

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Полоцкий государственный университет»

В. П. Авдейко  
А. С. Вершинин  
А. Л. Адамович

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,  
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Учебно-методический комплекс  
для студентов технических специальностей  
неэлектротехнического профиля

В двух частях

Часть 1

**Электротехника**

Новополоцк  
ПГУ  
2012

УДК 621.3+621.38(075.8)  
ББК 31.2я73  
А18

Рекомендовано к изданию  
методической комиссией инженерно-технологического факультета  
в качестве учебно-методического комплекса  
(протокол № 2 от 2.09.2010)

**РЕЦЕНЗЕНТЫ:**

начальник участка по ремонту средств КИП и А  
цеха № 12 ОАО «Нафтан» А. Г. КОВАЛЕВ;  
канд. техн. наук, доцент,  
зав. кафедрой К и Т РЭС УО «ПГУ» Ю. Г. ГРОЗБЕРГ

**Авдейко, В. П.**

А18      Электротехника, основы электроники и электропривод : учеб.-метод.  
комплекс для студентов тех. специальностей неэлектротех. профиля. В 2 ч.  
Ч. 1. Электротехника / В. П. Авдейко, А. С. Вершинин, А. Л. Адамович. –  
Новополоцк : ПГУ, 2012. – 312 с.  
ISBN 978-985-531-212-4.

Включает конспект лекций, индивидуальные контрольные задачи и вопросы  
для защиты лабораторных работ и практических занятий, список литературы.

Предназначен для студентов технических специальностей неэлектротехни-  
ческого профиля.

**УДК 621.3+621.38(075.8)**  
**ББК 31.2я73**

**ISBN 978-985-531-212-4 (Ч. 1)**  
**ISBN 978-985-531-211-7**

© Авдейко В. П., Вершинин А. С., Адамович А. Л., 2012  
© УО «Полоцкий государственный университет», 2012

## Содержание

Введение .....	6
Лекционный курс .....	7
<b>1. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ЗАКОНЫ</b> .....	<b>7</b>
1.1. Электрическое поле и его характеристики .....	7
1.2. Электрический ток .....	9
1.3. Напряжение .....	9
1.4. Сопротивление .....	10
1.5. Плотность электрического тока .....	11
1.6. Источники и приемники электроэнергии .....	12
1.7. Элементы электрической цепи .....	13
1.8. Законы электрической цепи .....	14
1.9. Основные характеристики магнитного поля .....	16
1.10. Закон полного тока .....	17
1.11. Закон Ома для магнитной цепи .....	18
1.12. Принцип работы электромагнитных устройств .....	19
1.13. Закон Ампера. Электромагнитная сила .....	21
1.14. Закон электромагнитной индукции .....	22
Контрольные вопросы и задачи .....	23
<b>2. РАСЧЕТ И АНАЛИЗ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА</b> .....	<b>28</b>
2.1. Расчет по законам Кирхгофа .....	28
2.2. Работа источника на переменную нагрузку .....	29
2.3. Цепь параллельно-последовательного соединения приемников .....	34
2.4. Цепи с несколькими источниками электроэнергии .....	37
2.5. Нелинейные цепи .....	39
Контрольные вопросы и задачи .....	43
<b>3. ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА</b> .....	<b>46</b>
3.1. Получение синусоидальной ЭДС .....	46
3.2. Векторное изображение синусоидальных величин .....	48
3.3. Особенности цепей переменного тока .....	49
3.4. Цепи с идеальными элементами .....	50
3.5. Цепи последовательного соединения элементов .....	53
3.6. Параллельное соединение приемников .....	57
3.7. Фазовращатель .....	58
3.8. Понятие о символическом методе расчета цепей переменного тока .....	59
3.9. Схема замещения электрических приемников .....	62
3.10. Резонанс в электрических цепях .....	64
3.11. Повышение коэффициента мощности .....	65
3.12. Катушка со сталью в цепи переменного тока .....	67
3.13. Магнитные усилители .....	69
Контрольные вопросы и задачи .....	71
<b>4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ</b> .....	<b>74</b>
4.1. Получение трехфазной ЭДС .....	74
4.2. Соединение генератора и приемника звездой .....	76
4.3. Соединение треугольником .....	81
4.4. Мощность трехфазного тока .....	83
Контрольные вопросы и задачи .....	83

5. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ И СХЕМЫ МАКСИМАЛЬНОЙ ТОКОВОЙ ЗАЩИТЫ .....	87
5.1. Аппараты ручного управления .....	87
5.2. Аппараты автоматического управления .....	88
5.4. Максимальная токовая защита электрических цепей .....	93
6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ .....	100
6.1. Общие сведения .....	100
6.2. Принцип действия и устройство приборов .....	101
6.3. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов .....	106
6.4. Измерение электрических величин .....	107
6.5. Электрические измерения неэлектрических величин .....	115
Контрольные вопросы и задачи .....	120
7. ТРАНСФОРМАТОРЫ .....	124
7.1. Назначение трансформатора .....	124
7.2. Принцип действия трансформатора .....	124
7.3. Устройство трансформатора .....	126
7.4. Трансформаторы в режиме холостого хода .....	127
7.5. Нагрузочный режим трансформатора .....	129
7.6. Векторная диаграмма трансформатора .....	131
7.7. Автотрансформаторы .....	132
7.8. Трехфазные трансформаторы .....	133
7.9. Многообмоточные трансформаторы .....	136
7.10. Согласующий трансформатор .....	137
7.11. Измерительные трансформаторы .....	137
7.12. Сварочные трансформаторы .....	139
Контрольные вопросы и задачи .....	139
8. МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА .....	142
8.1. Устройство машины постоянного тока .....	142
8.2. ЭДС обмотки якоря и электромагнитный момент .....	144
8.3. Режим генератора .....	145
8.4. Режим двигателя .....	147
8.5. Механические характеристики электродвигателя .....	148
8.6. Регулирование скорости вращения двигателя .....	150
8.8. Анализ работы электродвигателя .....	153
8.9. Пуск в ход двигателя постоянного тока .....	157
8.10. Схема подключения двигателей постоянного тока к сети .....	158
8.11. Исполнительные двигатели постоянного тока .....	159
8.12. Тахогенераторы постоянного тока .....	160
8.13. Высокмоментные двигатели постоянного тока .....	161
Контрольные вопросы и задачи .....	161
9. АСИНХРОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ .....	166
9.1. Образование вращающегося магнитного поля .....	166
9.2. Устройство асинхронного двигателя .....	170
9.3. Принцип действия асинхронного двигателя .....	172
9.4. Электромеханическая и механическая характеристики асинхронного двигателя .....	173
9.5. Номинальные параметры .....	175
9.6. Регулирование скорости вращения двигателя .....	177
9.7. Пуск в ход асинхронного двигателя .....	179
9.8. Тормозные режимы асинхронного двигателя .....	179
9.9. Однофазные и двухфазные асинхронные двигатели .....	180
9.10. Включение трехфазного асинхронного двигателя в однофазную цепь .....	184
9.11. Сельсины .....	185

9.12. Поворотные (вращающиеся) трансформаторы .....	188
9.13. Асинхронный тахогенератор .....	189
Контрольные вопросы и задачи .....	191
<b>10. Синхронные машины .....</b>	<b>196</b>
10.1. Устройство синхронных машин .....	196
10.2. Работа синхронной машины в режиме генератора .....	197
10.3. Работа синхронной машины в режиме двигателя .....	198
10.4. Работа синхронной машины параллельно с сетью .....	199
10.5. Пуск в ход синхронного двигателя .....	201
10.6. Синхронные машины малой мощности .....	202
Контрольные вопросы и задачи .....	209
<b>МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ</b>	
<b>ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ .....</b>	<b>211</b>
Общие положения.....	211
Лабораторная работа № 1	
<b>Исследование системы: источник питания – линия передачи – нагрузка ....</b>	<b>217</b>
Лабораторная работа № 2	
<b>Изучение и испытание аппаратов ручного и автоматического управления .</b>	<b>221</b>
Лабораторная работа № 3	
<b>Тепловая защита электрических цепей .....</b>	<b>224</b>
Лабораторная работа № 4	
<b>Максимальная токовая защита электрических цепей .....</b>	<b>228</b>
Лабораторная работа № 5	
<b>Параллельное соединение приемников .....</b>	<b>236</b>
Лабораторная работа № 6	
<b>Исследование трехфазных цепей .....</b>	<b>240</b>
Лабораторная работа № 7	
<b>Маркировка выводов обмоток трехфазного трансформатора</b>	
<b>и асинхронного двигателя .....</b>	<b>244</b>
Лабораторная работа № 8	
<b>Пуск в ход асинхронного двигателя с помощью магнитного пускателя .....</b>	<b>249</b>
Лабораторная работа № 9	
<b>Реверсивное управление трехфазным асинхронным двигателем .....</b>	<b>254</b>
Лабораторная работа № 10	
<b>Исследование рабочих характеристик асинхронного двигателя .....</b>	<b>258</b>
Лабораторная работа № 11	
<b>Повышение коэффициента мощности</b>	
<b>при активно-индуктивной нагрузке .....</b>	<b>261</b>
Лабораторная работа № 12	
<b>Включение трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть .....</b>	<b>266</b>
Лабораторная работа № 13	
<b>Автоматическое управление асинхронным двигателем</b>	
<b>в функции пути и времени .....</b>	<b>270</b>
Лабораторная работа № 14	
<b>Разработка схемы автоматического управления</b>	
<b>асинхронным двигателем в функции пути и времени .....</b>	<b>276</b>
Индивидуальные задачи для практических занятий .....	278
Литература .....	311

## 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» к вопросам практической работы технических специальностей неэлектротехнического профиля.

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.

# 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.

Связь между электрическим и магнитным полями можно показать на примере линии электропередачи постоянного тока (рис. 1.1).

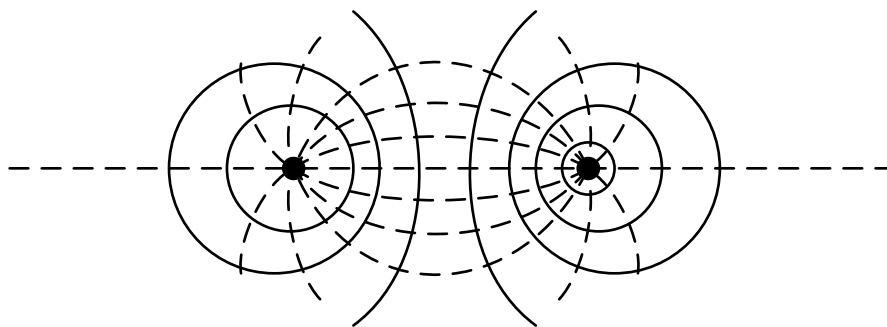


Рис. 1.1. Картина электромагнитного поля линии передач

При передаче энергии в проводах протекает ток, следовательно, в пространстве вокруг тока создается магнитное поле, изображенное с помощью магнитных силовых линий (сплошные линии). Провода находятся под напряжением и разноименно заряжены. Между зарядами возникает электрическое поле (пунктирные линии). Напомним, что силовые линии магнитного поля замкнуты, а силовые линии электрического поля начинаются и оканчиваются на зарядах.

