должен перегреваться и падение напряжения в линии не должно превышать 5 % напряжения на нагрузке. Допустимые токовые нагрузки кабеля из условия его нагрева даны в табл. 13. Верхний ряд относится к медным жилам, нижний – к алюминиевым.

В задаче N – номер варианта.

Таблица 13

Расчетные данные к задаче

Сечение жилы (мм ²)	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50	70	95
Допускаемые токовые нагрузки кабеля (А)	19	27	38	50	70	90	115	140	175	215	260
	–	21	29	38	55	70	90	105	135	165	200

Задача № 11

Схема последовательного соединения нелинейного элемента (транзистора VT) и нагрузочного сопротивления R_k подключена к источнику с ЭДС E_k . При этом в цепи устанавливается ток I_k , который вызывает падение напряжения на нагрузке U_n и на транзисторе U_k . Вольтамперная характеристика транзисторов изменяется в зависимости от тока базы I_b , создаваемого входным напряжением.

Определить все величины, приведенные в табл. 14, по заданным. Использовать метод пересечения характеристик. Выходные характеристики транзисторов приведены в [5, рис. 14.7, б и 14.8, б]. Для нечетных вариантов – транзистор П101, для четных – П13.

Таблица вариантов

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
E_K (В)	10			10			11	12,5		10	12	12,5			10
R_K (кОм)	0,8	4			0,9	3,3							1		1,1
I_K (мА)		1,4	5	1			6		7		8		5	1,6	6
U_K (В)		5	5		6		7	7				6		5	
U_H (В)				7	5	6			7,5	5				6	
I_0 (мкА)	150		300			30		30	450	40	150		300		

Окончание табл. 14

Вариант	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
E_K (В)	12,5					11			10	12		12,5	10	12	
R_K (кОм)	3	0,8		0,9			3,3	1						1,1	3,9
I_K (мА)		7		8	2	5			1,2		1,8		1,5		2
U_K (В)		5	7		6		5		5	6				7	
U_H (В)	7		5	6		5	6	5			7	7			
I_0 (мкА)			50		60			450		150	20	300	40		60

Задача № 12

Для получения стабилизированного напряжения $U_n = 24$ В на нагрузке $r_n = (4 + N)$ кОм, где N – номер варианта, параллельно подключен стабилитрон VD, вольтамперная характеристика которого показана на рис. 10.

Определить величину и мощность балластного сопротивления r_6 , необходимого для того, чтобы погасить часть напряжения источника питания $U = (30 + N)$ В. Рабочую точку выбрать на середине участка стабилизации.

Определить:

1. В каких пределах изменения напряжения источника питания схема позволяет получить стабилизированное напряжение при выбранном балластном сопротивлении.

2. Диапазон токовой нагрузки, в пределах которого имеет место стабилизация напряжения.

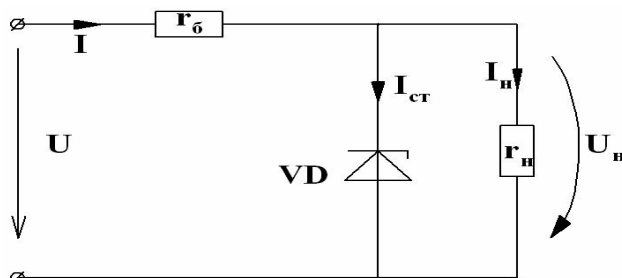


Рис. 10

Задача № 13

Записать в аналитической форме синусоиды двух заданных величин относительно третьей и нарисовать их волновые (временные) диаграммы.

Действующие значения $U = 100$ В, $I = 10$ А, $f = 50$ Гц. Начальную фазу синусоиды, относительно которой определяются фазы двух других синусоид, взять равной нулю (рис. 11, табл. 15).

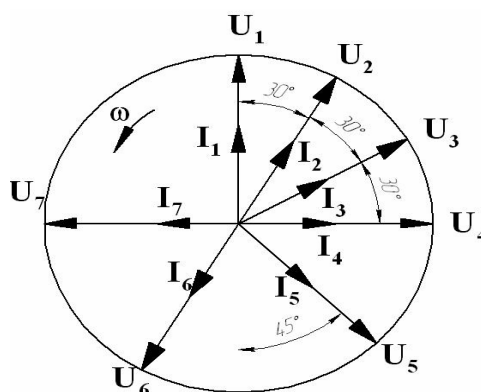


Рис. 11

Таблица вариантов

	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7
I_1		1	2	3	4	5	6
I_2	7		8	9	10	11	12
I_3	13			14	15	16	17
I_4	18	19			20	21	22
I_5	23		24	25		26	
относительно	U_3	U_4	I_6	U_5	U_7	I_7	U_1

Примечание. Конкретные условия, соответствующие данному варианту, необходимо выбрать по направлениям вверх, влево и вниз от номера варианта.

Задача № 14

Построить векторную диаграмму токов во всех ветвях и напряжений на всех элементах в произвольном масштабе (рис. 12). Данные варианта взять из табл. 16. Например, для варианта 16 z_1 представляет собой индуктивность L (верхнее направление от номера варианта), z_2 – емкость C (направление влево) и z_3 – индуктивность L (направление вниз).

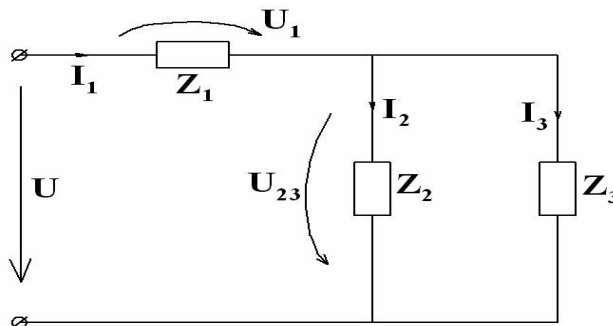


Рис. 12

Таблица 16

Таблица вариантов

z_1		r			L			C		
z_2	r	1	2		3	4		5	6	
	L	7	8	9		10	11		12	
	C	13	14	15	16		17	18		
z_3	r	L	C	r	L	C	r	L	C	

Указание. При построении векторной диаграммы в качестве первого исходного вектора взять или напряжение U_{23} , или ток I_2 , или ток I_3 , направив их произвольно, например, вертикально вверх.

Задача № 15

Трехфазная сеть напряжением U_c питает две нагрузки: электрическую печь мощностью $P_1 = 0,2(N + 15)$ кВт и фазным напряжением $U_{1\phi}$ и электродвигатель мощностью $P_2 = P_1$, напряжением U_2 с коэффициентом мощности $\cos \varphi_2 = 0,8$ (табл. 17).

Кроме того, к сети подключается батарея конденсаторов для повышения коэффициента мощности с рабочим напряжением U_3 .

Требуется:

1. Составить и нарисовать развернутую схему соединения обеих нагрузок и конденсаторов и обозначить на ней все фазные и линейные токи. При этом схемы включения нагрузок выбираются в соответствии с их номинальными напряжениями, а схема соединения конденсаторов, кроме того, должна отвечать требованию минимальной емкости батареи.

2. Определить емкость батареи конденсаторов для повышения коэффициента мощности всей установки до 1.

3. Определить фазные и линейные токи обеих нагрузок и батареи конденсаторов, а общий линейный ток определить графически с помощью векторной диаграммы, на которой показать все фазные и линейные токи и напряжения.

Таблица 17

Таблица вариантов

Напряжение сети (В)	127		220		380		
Фазное напряжение нагрузки (печи) $U_{1\phi}$ (В)	127	1	2	3	4	–	–
	220	–	–	5	6	7	8
	380	–	–	–	–	9	10
Рабочее напряжение конденсатора U_3 (В)	160	300		400		600	
Номинальное напряжение электродвигателя	127/220		220/380		380/660		

Примечание. Выбор числовых значений, соответствующих данному варианту, производится по горизонтальным и вертикальным направлениям от номера варианта.

Задача № 16

На базе измерительной головки прибора магнитоэлектрической системы, имеющей сопротивление $500 - 20N$ Ом, где N – номер варианта, и ток полного отклонения $50 N$ мкА, составить принципиальную схему ампервольтметра для измерения двух значений тока в цепи ($0,1N$ и $0,2N$ А) и трех значений напряжения ($5N$, $10N$ и $20N$ В). Определить величины сопротивлений шунтов и добавочных резисторов и их мощности.

Указание. При составлении схемы учесть, что шунт имеет 4 зажима: два силовых токовых и два измерительных, потенциальных.

Задача № 17

Подобрать измерительные трансформаторы тока ТА и напряжения TV для ваттметра, рассчитанного на ток I_n и напряжение U_n со шкалой на α_n делений, если нагрузкой является электрическая печь мощностью N кВт, где N – номер варианта (табл. 18). Номинальное напряжение печи $U = 220$ В.

Определить цену деления ваттметра без и с измерительными трансформаторами и показание его в делениях.

Трансформатор тока выбрать из ряда номинальных значений первичного тока: 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 80, 100, 150, 200, 300, 500, 800, 1000 А. Вторичная обмотка ТА рассчитана на 5 А.

Напряжение первичной обмотки трансформатора напряжения выбрать из условия $U_1 = 100 K$, где K – целое число. Напряжение вторичной обмотки – 100 В.

Нарисовать схему питания нагрузки со всеми использованными аппаратами и приборами.

Таблица 18

Таблица вариантов

Номинальное напряжение ваттметра U_n (В)	Число делений шкалы ваттметра α_n							
	50		100		150		200	
50	1	2	3	4	5	6	7	8
75	9	10	11	12	13	14	15	16
100	17	18	19	20	21	22	23	24
Номинальный ток ваттметра I_n (А)	1	2	1	2	1	2	1	2

Указание. Данные для варианта выбирают по вертикальному и горизонтальному направлениям от номера варианта. Например, в 10-м варианте $U_n = 75$ В, $\alpha_n = 50$ делений, $I_n = 2$ А.

Контрольные вопросы:

1. Какой ток (числовое значение) будет протекать через токовую обмотку ваттметра?
2. Какие последствия вызовет выбор трансформатора тока с номинальным значением первичного тока на одну ступень ниже расчетного:
 - 1) для работы трансформатора тока;
 - 2) для работы ваттметра;
 - 3) для работы нагрузки.
3. Изменится ли угол отклонения стрелки ваттметра?
4. Изменится ли мощность, потребляемая нагрузкой?

Задача № 18

Нарисовать схему подключения ваттметра и определить его показание (кВт), если он включен в четырехпроводную трехфазную сеть напряжением 0,4 кВ. Нагрузка в фазах чисто активная и равна: $I_A = 10$ А, $I_B = 20$ А, $I_C = 30$ А. «Звездочкой» показать начало обмоток. Начало токовой обмотки подсоединить к генераторному зажиму, а начало обмотки напряжения – к точке, указанной в заданном напряжении первой (табл. 19). Решение пояснить векторной диаграммой.

Указание. Показание ваттметра равно произведению силы тока в токовой обмотке на напряжение между точками, к которым подключена обмотка напряжения и на косинус угла сдвига фаз между этими величинами. Если мощность получилась со знаком «минус», то стрелка прибора будет отклоняться против часовой стрелки.