Электрические и магнитные поля связаны между собой, т.к. при изменении напряжения (электрического поля) изменяется ток в линии передачи (магнитное поле).

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.

Основное свойство электрического поля – 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  $\phi$ , 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  $\epsilon$  – 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 нанесения краски в электрическом поле, электронной технике, для электросепарации, 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  $\rho$  – удельное сопротивление материала проводника – сопротивление проводника длиной 1 м и сечением 1 м<sup>2</sup>.

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<sup>2</sup>, а его длина в м.

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

$$g = 1/r$$

или

$$G = 1/R.$$

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 °С, E – 120 °С, B – 130 °С, F – 155 °С, H – 180 °С, C – более 180 °С.

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 А/мм<sup>2</sup>, 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/мм<sup>2</sup>. Для провода с плохими условиями охлаждения (катушки маломощных трансформаторов, обмотки реле, контакторов) следует выбирать плотность тока не более 2 – 3 А/мм<sup>2</sup>. Напротив, спираль оголенной нихромовой проволоки в нагревательных устройствах (электрическая печь, утюг) допускает плотность тока 40 А/мм<sup>2</sup> 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. 1.2, *а*, *б* и *в* показаны соответственно источники постоянного, переменного тока и химический источник (аккумулятор), который имеет другое обозначение.

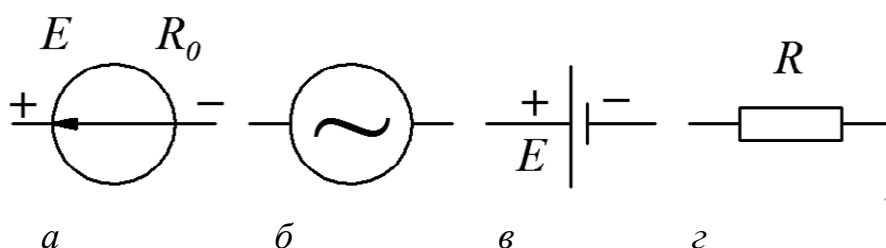


Рис. 1.2. Обозначение источников (*а*, *б* и *в*) и приемников (*г*) электроэнергии

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 генераторов, 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. 1.3).

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:

$$R_0 = (E - U_n) / I_n.$$

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:

$$R = \frac{U_n}{I_n} = \frac{U_n U_n}{I_n U_n} = \frac{U_n^2}{P_n}.$$

На электрических схемах такой приемник обозначают прямоугольником (см. рис. 1.2, 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 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. 1.4 показана электрическая цепь, состоящая из двух источников и шести приемников электроэнергии. Соединительные провода не имеют электрическо-

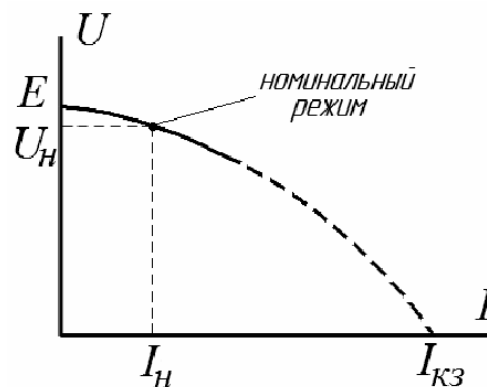


Рис. 1.3. Внешняя характеристика генератора

го 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.

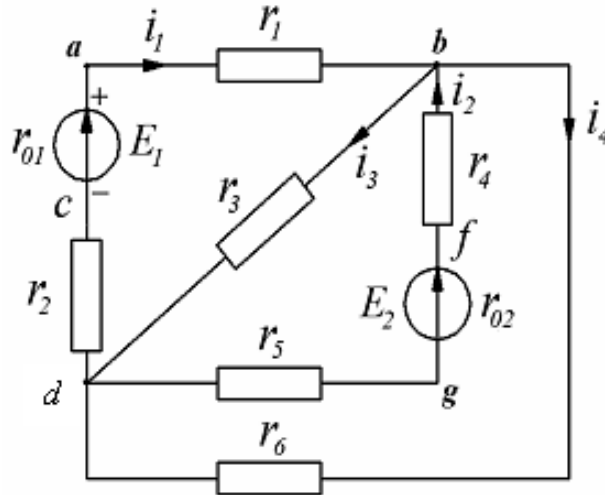


Рис. 1.4. Электрическая цепь

**Контур** – замкнутый путь для электрического тока. На рис. 1.4 таких контуров шесть. Например,  $abdca$ ,  $abfgdca$  и др.

**Ветвь** – неразветвленная часть электрической цепи. На рис. 1.4 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. 1.4 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  $r_1$ ,  $r_3$ ,  $r_4$ ,  $r_6$ .

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  $d$ .

Под **потенциалом** точки понимают напряжение между этой точкой и точкой, потенциал которой принимают равным нулю. Следовательно, по-

тенциал 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. 1.4)

$$i_4 = u_{bd} / r_6,$$

$$i_2 = u_{dg} / r_5 \text{ или } i_2 = u_{fb} / r_4.$$

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  $d$  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 1.4, 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» приписывается ЭДС, совпадающей по направлению с обходом контура, знак «минус» – падению напряжения, если направление тока не совпадает с направлением обхода.

Например, для контура  $abfgdca$ , выбрав направление обхода по часовой стрелке (см. рис 1.4), второй закон Кирхгофа запишем так:

$$E_1 - E_2 = r_1 i_1 - r_4 i_2 - r_0 i_2 - r_5 i_2 + r_2 i_1 + r_0 i_1.$$

## 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),  $\mu$  – 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 1.5, а). Направление тока обозначено крестиком.