Таблица 19

Таблица вариантов

Токовая обмотка включена в фазу	Обмотка напряжения подключена к клеммам								
	AN	BN	CN	AB	BC	CA	BA	CB	AC
А	1	2	3	4	5	6	7	8	9
В	10	11	12	13	14	15	16	17	18
С	19	20	21	22	23	24	25	26	27

Задача № 19

Вторичная обмотка однофазного трансформатора включена на активную нагрузку $r_H = \text{const}$. Как изменятся показания приборов, включенных в первичную и вторичную цепи, а также магнитный поток Φ , индукция B и напряженность магнитного поля H в стали трансформатора, ток холостого хода I_{10} , если изменить величину одного из параметров, указанных в табл. 20? Здесь U_1 и f – напряжение и частота тока сети, S – сечение магнитопровода, δ – расчетная длина воздушного зазора в магнитопроводе трансформатора.

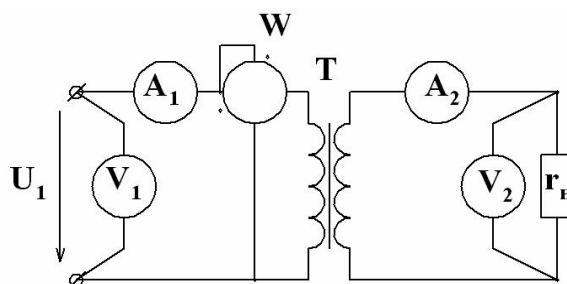


Рис. 13

Таблица вариантов

Параметр \ Хар-р изменения	U_1	f	W_1	W_2	S	δ_0
	В	Гц	–	–	мм ²	мм
Увеличивается	1	2	3	4	5	6
Уменьшается	7	8	9	10	11	12

Результаты анализа внести в табл. 21 и аргументировать ответы письменно с помощью формул и зависимостей.

Таблица 21

Расчетная таблица

Анализируемые параметры	Φ	В	Н	I_{10}	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2
	Вδ	Т	А/м	А	В	А	Вт	В	А

При анализе считать, что изменение тока холостого хода практически не влияет на изменение тока в первичной цепи при заданной нагрузке.

Задача № 20

Генератор постоянного тока независимого возбуждения, характеристика холостого хода которого задана аналитически $E_y = 20 + 400 \cdot I_1$, приводится во вращение асинхронным двигателем с постоянной угловой скоростью ω . Напряжение и ток обмотки возбуждения, нагрузка генератора и напряжение на его зажимах контролируются приборами V_1 , A_1 , A_2 и V_2 (рис. 14).

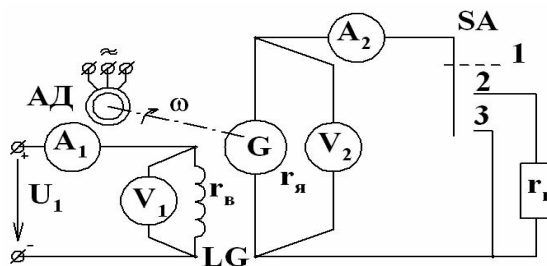


Рис. 14

С помощью переключателя SA можно установить три режима работы генератора. По заданным величинам (табл. 22) определить неизвестные и заполнить таблицу. Здесь P – мощность, развиваемая генератором.

Построить в масштабе внешнюю характеристику генератора по трем точкам, соответствующим режимам работы генератора.

Таблица вариантов

№ вар.	Цель LG		1-е полож. SA			2-е полож. SA			3-е полож. SA			Сопротивления		
	U_1 (В)	I_1 (А)	U_2 (В)	I_2 (А)	P (Вт)	U_2 (В)	I_2 (А)	P (Вт)	U_2 (В)	I_2 (А)	P (Вт)	$r_{\text{н}}$ (Ом)	$r_{\text{я}}$ (Ом)	$r_{\text{б}}$ (Ом)
1	24	0,1				54	1							
2	24		80			72		80						
3	48					90			10					240
4		0,25				110				1440				192
5			140				1		7					160
6	24	0,1					2			1200				
7	24		80					160	20					
8	48							200		2000				240
9		0,25				110	2							192
10			140			120			14					160
11	24	0,1				54		180						
12	24		80			72				2400				
13	48						3		30					240
14		0,25					3			3600				192
15			140					420	21					160
16	24	0,1						240		2400				
17	24		80			72	4							
18	48					90		400						240
19		0,25				1120			48					192
20			140			120				3920				160
21	24	0,1					5		50					
22	24		80				5			4000				
23	48							500	50					240
24		0,25						600		7200				192
25			140			120	5							160

Задача № 21

Двигатель постоянного тока независимого возбуждения служит для вращения рабочего органа станка, создающего момент сопротивления M_c .

Как изменятся в установившемся режиме и как будут изменяться во времени скорость вращения привода ω , ЭДС обмотки якоря E_j , ток обмотки якоря I_j и вращающий момент $M_{вр}$, если изменить один из следующих параметров: сопротивление цепи якоря $r_{ця}$, напряжение питания обмотки якоря U , магнитный поток Φ и момент сопротивления M_c ?

Нарисовать схему питания двигателя постоянного тока и ответ пояснить аналитически (для установившегося режима) и графически с помощью механических характеристик (для переходного режима). При этом считать, что скорость двигателя мгновенно измениться не может, а электрические процессы, не связанные со скоростью, протекают безынерционно (табл. 23).

Таблица 23

Таблица вариантов

Увеличить				Уменьшить				Определить		
$r_{ця}$	U	Φ	M_c	$r_{ця}$	U	Φ	M_c			
1	2	3	4	5	6	7	8	ω	E_j	I_j
9	10	11	12	13	14	15	16	ω	E_j	$M_{вр}$
17	18	19	20	21	22	23	24	ω	I_j	$M_{вр}$

Задача № 22

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения характеризуется следующими номинальными величинами: мощностью на валу P_H , развиваемым моментом M_H , напряжением сети U , скоростью вращения n_H , КПД η_H , мощностью, потребляемой двигателем из сети, P_H , потребляемым током I_H , потерями в обмотке якоря ΔP_j и обмотке возбуждения ΔP_B , суммарными механическими и магнитными потерями ΔP_M , общими потерями в двигателе ΔP , током в обмотке возбуждения I_B . В режиме холостого хода двигатель потребляет ток I_0 и мощность P_0 . Обмотка якоря в нагретом состоянии имеет сопротивление r_j , обмотка возбуждения – r_B .

По данным величинам определить неизвестные и заполнить таблицу. Определить пусковой ток и пусковой момент двигателя. Построить естественную механическую характеристику и характеристику при включении в

цепь якоря сопротивления, которое ограничивает пусковой ток до $2,5 I_H$. Построить рабочие характеристики двигателя $M = f_1(P)$; $n = f_2(P)$; $\eta = f_3(P)$ (где P – мощность на валу двигателя) при значениях мощности 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,25 P_H . Потерями в обмотке якоря при холостом ходе пренебречь.

Указания. Механическая мощность двигателя $P = \omega M$, где $\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ с}^{-1}$ – угловая скорость вращения двигателя, n – скорость вращения двигателя, об/мин, M – механический момент на валу двигателя.

Электрическая мощность, потребляемая двигателем, $P_1 = UI$, где U – напряжение сети, I – ток, потребляемый двигателем. Для двигателя параллельного возбуждения $I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}}$, где $I_{\text{в}}$ – ток обмотки возбуждения.

Коэффициент полезного действия электродвигателя определяется отношением механической мощности на валу двигателя к электрической затраченной мощности $\eta = \frac{P}{P_1}$.

Суммарные потери мощности в двигателе $\Delta P = P_1 - P$ состоят из следующих основных потерь: электрических потерь в цепи якоря $\Delta P_{\text{я}} = r_{\text{я}} I_{\text{я}}^2$ и цепи возбуждения $\Delta P_{\text{в}} = r_{\text{в}} I_{\text{в}}^2 = UI_{\text{в}}$ (где $r_{\text{я}}$ и $r_{\text{в}}$ – сопротивления обмоток якоря и возбуждения), механических и магнитных потерь $\Delta P_{\text{м}}$, которые считаются постоянными независимо от нагрузки (от холостого хода до номинальной). Таким образом, с достаточной степенью точности можно считать, что $\Delta P = \Delta P_{\text{я}} + \Delta P_{\text{в}} + \Delta P_{\text{м}}$.

Электрическая мощность двигателя $P_1 = P + \Delta P$. В режиме холостого хода $P_{1\text{хх}} = P_{\text{хх}} + \Delta P_{\text{хх}} = \Delta P_{\text{вхх}} + \Delta P_{\text{мхх}}$, т.к. $P_{\text{хх}} = 0$, а потери в цепи якоря $\Delta P_{\text{яхх}} \approx 0$, поскольку ток в цепи якоря при холостом ходе мал и обусловлен не мощностью нагрузки, а сравнительно небольшими механическими и магнитными потерями.

Пусковой ток в цепи якоря $I_{\text{я пуск}} = \frac{U}{r_{\text{я}}}$. Если в цепь якоря включено пусковое сопротивление $r_{\text{пуск}}$, то пусковой ток якоря можно уменьшить до величины $I_{\text{я пуск}} = \frac{U}{(r_{\text{я}} + r_{\text{пуск}})}$.

Механический момент на валу двигателя $M = k\Phi I_{\text{я}}$, где коэффициент k – постоянный для данной машины, Φ – магнитный поток под одним плюсом. Если известны ток якоря и момент в номинальном режиме $M_H = k\Phi I_{\text{ян}}$, то, разделив правые и левые части последних двух уравнений, получим $M / M_H = I_{\text{я}} / I_{\text{ян}}$ или $M = M_H I_{\text{я}} / I_{\text{ян}}$.

При пуске $M_{\text{пуск}} = M_H I_{\text{я пуск}} / I_{\text{ян}}$.

В двигателе параллельного возбуждения зависимость угловой скорости вращения от момента нагрузки (механическая характеристика) линейная. Поэтому естественную механическую характеристику можно построить по двум точкам, определяющим номинальный режим (M_H, ω_H) и режим пуска двигателя ($M_{\text{пуск}}, \omega_{\text{пуск}} = 0$).

Пересечение этой прямой с осью ординат определяет скорость идеального холостого хода ω_0 . Искусственную механическую характеристику при введении сопротивления в цепь якоря также можно построить по двум точкам, соответствующим режиму холостого хода ($\omega_0, M_{xx} = 0$) и пусковому режиму ($\omega_{пуск} = 0, M_{пуск}$).

Для построения рабочих характеристик составим баланс мощностей $P_1 = P + \Delta P = P + \Delta P_{я} + \Delta P_{в} + \Delta P_{м}$ или $U(I_{я} + I_{в}) = P + r_{я}I_{я}^2 + \Delta P_{в} + \Delta P_{м}$.

Задаваясь различными значениями механической мощности на валу двигателя $P = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25 P_n$, решают квадратное уравнение и определяют ток в цепи якоря $I_{я}$ и ток, потребляемый двигателем из сети, $I = I_{я} + I_{в}$.

Вращающий момент $M = \kappa \Phi I_{я}$. При вычислении удобно пользоваться преобразованным выражением

$$M = M_n I_{я} / I_{ян}$$

Скорость вращения можно определить, зная противо-ЭДС $E = K\Phi \cdot \omega$. Зная ЭДС и скорость в номинальном режиме, легко определить скорость для любого режима.

$$\omega = \omega_n E / E_n$$

Противо-ЭДС вычисляется в соответствии с уравнением, составленным по второму закону Кирхгофа,

$$E = U - r_{я} \cdot I_{я},$$

кпд электродвигателя $\eta = P / P_1 = P / UI$.