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 1.5 показана картина магнитного поля для различных токов и постоянного магнита. Внутри катушки (рис 1.5, в) поле практически однородно.



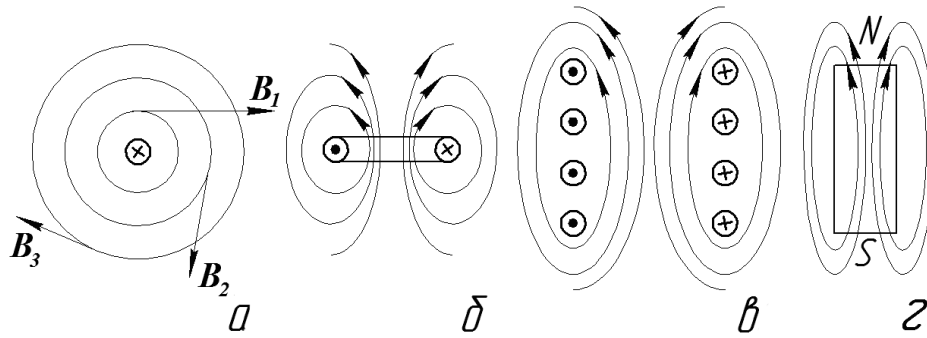


Рис. 1.5. Магнитные силовые линии:

*a* – прямого тока; *б* – кольцевого тока; *в* – катушки с током; *г* – постоянного магнита

Кроме  $B$  и  $H$  ввели понятие магнитного потока  $\Phi$ , 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:

$$\oint_l H dl = I_{\Pi}. \quad (1.10)$$

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

$$Hl = I_{\Pi},$$

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 1.5, в), свернутой в кольцо.

Магнитные силовые линии этого поля будут представлять собой концентрические окружности с центром в точке  $O$  (рис. 1.6).

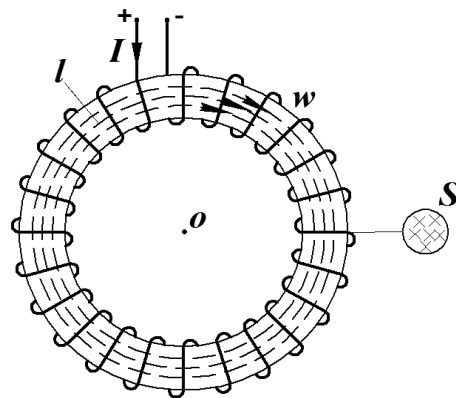


Рис. 1.6. Магнитное поле тороида

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  $Hl = I$ , где  $I$  – полный ток, сцепленный с данным контуром. Используя формулы (1.6) и (1.7), магнитный поток сквозь сечение  $S$  запишем

$$\Phi = BS = \mu_0 \mu H S = \mu_0 \mu \frac{wI}{l} S = \frac{wI}{\frac{l}{\mu_0 \mu} S}, \quad (1.11)$$

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

### 1.11. Закон Ома для магнитной цепи

Тороид (см. рис 1.6) можно считать магнитопроводом, по которому проходит магнитный поток  $\Phi$ . Если обозначить  $F_M = I$ , 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 ( $\Gamma^{-1}$ ). 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. 1.7). Элементарная работа сил поля по перемещению контура с током в магнитном поле

$$dA = Id\psi,$$

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

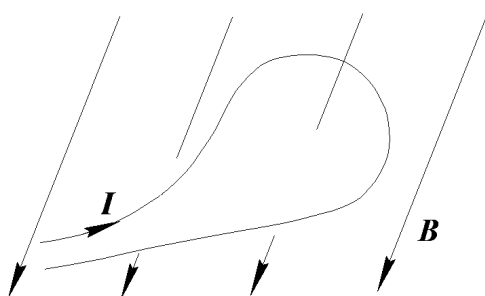


Рис. 1.7. Проводник с током в магнитном поле

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 т.ч. 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 1.8, *a*). Ладонь располагается перпендикулярно к вектору магнитной индукции, четыре пальца ориентируются вдоль направления тока, тогда большой отогнутый палец покажет направление 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.

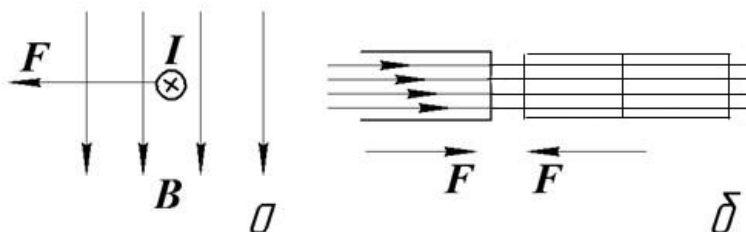


Рис. 1.8. Определение направления электромагнитной силы

Если в магнитопроводе имеется воздушный зазор (см. рис 1.8, 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. 1.9 замкнутый контур находится в магнитном поле постоянного магнита. Если магнитный поток сквозь контур не изменяется, то ЭДС не образуется (рис 1.9, *а*). При увеличении потокосцепления сквозь контур, когда магнит приближается к нему (рис 1.9, *б*), возникает ЭДС такого направления, при котором индуцированный ток создает магнитный поток, направленный навстречу внешнему магнитному потоку (на рисунке магнитный поток, образованный током, показан пунктиром). При удалении постоянного магнита (рис 1.9, *в*) ЭДС меняет свое направление.

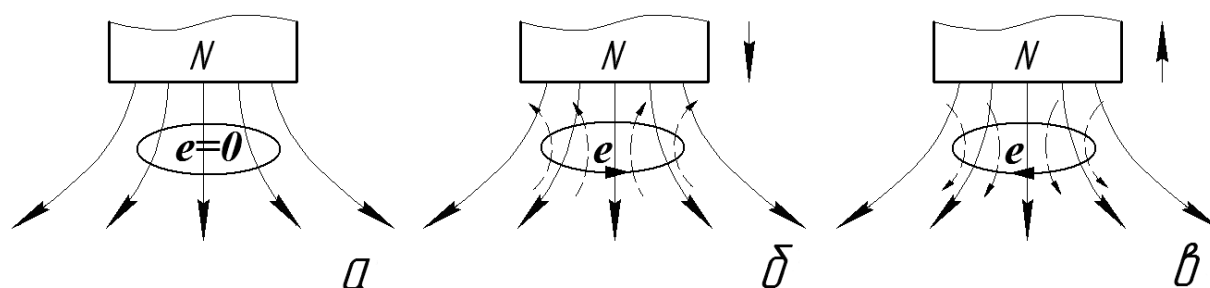


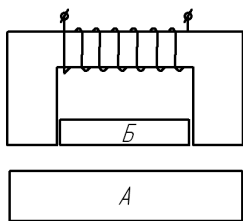
Рис 1.9. Возникновение ЭДС в замкнутом контуре:  
*а* – контур и постоянный магнит неподвижны; *б* – магнит приближается к контуру;  
*в* – магнит удаляется от контура

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?

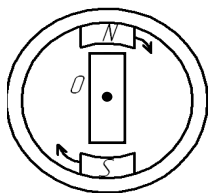
2. Как изменится индуктивность катушки, если внутрь нее поместить стальной сердечник?



3. Как изменится сила, действующая на якорь *A* электромагнита, если между полюсами вставить ферромагнитный брус *B* (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?



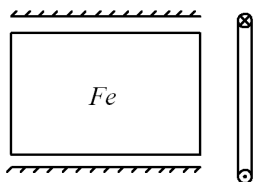
6. Будет ли изменять положение ферромагнитный сердечник, если медленно вращать внешний магнитопровод вокруг оси *O*, перпендикулярной к плоскости рисунка (рис.)?

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?

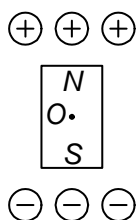
9. Как ведет себя герметизированный разомкнутый контакт (геркон), если к нему поднести постоянный магнит?

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 (рис.)?

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



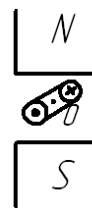
11. Какое положение займет постоянный магнит, находящийся внутри неподвижной катушки с током и имеющий возможность поворачиваться вокруг оси *O*, перпендикулярной к плоскости рисунка (рис.)?



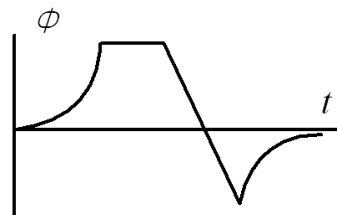
А если постоянный магнит заменить ферромагнетиком такой же формы?

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

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

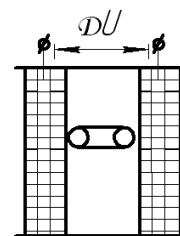


**13.** Как будет изменяться ЭДС, возникающая в рамке, сквозь которую проходит магнитный поток, изменяющийся во времени так, как показано на рисунке?

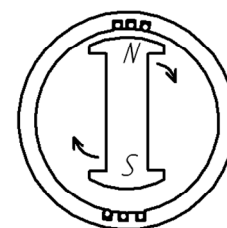


**14.** Будет ли возникать ток в рамке, находящейся внутри соленоида, если его включить в сеть:

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



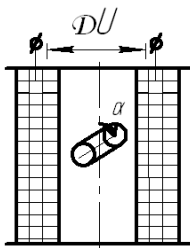
**16.** Будет ли изменяться действующее значение ЭДС, возникающей в контуре, который вращается в однородном магнитном поле вокруг оси, перпендикулярной к вектору магнитной индукции, в зависимости от частоты вращения?

Подсказка:

Магнитный поток сквозь контур площадью  $S_0$ , вращающийся в однородном магнитном поле с индукцией  $B_0$ , с частотой  $\omega$  изменяется по закону:  $\Phi = BS_0 \sin \omega t$ .

**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  $\alpha$ , определяющего положение рамки, находящейся внутри соленоида, который включен в сеть переменного синусоидального тока (рис.)?

**19.** Почему при отключении электрической цепи в месте разрыва, т.е. на размыкающихся 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.

Указание:

При транспортировке и тряске рамка будет поворачиваться в ту или иную сторону, в результате чего магнитный поток сквозь рамку будет изменяться и, следовательно, в рамке будет возникать ЭДС. Под действием этой ЭДС в рамке однонаправлено будет возникать ток.

Показать, что возникающие при этом электромагнитные силы будут создавать момент, направленный в сторону, противоположную движению рамки и тем самым предотвращать резкие колебания рамки.

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

Ответ:

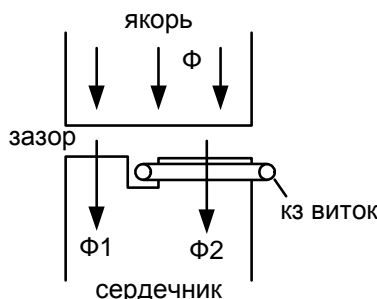
В электромагнитах переменного тока (реле, контакторов) магнитопровод состоит из подвижной части (якоря) и неподвижной части (сердечника), между которыми существует (он необходим) воздушный зазор. При включении катушки в сеть переменного тока возникает переменный магнитный поток, благодаря которому возникает электромагнитная сила пропорциональная квадрату магнитной индукции

$$(F = B_0^2 S / 2\mu_0).$$

Эта переменная сила притяжения якоря к сердечнику будет изменяться, вызывая вибрацию якоря с двойной частотой.