В пояснительной записке привести расчет для мощности нагрузки $P = 0,25 P_n$, а результаты расчета для других значений мощности свести в табл. 24. Варианты заданий приведены в табл. 25.

Таблица 24

Расчетная таблица

P	$I_{я}$	I	M	$E_{я}$	ω	n	P	η
кВт	A	A	Нм	B	C	об/мин	кВт	–

Механические и рабочие характеристики построить в удобном масштабе на миллиметровой бумаге.

Таблица вариантов

№ вар.	P_H	M_H	n_H	U	P_{IH}	η_H	I_H	I_ϵ	ΔP	ΔP_y	P_{10}	ΔP_M	P_{10}	I_0	r_y	r_ϵ
	кВт	НМ	об/м	В	кВт	%	А	А	кВт	кВт	кВт	кВт	кВт	А	Ом	Ом
1			980		70,6		635							70	0,01	3,7
2	10		2250	220		85				0,65	0,52					
3		40			4,7		21		0,7	0,26						220
4	6,6		2400			85	30				0,39				0,35	
5			2100		5,2		25					0,25			0,45	230
6		25		220			15			0,16	0,14		0,3			
7		32			9,4	85	45			0,52						110
8			1050	110	90,5						4,45		9,2		0,007	
9	80	800		110			850								0,007	3,0
10	92		970		108		1000			5,95	5,3					
11		610	1050	110			700			4,3						3,0
12		150	2200			85	400				2,0				0,014	
13		300		110			500					2,8			0,011	4,4
14			1000	220		85	77			0,97	0,8					
15		120	970	220		85				0,77						38
16	60		1000				640				3,2			71	0,01	
17	10		2200	220		85				0,65						9,0
18		40			4,7		20		0,7	0,25	0,23					
19	6,5		2500			85	30								0,35	140
20			2100		5,2		25				0,21	0,25			0,45	
21		25		220			15			0,15			0,45			280
22		32			9,4	85	45			0,5	0,46					
23	77		1050	110									9,2		0,007	2,8
24	80	800					850					4,72			0,007	
25	90		970		105		1000			6,0						2,2

Задача № 23

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, рассчитанный на номинальное напряжение U_n и мощность P_n , включен в сеть с номинальным напряжением U и частотой $f = 50$ Гц.

Как следует включить фазные обмотки электродвигателя?

Определить номинальный и пусковой токи, номинальный пусковой и максимальный моменты, полные потери в двигателе ΔP при номинальной нагрузке. Построить механическую характеристику двигателя, вычислив электромагнитные моменты при скольжениях $S = 0; 0,5S_n; S_n; S_{кр}; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1$

по формуле Клосса
$$M = \frac{2M_{\max}}{S / S_{кр} + S_{кр} / S}.$$

Как изменится пусковой момент двигателя при снижении напряжения на его зажимах на 15 % и возможен ли пуск двигателя при этих условиях с номинальной нагрузкой?

Подобрать емкость конденсаторов для повышения коэффициента мощности установки до 1, причем схема включения конденсаторов должна быть отличной от схемы соединения фазных обмоток электродвигателя.

В расчетной записке привести развернутую схему включения обмоток электродвигателя, конденсаторов, а также векторную диаграмму фазных и линейных значений токов и напряжений, построенную в удобном масштабе. Расчет механической характеристики свести в табл. 26. Варианты приведены в табл. 27.

Таблица 26

Расчетная таблица

S	ω	n	M
[1]	$[c^{-1}]$	[об/мин]	[Н·м]

Таблица 27

Таблица вариантов

№ вар.	U	P_n	S_n	η_n	$\cos \varphi_n$	P	$M_{\text{пуск}} / M_n$
	В	кВт	%	–	–	–	–
1	220	0,1	3	0,78	0,86	1	1,3
2	380	0,8	3	0,79	0,87	2	1,3
3	220	1,5	3	0,8	0,88	3	1,5
4	380	2,2	3	0,81	0,89	4	1,5
5	220	3,0	3	0,82	0,89	1	1,3
6	380	4,0	3	0,83	0,90	2	1,3
7	220	5,5	3	0,84	0,90	3	1,5
8	380	7,5	3	0,85	0,91	4	1,5

№ вар.	U	P_H	S_H	η_H	$\cos \varphi_H$	P	$M_{\text{пуск}} / M_H$
	В	кВт	%	–	–	–	–
9	220	10	4	0,86	0,91	1	1,3
10	380	13	4	0,87	0,92	2	1,3
11	220	17	4	0,87	0,92	3	1,5
12	380	22	4	0,88	0,9	4	1,5
13	220	30	4	0,88	0,91	1	1,3
14	380	40	4	0,89	0,92	2	1,3
15	220	55	4	0,89	0,92	3	1,5
16	380	1,5	4	0,78	0,87	4	1,5
17	220	2,2	4	0,79	0,88	1	1,3
18	380	3,0	5	0,80	0,89	2	1,3
19	220	4,0	5	0,81	0,89	3	1,5
20	380	5,5	5	0,82	0,89	4	1,5
21	220	7,5	5	0,83	0,9	1	1,3
22	380	10	5	0,84	0,9	2	1,3
23	220	13	5	0,85	0,91	3	1,5
24	380	17	5	0,86	0,92	4	1,5
25	220	22	5	0,87	0,92	1	1,3

Все двигатели рассчитаны на напряжение 220/380 В, $M_{\text{max}}/M_H = 2$, $I_{\text{пуск}}/I_H = 6$.

Задача № 24

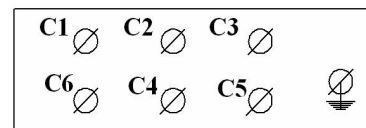
Для маркировки выводов трехфазной четырехпроводной сети 3 раза измеряли напряжение между различными клеммами.

Требуется: 1. Объяснить, какая клемма является нейтралью, и заполнить табл. 28.

2. Подключить питание (показать схему соединений проводов) к клеммной колодке асинхронного электродвигателя, рассчитанного на напряжение 220/380 (для нечетных вариантов) и 380/660 (для четных). Нулевой провод соединить с корпусом двигателя.

1 2 3 4
 ∅ ∅ ∅ ∅

3. Определить линейный ток номинального режима электродвигателя, если кпд и коэффициент мощности равны 0,8, а мощность $P_H = N$ (кВт), где N – номер варианта.



4. Подобрать трансформатор тока для измерения линейного тока, потребляемого электродвигателем мощностью $P_H = N$ кВт, где N – номер варианта, если его кпд и коэффициент мощности равны 0,8. Вторичная обмотка трансформатора тока (ТА) рассчитана на 5А, а первичный ток выбрать из ряда чисел, кратных 10 А. Измерение осуществляется амперметром, рассчитанным на 1 А.

В схему соединений включить трансформатор тока и амперметр.

Таблица 28

Расчетная таблица

Номер вар. Клеммы	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21	23
	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24
1 – 2	220	220	380	380	220	220	380	380	380	380	220	220
1 – 3	220	380	220	380								
1 – 4	220	380	380	220					220	220	380	220
2 – 3					380	220	220	380		380		
3 – 4					380	380	220	220				380

Задача № 25

Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором питается от вторичной обмотки трансформатора, первичная обмотка которого подключена к трехфазной сети.

Определить:

1. Как следует соединить обмотки трансформатора и асинхронного двигателя, чтобы последний был подключен на номинальное напряжение?
2. Как изменятся фазные напряжения на обмотках электродвигателя, линейные напряжения, потери в стали, меди и общие потери, если:
 - а) поменять схему соединения обмоток электродвигателя;
 - б) поменять схему соединения вторичной обмотки трансформатора;
 - в) поменять схему соединения и двигателя, и вторичной обмотки трансформатора;
 - г) поменять схему соединения первичной обмотки трансформатора.

Нарисовать развернутую схему соединений для всех пяти вариантов, показать дугой со стрелками и подписать на схемах числовые значения всех линейных и фазных напряжений.

При определении потерь считать нагрузку на валу двигателя номинальной. Расчетные данные – в табл. 29.

Таблица 29

Расчетные данные к задаче

Номинальное напряжение						
Вторичной обмотки трансформатора	Первичной обмотки трансформатора					Асинхронного двигателя
	220/380		380/660			
127/220	1	6	11	16	21	220/380
220/380	2	7	12	17	22	
380/660	3	8	13	18	23	
220/380	4	9	14	19	24	380/660
380/660	5	10	15	20	25	
	220	380	660	380	660	
Напряжение сети						

КУРСОВАЯ РАБОТА
по дисциплине
«Электротехника, электрические машины и аппараты»

1. Задание

Разработать принципиальную и монтажную схемы сверлильного станка, работающего по заданной программе. Выбрать электрооборудование для станка, сечение и марку проводов и кабелей, определить динамические свойства привода.

2. Определение программы работы станка

По цифровому и буквенному коду составляют программу работы станка, т.е. схему движения стола, определяют моменты включения привода главного движения и напряжение питания цепи управления.

Цифра 1 означает движение стола вперед, 2 – одновременное движение вперед и влево, 3 – влево, 4 – влево и назад, 5 – назад, 6 – назад и вправо, 7 – вправо, 8 – вправо и вперед, 0 – остановку стола на 10 с (если 0 – последняя цифра, то после остановки на 10 с станок снова включается по заданной программе); М – рабочий процесс сверления, А – питание схемы управления от сети переменного тока напряжением 127 В, В – постоянного тока напряжением 110 В, С – переменного тока напряжением 36 В, Д – постоянного тока напряжением 24 В.

Например, вариант 0М58В означает, что при нажатии на кнопку «Пуск» стол в течение 10 с должен оставаться неподвижным (первая цифра 0), затем необходимо осуществить процесс сверления (буква М). По окончании рабочего процесса сверления подвижный стол должен переместиться назад (цифра 5) и, достигнув путевого переключателя SQ6, одновременно должен перемещаться в направлении вперед и вправо (цифра 8) до достижения им или SQ4, или SQ5, и остановиться. Рабочий цикл закончен.

Рабочий процесс сверления предполагает работу привода главного движения и привода подачи в следующей последовательности. Вначале включается двигатель главного движения М1 вращения сверла, после чего без выдержки времени – двигатель М2, который перемещает шпиндель вниз (рабочий ход). Достигая путевого переключателя SQ2, двигатель М2 реверсирует, и вращающееся сверло перемещается вверх до тех пор, по-

ка шпиндель не вызовет срабатывание SQ1. Путевой переключатель SQ1 подает сигнал на завершение процесса сверления, т.е. остановку двигателей M1 и M2.

Сигналы на перемещение стола в каком-либо направлении, его остановку, включение и выключение двигателей M1 – M4 подают переключающие контакты путевых переключателей SQ1 – SQ6, а также реле времени.

Эту программу для наглядности можно условно представить графически. Например, процесс сверления обозначить жирной точкой, остановку стола – кружком, а перемещение стола в том или ином направлении – линией со стрелкой. Так, задание по варианту 0M58B графически изображено на рис. 1.