Для уменьшения звуковой вибрации часть магнитопровода сердечника охватывается короткозамкнутым витком из толстого медного провода (рис.).

Основной магнитный поток  $\Phi$  в сердечнике раздваивается. Часть переменного потока, пронизывая короткозамкнутый виток, наводит в нем



ЭДС, под действием которого возникает ток. Индукционный ток короткозамкнутого витка создает магнитный поток. Но потоки  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  будут сдвинуты во времени. Конструктивными способами добиваются того, чтобы эти потоки были равны и сдвинуты во времени на четверть периода. Тогда  $\Phi_1 = \Phi_m \sin \omega t$ ,  $\Phi_2 = \Phi_m \cos \omega t$ . Эти потоки создают электромагнитную силу притяжения якоря к сердечнику пропорционально квадрату магнитного потока.

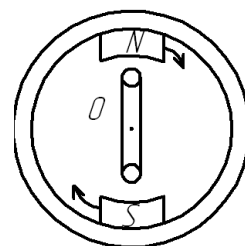
$$F_1 \equiv \Phi_1^2 = \Phi_m^2 \sin^2 \omega t, F_2 \equiv \Phi_2^2 = \Phi_m^2 \cos^2 \omega t.$$

Общая сила притяжения:

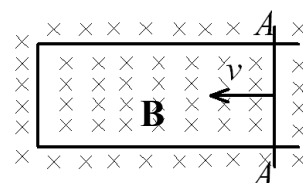
$$F = F_1 + F_2 \equiv (\Phi_m^2 \sin^2 \omega t + \Phi_m^2 \cos^2 \omega t) \equiv \Phi_m^2 (\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t) = \Phi_m^2.$$

Таким образом, сила притяжения  $F$  будет пропорциональна квадрату магнитного потока и не зависит от времени. Следовательно, постоянная сила притяжения не будет вызывать вибрацию, сопровождающуюся характерным гудением электромагнита. Наличие короткозамкнутого витка, охватывающего часть магнитопровода, – признак того, что катушка данного аппарата (электромагнита, реле, контактора) рассчитана на работу в сети переменного тока.

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

**25.** Будет ли перемещаться проводник  $AA$ , лежащий на рельсах, по которым протекает ток, при отсутствии внешнего магнитного поля и если будет, то куда? А если поменять направление тока?

## 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, т.е. 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. 1.4 (см. выше), для определения токов в четырех ветвях составим четыре 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 четырех уравнений с четырьмя 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  $E$ , внутренним сопротивлением  $R_0$  и нагрузки, сопротивление которой может изменяться в широких пределах от бесконечности до нуля (рис. 2.1, а).

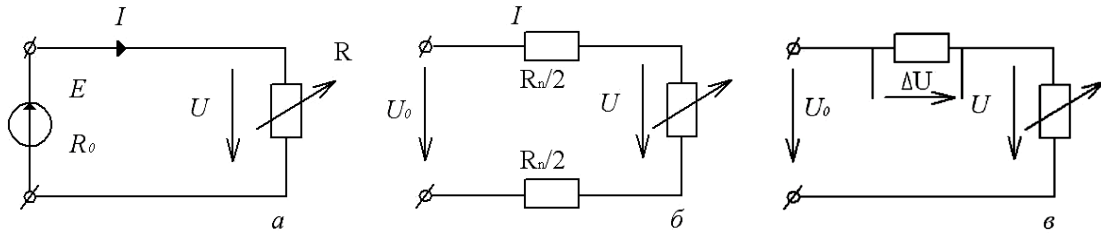


Рис. 2.1. Электрическая цепь (а) и ее схемы замещения (б, в)

Ток во внешней цепи течет от точки высокого потенциала («плюсовая» клемма). Внутри источника, наоборот, – 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 максимального 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  $\Delta U$ , мощность, развиваемая приемником, –  $P$ , источником –  $P_1$ , потеря мощности внутри источника  $\Delta P$  и коэффициент полезного действия  $\eta$  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 построен 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.

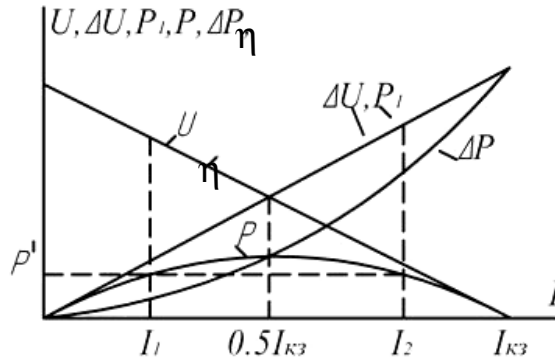


Рис. 2.2. Графики изменения величин

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:

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

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

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

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

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

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-

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

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

$\eta_{кз} = \frac{U_{кз}}{E} = \frac{0}{E} = 0$ . 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 требуется 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  $l$ .

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

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, напротив, – низким напряжением и кпд. Передача энергии высоким напряжением связана с упрочнением изоляции, но зато малый ток требует меньшего сечения 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.

### **Задача**

Выбрать стандартное сечение двухжильного кабеля с бумажной изоляцией и алюминиевыми жилами для питания теплогенератора мощностью 10 кВт и напряжением 220 В, который удален от питающего трансформа-



тора на расстояние  $l = 100$  м. При этом падение напряжения в кабеле не должны превышать 5 % напряжения на нагрузке. Допустимые токовые нагрузки кабеля по нагреву даны в таблице.