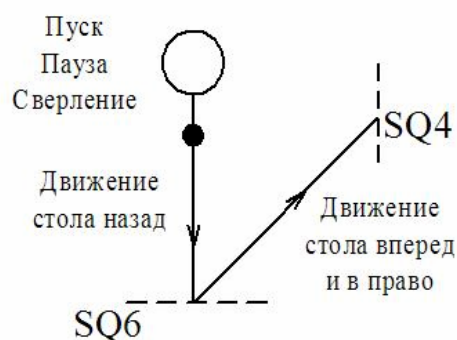


Рис. 1. Условное графическое изображение задания по варианту 0M58B

На пути движения стола необходимо показать те путевые переключатели, которые выдают сигнал на какую-либо коммутацию в электрических цепях. Если стол одновременно перемещается в двух направлениях (например, вправо и вперед), то можно использовать любой из путевых переключателей: или SQ4, или SQ5 в зависимости от того, какого переключателя достигнет стол раньше.

3. Электрооборудование станка

Непосредственно на станке расположены:

- электродвигатель главного движения (вращения сверла) M1;
- электродвигатель подачи (перемещение сверла вниз – вверх) M2;
- электродвигатель перемещения стола в направлении вправо – влево M3;
- электродвигатель перемещения стола вперед – назад M4;

- путевые переключатели SQ1 и SQ2, ограничивающие соответственно верхнее и нижнее положения шпинделя;
- путевые переключатели SQ3 и SQ4, установленные на пути движения стола вправо и влево;
- путевые переключатели SQ5 и SQ6, ограничивающие движение стола в направлении вперед – назад;
- две клеммные колодки (одна – у станка, вторая – в шкафу управления) с многожильным кабелем, связывающим шкаф управления со вспомогательным приводом и путевыми переключателями.

Вне станка расположен шкаф управления с аппаратурой управления, состоящей из семи контакторов КМ1 – КМ7, служащих для включения и реверсирования всех двигателей; тепловых реле в цепи питания электродвигателей; реле времени; вышеуказанной клеммной колодки; трансформатора и другой аппаратуры, обеспечивающей работу станка по заданной программе.

На рис. 2 и 3 показано расположение электрооборудования на сверлильном станке.

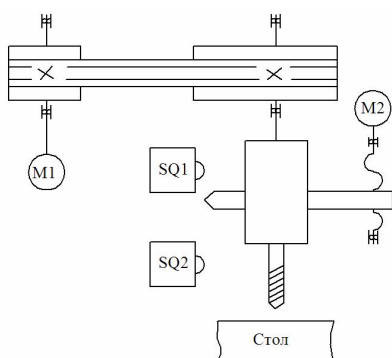


Рис. 2. Расположение электрооборудования привода шпинделя

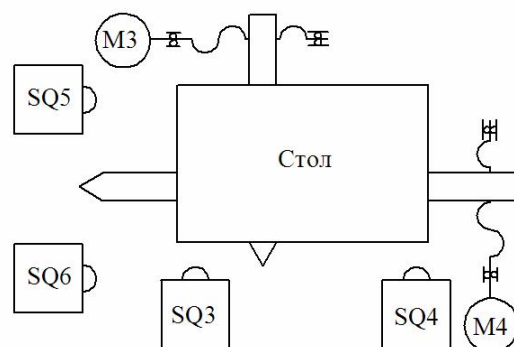


Рис. 3. Расположение электрооборудования привода стола

4. Принцип работы электрической части станка

На рис. 4 показана электрическая схема силовой цепи, а на рис. 5 – схема управления, обеспечивающая работу сверлильного станка по программе 0M58B.

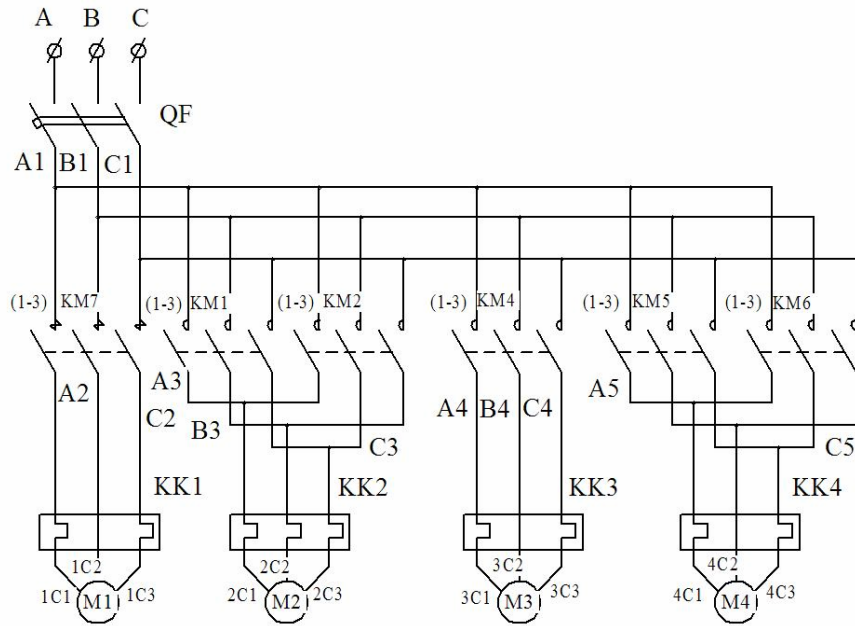


Рис. 4. Электрическая схема силового электрооборудования станка

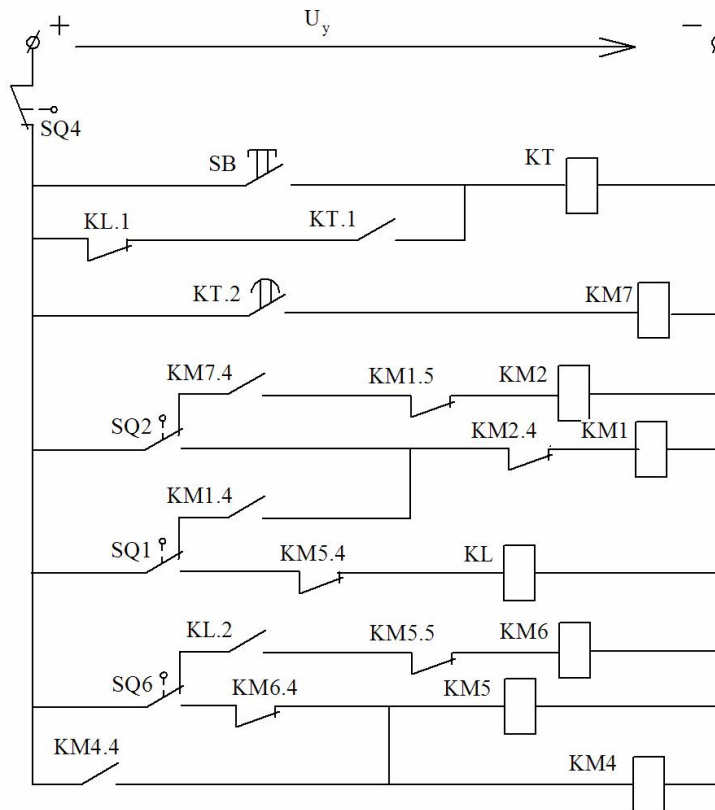


Рис. 5. Электрическая схема управления станком

В исходном положении все контакторы и реле обесточены. Питание их обмоток будет осуществляться через размыкающий контакт путевого переключателя SQ4. При нажатии на кнопку SB «Пуск» подается питание

на обмотку реле времени, которое своим контактом КТ.1 включается на самопитание через размыкающий контакт КЛ.1. Через 10 с срабатывает контакт КТ.2 и включает обмотку контактора КМ7. Силовыми контактами КМ.7 (1 – 3) включается асинхронный двигатель М1, который вращает шпиндель станка. Одновременно замыкается слаботочный контакт КМ7.4 и подается питание на обмотку КМ2 через размыкающие контакты SQ2 и КМ1.5. Включается двигатель привода шпинделя М2, который отработывает движение сверла вниз, и осуществляется процесс сверления детали. Шпиндель, достигая своего нижнего положения, нажимает на подвижный элемент путевого переключателя SQ2 и вызывает его срабатывание. При этом разрывается цепь питания обмотки КМ2 и включается обмотка контактора КМ1, которая контактом КМ 1.4 включается на самопитание через размыкающий контакт SQ1. В силовой части цепи фазы В и С меняются местами и происходит реверсирование двигателя М2. Шпиндель начинает двигаться вверх. Но при этом контакты путевого переключателя SQ2 возвращаются в исходное положение. Однако это не вызовет повторного срабатывания КМ 2, т.к. размыкающий контакт КМ 1.5 разрывает цепь питания обмотки контактора КМ2.

При своем движении вверх шпиндель, достигнув крайнего верхнего положения, вызывает переключение SQ1. При этом обмотка КМ1 обесточивается, но включается обмотка промежуточного реле КЛ, служащего для размножения контактов SQ1.

Первым контактом КЛ.1 разрывается цепь питания обмотки реле времени, которое, в свою очередь, контактом КТ.2 обесточит контактор КМ7 и прекратится вращение сверла. Вторым контактом КЛ.2 включается обмотка контактора КМ6 через размыкающие контакты SO6. Контактными КМ.6 (1 – 3) включается двигатель М4, который отработывает перемещение стола назад. Достигая путевого переключателя SQ6, стол переключает его контакты и КМ6 обесточивается, но включаются запараллеленные обмотки контакторов КМ5 и КМ4. Замыкание силовых контактов КМ4. (1 – 3) и КМ5. (1 – 3) вызывает одновременное движение стола вперед и вправо. Контакт КМ4.4 включает эти контакторы на самопитание, а контакт КМ5.4 разрывает цепь питания обмотки промежуточного реле КЛ, которое, в свою очередь, контактом КЛ.2 разрывает цепь питания обмотки КМ6, не допуская повторного срабатывания контактора КМ6, когда при своем движении вперед контакт SQ6 возвратится в исходное положение. Наконец, достигая крайнего правого положения, стол вызывает срабатывание SQ4, который своим размыкающим контактом обесточивает обмотки контакторов КМ4 и КМ5.

В окончательном варианте в схеме управления необходимо предусмотреть защиту электродвигателей от перегрузок и от случайных срабатываний обоих контакторов, обеспечивающих реверсирование электродвигателя. В первом случае последовательно с обмоткой контактора необходимо включить размыкающий контакт теплового реле, нагревательные элементы которого включены в цепь питания соответствующего электродвигателя. Во втором случае одновременное срабатывание, например, контакторов КМ1 и КМ2 вызвало бы короткое замыкание в силовой цепи между фазами В и С. Исключить такую возможность можно, если в цепь питания обмотки первого контактора включить размыкающий контакт второго контактора. И наоборот, в цепь питания второго контактора – размыкающий контакт первого контактора. Схема, дополненная защитой, показана на рис. 6.

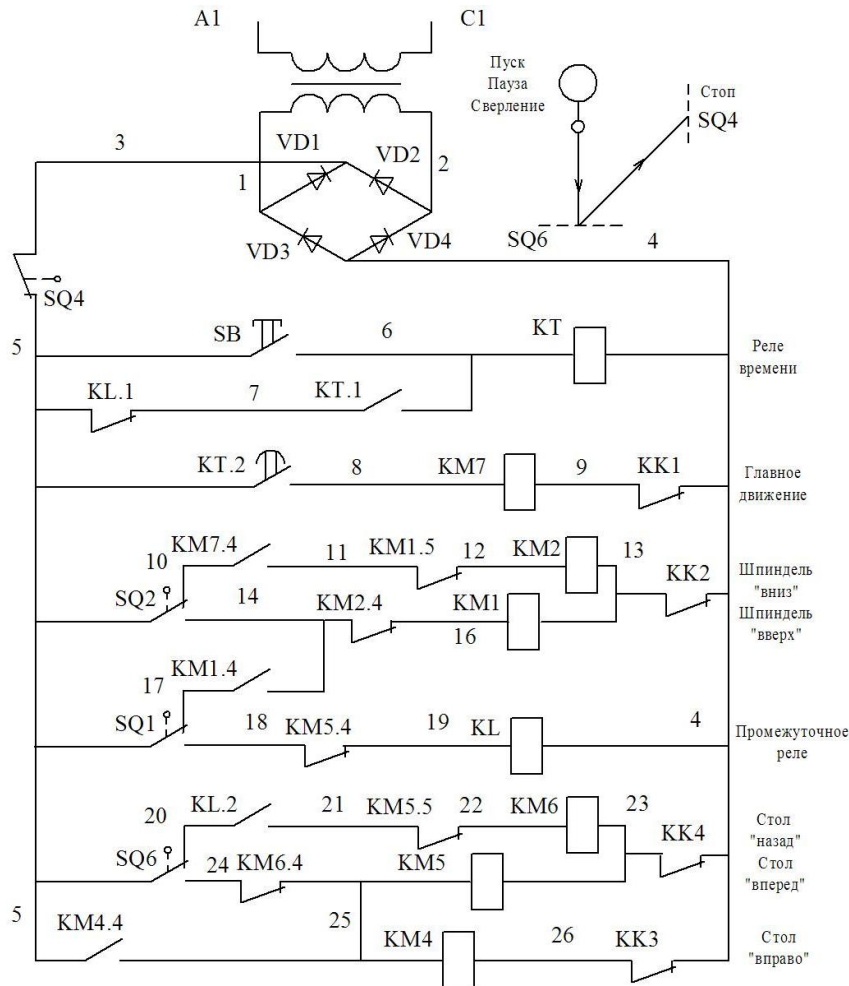


Рис. 6. Схема управления с защитой

5. Методические рекомендации по разработке электрической схемы станка

Электрическая схема станка состоит из двух частей: силовой и схемы управления.

В силовую часть схемы входят цепи питания всех электродвигателей (см. рис. 4). Кроме обмоток электродвигателей здесь расположены силовые контакты контакторов и нагревательные элементы тепловых реле.

Включение станка осуществляется автоматическим воздушным выключателем QF.

Разработку схемы управления следует начинать с команды, подаваемой кнопкой управления SB «Пуск». В соответствии с программой с условным обозначением 0M58B при нажатии на кнопку «Пуск» необходимо создать выдержку времени в 10 с, после чего включается двигатель M1 главного движения. Этот фрагмент программы можно реализовать схемой, приведенной на рис. 7.

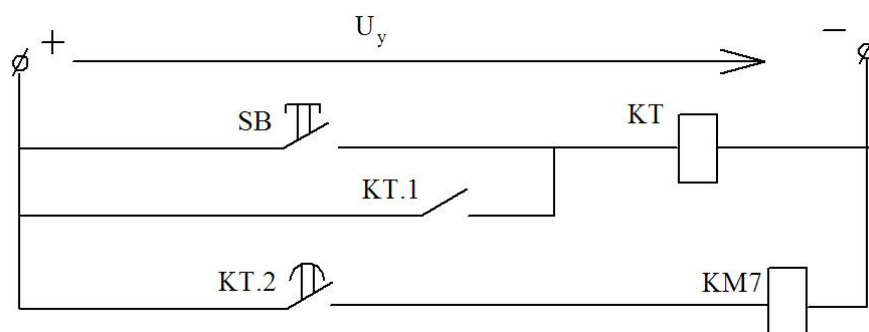


Рис. 7. Фрагмент схемы управления

При нажатии на кнопку SB получает питание обмотка реле времени КТ. Контакт КТ.1 срабатывает без выдержки времени и шунтирует кнопку SB, благодаря чему кнопку можно отпустить, а обмотка реле времени будет запитана через свой замыкающий контакт (реле времени включается на самопитание). Контакт КТ.2 включается через заданное время (10) и подает питание на обмотку контактора КМ7. Силовые контакты этого контактора КМ.7 (1 – 3) включают двигатель вращения сверла.

После включения двигателя главного движения контактом КМ7.4 через замкнутый контакт SQ2 подается питание на обмотку контактора КМ2 (рис. 8). Силовые контакты КМ2. (1 – 3) включают двигатель M2, обрабатывающий движение шпинделя вниз. Шпиндель, достигнув крайнего нижнего положения, вызывает переключение SQ2, но включается обмотка КМ1. Контакты КМ1. (1 – 3) реверсируют двигатель M2 за счет того, что фазы В и С меняются местами, и шпиндель перемещается вверх.

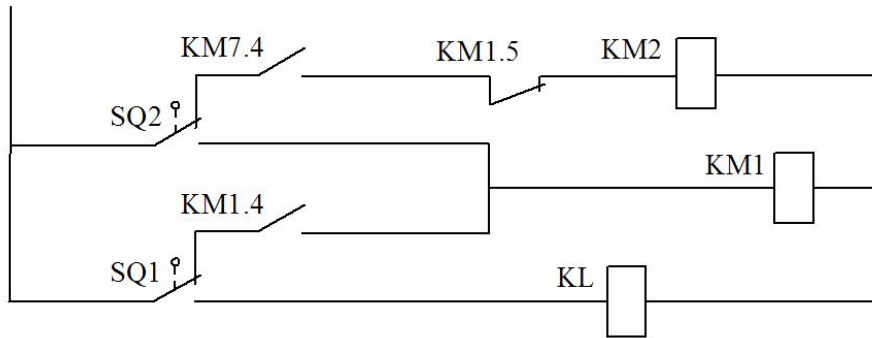


Рис. 8. Фрагмент схемы управления

Так как, перемещаясь вверх, SQ2 возвратится в исходное положение, то необходимо размыкающим контактом KM1.5 не допустить срабатывание KM2, а обмотку KM1 включить на самопитание контактом KM1.4, который включен последовательно с размыкающим контактом путевого переключателя SQ1. Благодаря этому при достижении шпинделем крайнего верхнего положения обесточивается обмотка KM1 и двигатель M2 останавливается.

В этот момент при срабатывании SQ1 необходимо отключить двигатель главного движения и включить двигатель M4, который должен обрабатывать движение стола назад. Но так как SQ1 имеет только один переключающий контакт, то для размножения контактов необходимо включить промежуточное реле KL.

Двигатель главного движения можно отключить, разомкнув цепь питания обмотки KM7 или обмотки реле времени, дополнив схему (см. рис. 7) размыкающим контактом KL.1. Этот контакт показан на общей схеме управления (см. рис. 5). Действительно, если реле времени КТ обесточится, то контакт КТ.2 мгновенно разомкнется и обесточит обмотку KM7.

Второй контакт промежуточного реле KL.2 включает обмотку контактора KM6 (рис. 9), который своими силовыми контактами KM6. (1 – 3) включает двигатель M4 (см. рис. 4), обрабатывающий перемещение стола назад.

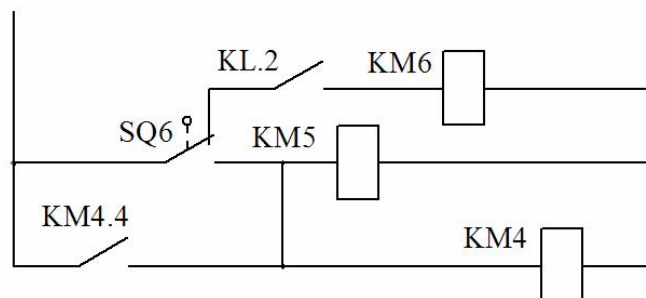


Рис. 9. Фрагмент схемы управления

Но питание контактора КМ6 лучше организовать через размыкающий контакт путевого переключателя SQ6. Когда стол, достигнув положения SQ6, вызовет его срабатывание, то одновременно с отключением обмотки КМ6 включаются две параллельно включенные обмотки контакторов КМ5 и КМ4. В силовой цепи (см. рис. 4) контакты КМ5. (1 – 3) включают двигатель М3. Стол движется вперед и вправо.

В этой схеме необходимо включить обмотки КМ4 и КМ5 на самопитание или замыкающим контактом КМ4.4, или контактом КМ5. В противном случае контакт SQ6 почти сразу же, возвращаясь в исходное положение, обесточит КМ4 и КМ5.

Возвращаясь в исходное положение, он включит КМ6, так как контакт KL.2 остается замкнутым. Чтобы разомкнуть KL.2, необходимо обесточить обмотку KL, например, контактом КМ5.4 (см. рис. 5).

Наконец, стол, достигнув путевого выключателя SQ4, обесточит всю схему управления.

Заданная программа работы станка выполнена.

6. Как составить схему соединений (монтажную схему) по принципиальной схеме

Принцип составления монтажной схемы можно пояснить на простой принципиальной схеме.

Пусть требуется составить монтажную схему питания маломощного однофазного электродвигателя, в которой предусмотрена и тепловая, и токовая защита (рис. 10).

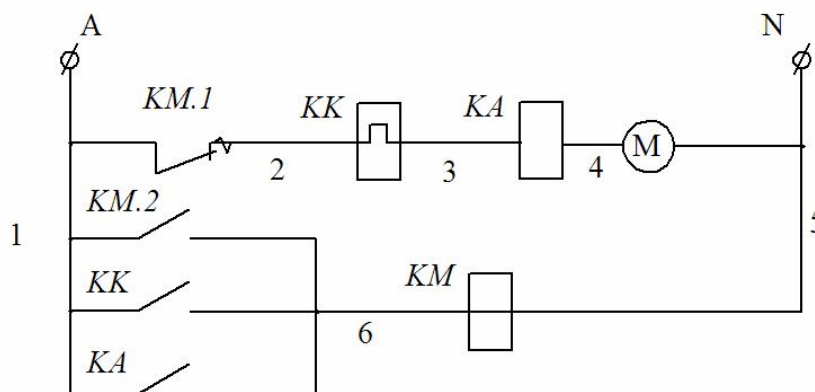


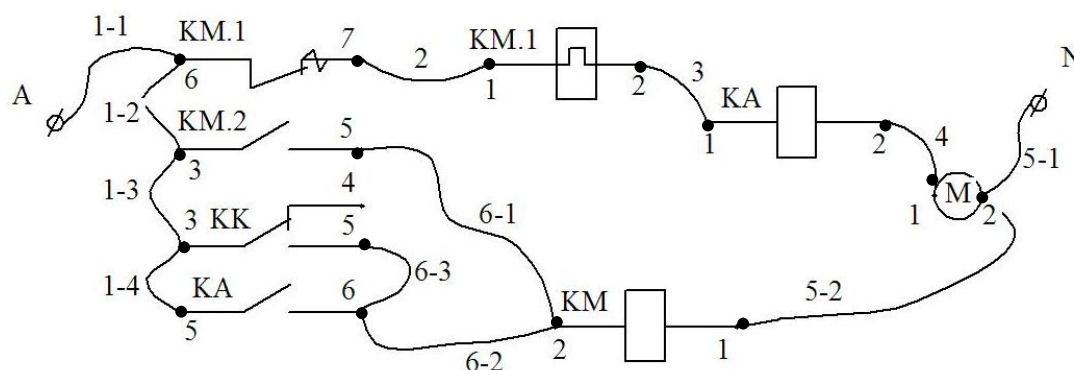
Рис. 10. Принципиальная схема

Вначале на принципиальной схеме нумеруют участки схемы. В пределах каждого участка не должно быть никаких электрических элементов, кроме соединительных проводов. В данной схеме таких участков 6. На принципиальной схеме цепь питания нагрузки (силовая часть цепи) показана утолщенными линиями.