Стандартное сечение жилы кабеля, мм <sup>2</sup>	1,5	2,5	4	6	10	16	25	35	50
Допустимая токовая нагрузка, А	–	21	29	38,5	55	70	90	105	135

Решение:

1. Ток, потребляемый нагрузкой, равен току в кабеле:

$$I = \frac{P}{U} = \frac{20 \cdot 10^3}{220} = 45,5 \text{ А.}$$

2. Падение напряжения в линии не должно превышать

$$\Delta U = 0,05 \cdot 220 = 11 \text{ В.}$$

3. Сопротивление кабеля не должно превышать

$$R = \Delta U / I = 11 / 45,5 = 0,242 \text{ Ом.}$$

4. Сечение жилы кабеля должно быть не менее

$$S = \frac{\rho \cdot 2l}{R} = \frac{0,0175 \cdot 2 \cdot 100}{0,242} = 14,5 \text{ мм}^2,$$

где  $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \frac{\text{мм}^2}{\text{м}}$  – удельное сопротивление алюминия;

$2l$  – общая длина жилы кабеля.

5. Выбираем ближайшее большее стандартное сечение жилы  $S = 16 \text{ мм}^2$ , при этом кабель по нагреву допускает ток 70 А, следовательно, ток, потребляемый теплогенератором, 45,5 А не вызовет перегрев кабеля.

Если бы расстояние между трансформатором и нагрузкой было не более 40 м, то сечение жилы кабеля 5,8 мм<sup>2</sup> уже обеспечивало бы падение напряжения в кабеле не более 11 В.

Но при стандартном сечении жилы 6 мм<sup>2</sup> допустимый ток по условию нагрева (38 А) меньше рабочего тока 45,5 А. Поэтому необходимо принять большее сечение (10 мм<sup>2</sup>), допустимый ток которого (55 А) превышает ток нагрузки (45,5 А).

Обычно только по условию нагрева выбирают кабель, если между источником питания (трансформатором) и нагрузкой небольшое расстояние, например, в пределах одного цеха какого-либо предприятия. В этом случае падение напряжения и потеря мощности в кабеле незначительны.

Если приемник удален от источника на значительное расстояние, что часто бывает в сельских условиях, то сечение жилы кабеля или воздушной

линии в первую очередь необходимо выбрать по допустимому падению напряжения и проверить его по нагреву.

Передача энергии на очень большие расстояния осуществляется с помощью повышающих трансформаторов, т.к. сечение провода, выбранного по потере мощности (напряжения), обратно пропорционально квадрату напряжения.

## 2.3. Цепь параллельно-последовательного соединения приемников

### 2.3.1. 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  $R_{25} = R_2 + R_5$  (рис. 2.3, *б*), а параллельное со-

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

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, т.к. потенциал точки *а* выше потенциала точки *в*, точки *в* – точки *д* и точки *д* – точки *ф*.

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

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

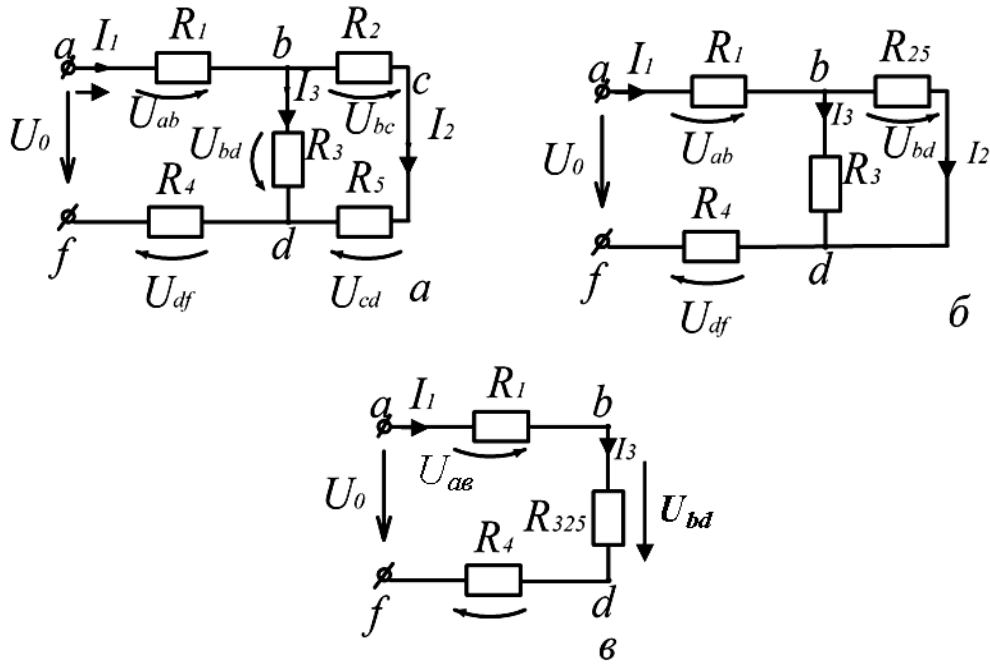


Рис. 2.3. Электрическая цепь (а), б и в – преобразованные цепи

Если требуется определить напряжение между любыми точками схемы, например,  $U_{bf}$ , необходимо перемещаться от точки **b** к точке **f** по любому контуру 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  $\phi_f > \phi_b$ .