Затем желательно нарисовать промежуточную полумонтажную схему (рис. 11), в которой электрические элементы располагают так же, как и на принципиальной схеме, но провода на этой схеме должны начинаться и заканчиваться на соответствующих клеммах. Клеммы показаны жирными точками и произвольно пронумерованы арабскими цифрами.

Например, чтобы соединить пять клемм, принадлежащих первому участку, необходимо 4 провода, которые должны быть подключены так, чтобы к одной клемме подсоединилось не более двух проводов (присоединение трех и более проводов к одной клемме является нежелательным).

Провода, принадлежащие одному участку, должны быть пронумерованы. Например, 6-2 означает второй провод 6-го участка, 1-3 – первый участок, третий провод.



На монтажной схеме (рис. 12) изображают в виде условных графических обозначений (прямоугольников, упрощенных внешних очертаний и пр.) электрооборудование, причем расположение его должно примерно соответствовать действительному размещению на стенде, в шкафу, на площадке и т.д. При этом необходимо внутри прямоугольников поместить условные графические обозначения элементов, относящихся к данному устройству, аппарату (контакты, обмотки и т.д.) и обозначения промаркированных клемм, к которым подсоединены эти элементы.

Затем в соответствии с промаркированными проводами и клеммами выполняют монтажную схему. Допускается «сливать» отдельные провода в общую линию, но при подходе к контактам (клеммам) каждый провод изображают отдельной линией.

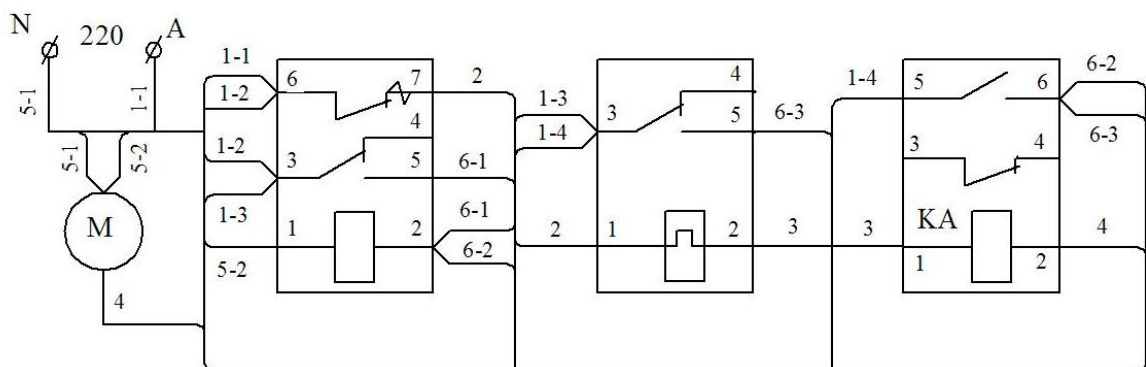


Рис. 12. Монтажная схема

На практике иногда приходится по монтажной схеме восстанавливать принципиальную. В этом случае вначале необходимо нарисовать полумонтажную, развернутую схему, в которой клеммы источника питания разнесены в пространстве.

На полумонтажной схеме, в отличие от монтажной, элементы данного устройства (контакты, обмотки) могут быть расположены на различных участках схемы.

Затем последовательными упрощениями, т.е. рациональным размещением элементов схемы, приводят ее к принципиальной, по которой легко разобраться в принципе работы этой схемы.

Полумонтажная промежуточная схема удобна при определении неисправности в цепи. Рассмотрим несколько задач.

Задача 1. Как будет работать схема, если по ошибке провод 6-3 подсоединили не к 5-й, а к 4-й клемме КК?

Ответ. В этом случае вместо размыкающего контакта теплового реле КК включен замыкающий контакт. Это приведет к тому, что при подаче напряжения через этот контакт получит питание обмотка контактора КМ. Контактор сработает и своим замыкающим контактом КМ.2 обмотку включит на самопитание, а силовой контакт КМ.1 разорвет цепь питания электродвигателя. Двигатель не будет работать.

Задача 2. Как будет работать схема, если провод 5-1 подсоединить не ко 2-й клемме электродвигателя, а к 1-й?

Ответ. В этом случае клеммы источника питания А и N будут замкнуты накоротко, так как и обмотка теплового реле КК, и обмотка реле тока КА практически не имеют сопротивления. Ток короткого замыкания прой-

дет по цепи А – провод 1-1 – контакт КМ.1– провод 2 – обмотка теплового реле К – провод 3 – обмотка реле тока КА – провод 4 – провод 5-1 – N. Этот ток может вывести из строя любой (любые) из указанных элементов.

Задача 3. Как будет работать схема, если провод 5-2 ошибочно подключен не ко 2-ой, а к 1-й клемме электродвигателя М?

Ответ. При подаче напряжения включается электродвигатель, который будет нормально работать. Однако при срабатывании защиты, когда замкнется контакт КК или контакт КА, контактор КМ не сработает, т.к. напряжение между клеммами А и 1-й клеммой электродвигателя, на которое включена обмотка, будет равно практически нулю. Иначе говоря, защита электродвигателя не будет работать.

Следует иметь в виду, что при последовательном соединении обмотки контактора и электродвигателя на какое-либо напряжение практически все напряжение будет приложено к обмотке контактора, т.к. ее сопротивление на несколько порядков выше, чем сопротивление двигателя. При этом контактор нормально сработает, но через обмотку электродвигателя будет проходить очень малый ток, потребляемый обмоткой контактора. Электродвигатель этот ток даже «не почувствует».

Итак, подчеркнем основные правила выполнения схемы соединений (монтажной схемы):

1. На схеме должны быть изображены все устройства и элементы, их зажимы (клеммы), а также соединения между этими устройствами и элементами.

2. Все элементы и устройства изображают в виде условных графических обозначений, прямоугольников или упрощенных внешних очертаний. В последнем случае (внутри прямоугольников) допускается помещать условные графические обозначения элементов.

3. Расположение графических обозначений устройств и элементов (реле, контакторов, путевых переключателей, электродвигателей и т.д.) на схеме должно примерно соответствовать действительному размещению их на станке и в шкафу управления.

4. Следует указывать обозначения выводов (контактов) устройств и элементов. Если их нет, то допускается условно присваивать им обозначение на схеме (все клеммы должны быть пронумерованы арабскими цифрами).

5. На принципиальной схеме участки цепи должны быть промаркированы. В силовой цепи – буквой L с цифрами. Например, L15, L25, L35

обозначает пятый участок первой, второй и третьей линии. Допускается обозначать участки силовой цепи буквами А, В и С с цифрами, причем входным фазам числовой номер не присваивается. В цепи управления участки цепи маркируются арабскими цифрами.

6. В пределах одного участка не должно быть никаких элементов и устройств. Участки цепи, разделенные контактами аппаратов, обмотками реле, приборов, машин, резисторами и другими элементами, должны иметь разное обозначение.

7. Участки цепи, проходящие через разъемные, разборные или неразборные контактные соединения, должны иметь одинаковое обозначение.

8. Допускается «сливать» отдельные провода или кабели в общую линию, но при подходе к контактам (клеммам) провод и жилу кабеля изображают отдельной линией.

9. Если участок состоит из отдельных проводов, то порядковый номер провода соответствующего участка записывается после обозначения участка через тире арабскими цифрами. Например, 18-2 – второй провод 18-го участка или В3-1 – первый провод фазы В третьего участка.

10. После обозначения провода у выводов (контактов) устройств и элементов необходимо в скобках указать адресное обозначение, т.е. куда поступает данный провод (обозначение устройства и через двоеточие номер контакта). Например, 14-2(КМ2:8) – второй провод 14-го участка поступает на контактор КМ2 и подсоединяется к его восьмой клемме. Или 2С3 (ХТ 1:9) – провод участка 2С3 (третья клемма второго асинхронного электродвигателя) подключается к 9-ой клемме разборной первой клеммной колодки.

11. Провода, соединяющие маломощные электродвигатели М2, М3, М4 и путевые переключатели, подсоединять к аппаратам в шкафу управления через контакты разборных соединений (клеммные колодки ХТ1 и ХТ2).

В качестве примера показана монтажная схема электрооборудования станка (рис. 13), где путевые переключатели подсоединены к аппаратам в шкафу управления напрямую, минуя клеммы ХТ1 и ХТ2. В этой части схеме необходимо доработать.

Двигатель М1 привода главного движения связан со своим контактором и тепловым реле с помощью кабеля, минуя клеммные колодки.

На рис. 13 дан пример выполнения схемы соединений по разработанной принципиальной схеме (см. рис. 4 и рис. 6).

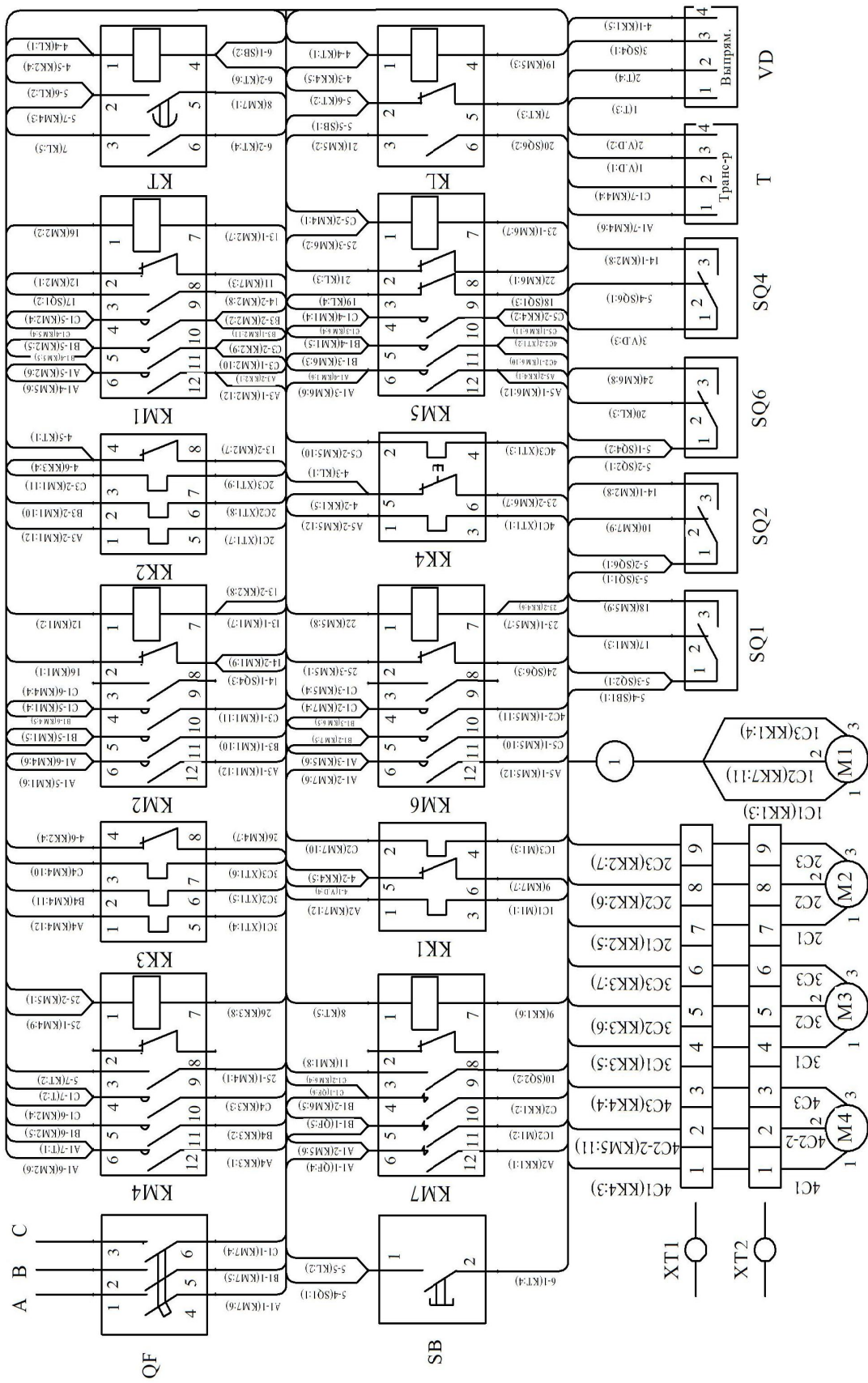


Рис. 13. Монтажная схема

7. Выбор мощности электродвигателя

Расчет мощности электродвигателя главного движения выполнить по [6].

Диаметр сверла определить по формуле $d = 10 + 0,5N$, где N – номер варианта или последняя цифра номера зачетной книжки (для студентов-заочников).

Материал заготовки – Ст 45.

По расчетной мощности выбрать тип конкретного асинхронного электродвигателя и записать его паспортные данные:

$$P_n \text{ (кВт)}; n_n \text{ (об/мин)}; U_n \text{ (В)}; M_{\text{макс}} / M_n; M_{\text{пуск}} / M_n.$$

Мощности остальных электродвигателей выбрать произвольно в пределах 0,1 – 0,4 кВт.

Выбрать питающий кабель (марку и сечение проводов) для электродвигателя вращения сверла.

8. Определение времени разгона и остановки электродвигателя

Время разгона и остановки электродвигателя определяют по основному уравнению электропривода

$$M_{\text{вр}} - M_c = J \cdot d\omega / dt.$$

Если $M_{\text{вр}} - M_c$ – величина постоянная в пределах изменения скорости от ω_1 до ω_2 , то, решая дифференциальное уравнение, получим

$$\Delta t = \frac{J}{M_{\text{вр}} - M_c} (\omega_2 - \omega_1).$$

Если $M_{\text{вр}} - M_c$ изменяется с изменением скорости, то время разгона двигателя определяют приближенно, разбивая механическую характеристику на участки (не менее 4-х), в пределах которых момент усредняют, считая его постоянным. Определяют время разгона двигателя на отдельных участках, а затем его суммируют

$$\Delta t_{\text{разг}} = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3 + \Delta t_4.$$

По паспортным данным выбранного электродвигателя главного движения строят в масштабе его механическую характеристику (рис. 14).

Разбивают эту характеристику на 4 участка и определяют в пределах каждого участка среднее значение вращающего момента.

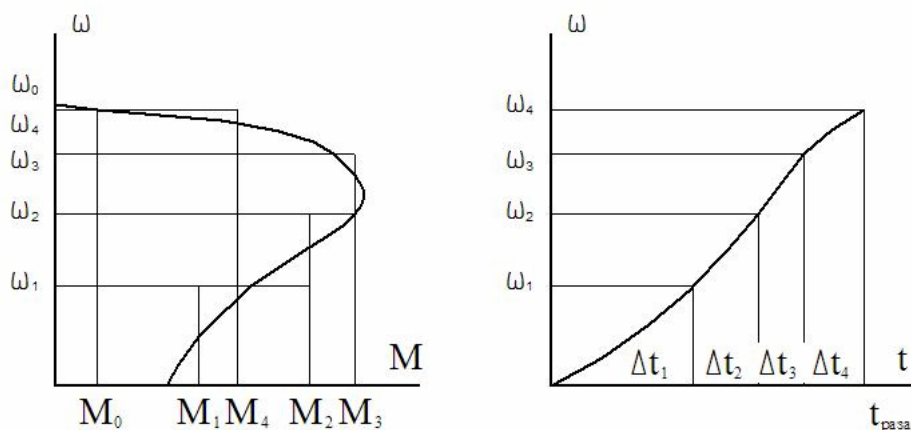


Рис. 14. Механическая характеристика и график разгона электродвигателя

Определяют время разгона двигателя на каждом участке

$$\Delta t_1 = \frac{J}{M_{вр1} - M_c} (\omega_1 - 0); \quad \Delta t_2 = \frac{J}{M_{вр1} - M_c} (\omega_2 - \omega_1) \text{ и т.д.}$$

Момент инерции всех вращающихся частей станка J , приведенный к валу электродвигателя, считать равным удвоенному моменту инерции ротора электродвигателя (взять по каталогу или подсчитать приближенно по геометрии ротора). Так как двигатель разгоняется на холостом ходу, то момент сопротивления, равный моменту трения вращающихся частей, принять равным 20 % от номинального момента электродвигателя.

Остановка двигателя осуществляется при его вращении на холостом ходу

$$\Delta t_{ост} = \frac{J}{M_c} \omega_4.$$

Начертить в масштабе графики изменения скорости вращения двигателя во времени при пуске и остановке электродвигателя.

Курсовая работа выполняется на листах формата А4 (монтажная схема – А3) и должна содержать:

Лист 1. Расположение электрооборудования привода сверла и стола.

Лист 2. Электрическая схема силовой цепи.

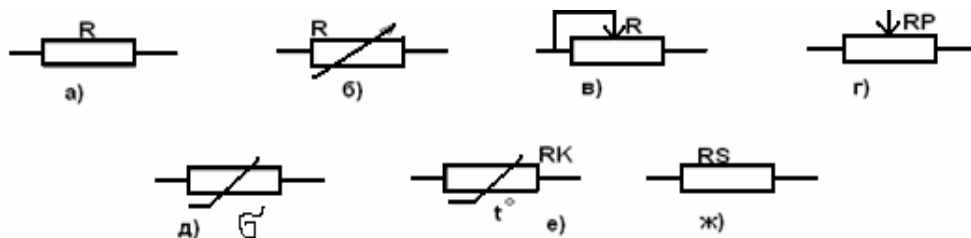
Лист 3. Электрическая схема управления.

Лист 4. Электрическая схема соединений (монтажная схема).

Лист 5, 6. Пояснительная записка с объяснением принципа работы электрической схемы станка, выбора мощности электродвигателя, расчетом времени разгона и остановки электродвигателя сверла.

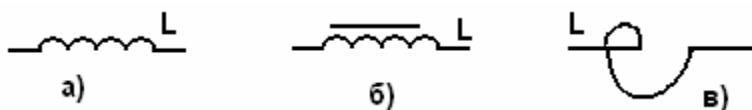
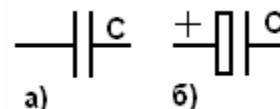
Лист 7. Спецификация электрооборудования.

УСЛОВНЫЕ ГРАФИЧЕСКИЕ И БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ



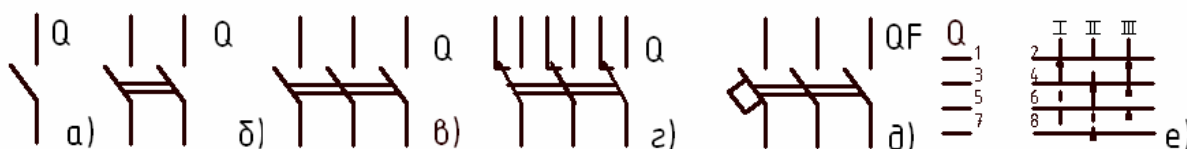
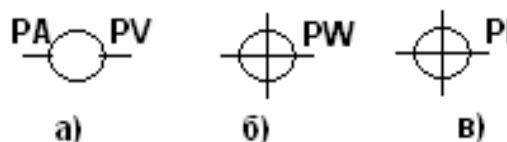
Резисторы – R: *а* – постоянный; *б* – переменный; *в* – переменный в реостатном включении; *г* – потенциометр; *д* – тензорезистор; *е* – терморезистор; *ж* – шунт измерительный

Конденсаторы – C: *а* – общее обозначение; *б* – электролитический

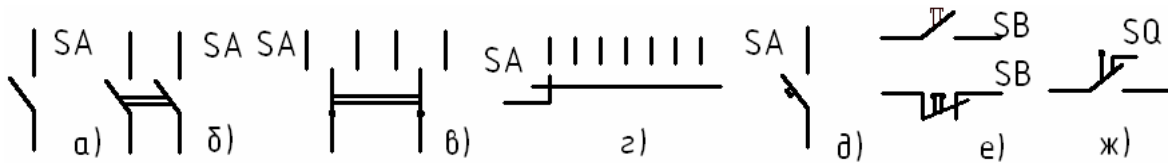


Катушки индуктивности – L: *а* – без магнитопровода; *б* – реактор, дроссель с магнитопроводом; *в* – реактор

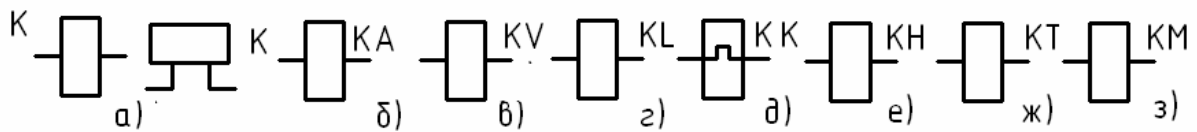
Приборы измерительные – P:
а – амперметр PA, вольтметр PV, омметр PR; *б* – ваттметр PW;
в – счетчик активной энергии PI



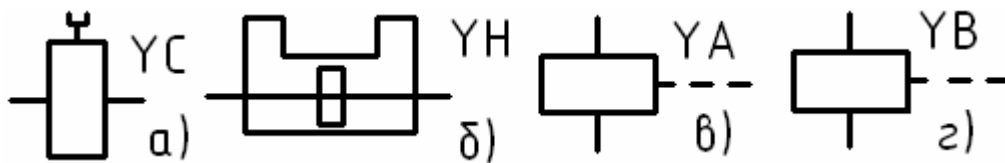
Выключатели в силовых цепях: *а* – однополюсный; *б* – двухполюсный; *в* – трехполюсный; *г* – переключатель трехполюсный; *д* – автоматический выключатель (автомат); *е* – пакетный переключатель четырехконтактный, трехпозиционный



Выключатели, переключатели в слаботочных цепях – S: *a* – однополюсный; *б* – двухполюсный; *в* – трехпозиционный с нейтральным положением; *г* – однополюсный, многоконтактный; *д* – автоматический выключатель; *е* – выключатель кнопочный с замыкающим и размыкающим контактом; *ж* – переключатель путевой



Катушки электромагнитных реле, контакторов – K: *a* – общее обозначение; *б* – реле тока; *в* – реле напряжения; *г* – промежуточное реле; *д* – тепловое реле; *е* – указательное реле; *ж* – реле времени; *з* – контактор



Устройства механические с электромагнитным приводом – Y – электромагнитные: *a* – муфта; *б* – плита; *в* – привод; *г* – тормоз



В Преобразователи неэлектрической величины в электрическую, датчики – В: давления ВР; скорости ВV; частоты вращения ВR; фотоэлемент ВL; сельсин ВС



HA
а)

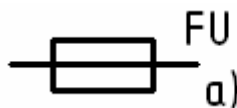


или
б)

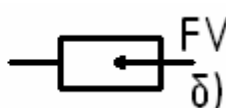


HL

Устройства сигнализаций – Н:
a – звонок

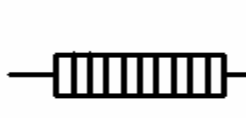


FU
а)

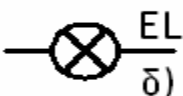


FV
б)

Разрядники, предохранители – F:
a – предохранитель плавкий;
б – разрядник

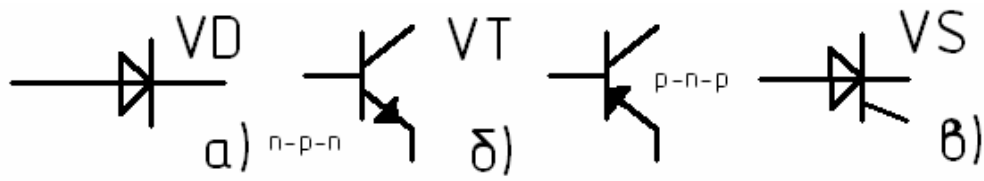


EK
а)

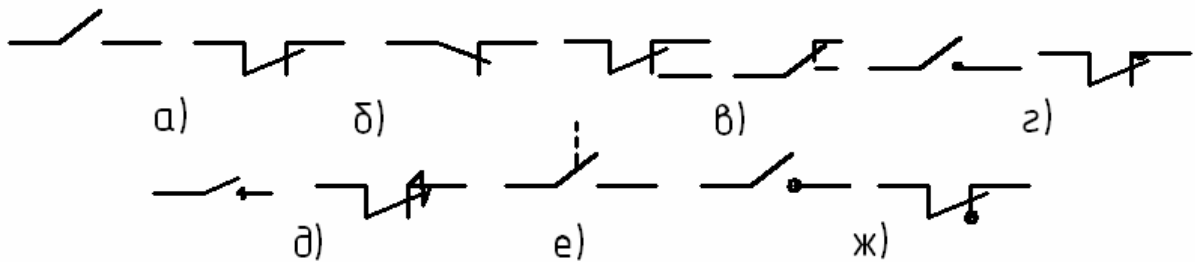


EL
б)

Элементы разные – E: *a* – элемент нагревательный; *б* – лампа осветительная

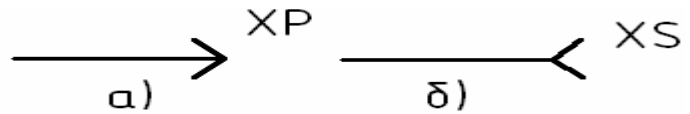


Приборы полупроводниковые –V: *a* – диод; *b* – транзистор; *v* – тиристор

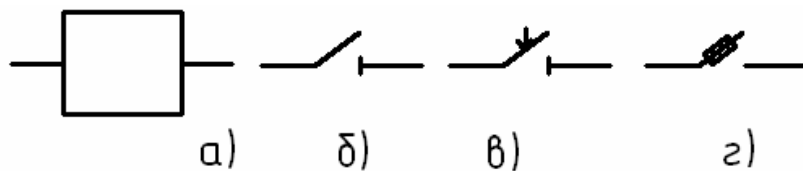


Контакты реле (контактора, тумблера, кнопки): *a* – замыкающий; *б* – размыкающий; *в* – переключающий; *г* – силовой; *д* – силовой с дугогашением; *е* – с механической связью; *ж* – без самовозврата

Контактные соединения –X: *a* – штырь; *б* – гнездо

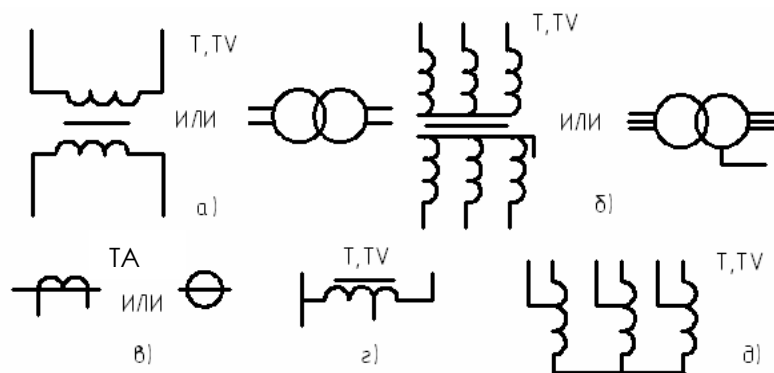


Заземление Корпус

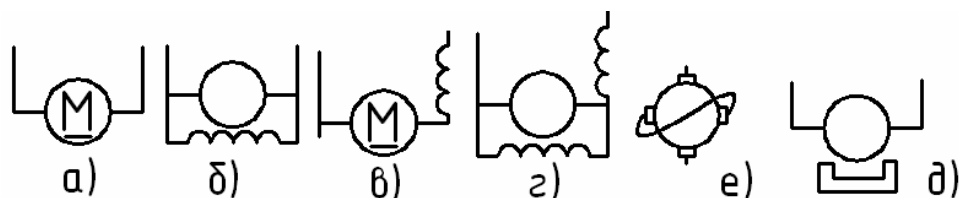


Высоковольтные выключатели, разъединители: *a* – выключатель высокого напряжения; *б* – разъединитель; *в* – короткозамыкатель; *г* – выключатель-предохранитель

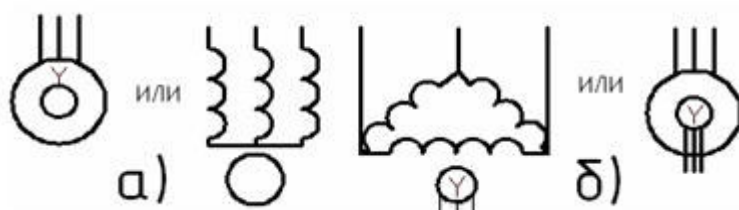
Двигатели – M; генераторы – G. Общее обозначение



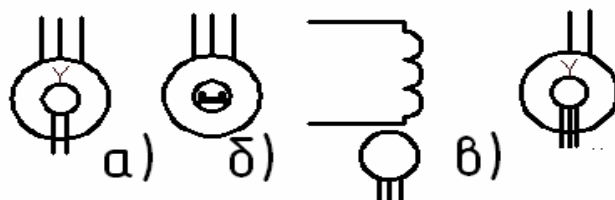
Трансформатор, автотрансформатор – Т; а – однофазный; б – трехфазный;
 в – трансформатор тока; г – автотрансформатор однофазный;
 д – автотрансформатор



Машины постоянного тока: а – независимого возбуждения;
 б – параллельного возбуждения; в – последовательного возбуждения;
 г – смешанного возбуждения; д – с возбуждением от постоянных магнитов;
 е – электромашинный усилитель



Асинхронная машина: а – с короткозамкнутым ротором;
 б – с фазным ротором



Синхронная машина :а –с электромагнитным возбуждением;
 б – с возбуждением от постоянного магнита; в – сельсины (сельсин-датчик,
 сельсин-приемник)

РЕЙТИНГОВАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ

Рейтинговая система предполагает непрерывный контроль и оценку знаний студентов в течение всего семестра.

Эффективность этого метода подтверждается практикой ее применения автором в течение более двух десятков лет.

В настоящее время для студентов машиностроительного факультета контроль организован следующим образом.

Успешное выполнение каждой лабораторной работы и решение задачи на практических занятиях оценивается по десятибалльной системе, причем правильное выполнение и оформление работы оценивается 4-мя баллами, а остальные 6 баллов студент может получить при защите этих работ. Этот контроль либо организовывается в виде персонального собеседования по материалу этой лабораторной работы или задачи, либо проводится фронтально и письменно, с использованием тех индивидуальных задач, которые приведены в УМК.

Студентам предлагается выполнить 7 лабораторных работ и 7 практических задач. Максимальное количество баллов, которое может получить студент в семестре, – 140 (без учета дополнительных баллов). На экзамен выносятся два десятибалльных теоретических вопроса. Таким образом, общее количество баллов – 160, из которых 140 студент может получить в течение семестра.

Для большей заинтересованности в прослушивании лекций студенты могут получить дополнительные баллы (максимум 2) при правильном письменном ответе на простой, но персональный вопрос (вариантов, как правило, 24), который предлагается в конце лекции за 10 – 15 минут до конца занятий. Таких контрольных лекционных задач в семестре может быть 6 – 7. Это еще дополнительно 12 – 14 баллов.

Для получения экзаменационной оценки, например, 7 необходимо набрать минимум $0,7 \cdot 160 = 112$ баллов, 8 – $0,8 \cdot 160 = 128$ баллов и т.д.

Контроль знаний студента в течение семестра стимулирует регулярные занятия, исключает «лотерею» и значительно повышает эффективность учебного процесса.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Паначевный, Б. И. Курс электротехники. – 2-е изд., дораб. / Б. И. Паначевный. – Харьков: Торсинг, 2002. – 287 с.
2. Китунович, Ф. Г. Электротехника : учеб. для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / Ф. Г. Китунович. – Минск : Высш. шк., 1999. – 400 с.
3. Электротехника : учеб. пособие. – 4-е изд., перераб. / А. С. Касаткин [и др.]. – М. : ЭнергATOMиздат, 1983. – 440 с.
4. Липатов, Д. Н. Вопросы и задачи по электротехники для программированного обучения : учеб. пособие для втузов / Д. Н. Липатов. – М. : Энергия, 1973. – 238 с.
5. Сборник задач по электротехнике и основам электроники : учеб. пособие для неэлектротехнических спец. вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. / В. Г. Герасимов [и др.] : под ред. В. Г. Герасимова. – М. : Высш. шк., 1987. – 286 с.
6. Справочник технолога-машиностроителя / под ред. А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. – 4-е изд., перераб. и доп. Т. 2. – М. : Машиностроение, 1985. – 495 с.

Учебное издание

АВДЕЙКО Валерий Порфирьевич

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ
И АППАРАТЫ**

Учебно-методический комплекс
для студентов специальностей 1-36 01 01 «Технология машиностроения»
и 1-36 01 03 «Технологическое оборудование машиностроительного производства»

Редактор *Т. В. Булах*

Дизайн обложки *В. А. Виноградовой*

Подписано в печать 04.02.09 Формат 60x84/16 Бумага офсетная Гарнитура Таймс
Ризография Усл.-печ. л. 15,31 Уч.-изд. л. 15,0 Тираж 140 экз. Заказ 183

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет»

ЛИ № 02330/0133020 от 30.04.04 ЛП № 02330/0133128 от 27.05.04
211440 г. Новополоцк, ул. Блохина, 29