### 2.3.2. Метод подобия

В линейных цепях с одним источником тока связь между током на любом участке цепи и напряжением на этом участке также линейная. Это означает, что если напряжение источника увеличить (уменьшить) в  $k$  раз, то токи во всех ветвях и напряжения на всех участках также увеличатся (уменьшатся) в  $k$  раз. Это позволяет задаться произвольным значением тока или напряжения в любой части цепи (обычно на участке наиболее удаленным от источника) и определить напряжения и токи на других соседних участках, приближаясь к источнику питания.

После определения напряжения источника  $U'_0$  сравнивают его с заданным значением  $U_0$  и вычисляют коэффициент подобия  $k = U_0 / U'_0$ . За-

тем, умножая все токи и напряжения на этот коэффициент, определяют действительные напряжения и токи на всех участках цепи.

В качестве примера рассчитаем цепь параллельно-последовательного соединения резисторов с одним источником тока (см. рис. 2.3, *a*), в котором  $R_1 = R_4 = 0,9 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 1 \text{ кОм}$ ,  $R_3 = R_5 = 2 \text{ кОм}$ ,  $U_0 = 24 \text{ В}$ .

Задаемся током  $I_2' = 1 \text{ мА}$ .

Напряжения на резисторах  $R_2$  и  $R_3$ :

$$U_{bc}' = R_2 \cdot I_2' = 1 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 1 \text{ В},$$

$$U_{cd}' = R_5 \cdot I_2' = 2 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 10^{-3} = 2 \text{ В}.$$

Напряжение на резисторе  $R_3$ :

$$U_{bd}' = U_{bc}' + U_{cd}' = 1 + 2 = 3 \text{ В}.$$

Ток в резисторе  $R_3$ :

$$I_3' = U_{bd}' / R_3 = 3 / 2 \cdot 10^{-3} = 1,5 \cdot 10^{-3} = 1,5 \text{ мА}.$$

Ток источника, равный току в резисторах  $R_1$  и  $R_4$ :

$$I_1' = I_3' + I_2' = 1,5 + 1 = 2,5 \text{ мА}.$$

Падение напряжения на резисторах  $R_1$  и  $R_4$ :

$$U_{ab}' = R_1 I_1' = 0,9 \cdot 10^3 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 2,25 \text{ В},$$

$$U_{df}' = R_4 I_1' = 0,9 \cdot 10^3 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3} = 2,25 \text{ В}.$$

Напряжение источника:

$$U_0' = U_{ab}' + U_{bd}' + U_{df}' = 2,25 + 3 + 2,25 = 7,5 \text{ В}.$$

Коэффициент подобия:

$$k = U_0 / U_0' = 24 / 7,5 = 3,2.$$

Действительные значения токов и напряжений:

$$I_1 = k \cdot I_1' = 3,2 \cdot 2,5 = 8 \text{ мА},$$

$$I_2 = k \cdot I_2' = 3,2 \cdot 1 = 3,2 \text{ мА},$$

$$I_3 = k \cdot I_3' = 3,2 \cdot 1,5 = 4,8 \text{ мА}.$$

$$U_{ab} = k U_{ab}' = 3,2 \cdot 2,25 = 7,2 \text{ В},$$

$$U_{bd} = k U_{bd}' = 3,2 \cdot 3 = 9,6 \text{ В},$$

$$U_{bc} = k U_{bc}' = 3,2 \cdot 1 = 3,2 \text{ В},$$

$$U_{cd} = k U_{cd}' = 3,2 \cdot 2 = 6,4 \text{ В}.$$

Легко убедиться в правильности результатов, если рассчитать эту цепь методом преобразования.

## 2.4. Цепи с несколькими источниками электроэнергии

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

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 уравнивающий ток  $I' = (E_1 - E_2) / (R_{o1} + R_{o2})$ , который может достигать большой величины.

Задачу можно решать, используя законы Кирхгофа, но решение будет наглядней, если воспользоваться внешними характеристиками источников (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.

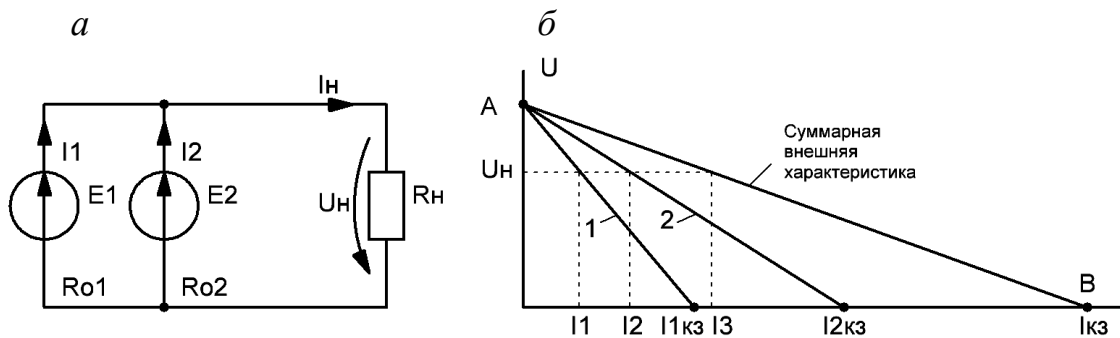


Рис. 2.4. Цепь с двумя источниками, работающими на нагрузку (а); внешние характеристики источников (б)

Если два источника заменить одним эквивалентным, то его внешнюю характеристику можно построить, складывая токи при различных значениях напряжений, одинаковых для обоих источников.

Так как эти характеристики линейны, то внешнюю характеристику эквивалентного генератора 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, ток  $I_{кз} = I_{1кз} + I_{2кз}$  (точка В), где  $I_{1кз} = E/R_{o1}$ , а  $I_{2кз} = E/R_{o2}$ .

При рабочем напряжении  $U_H$ , которое можно рассчитать с помощью законов Кирхгофа, ток нагрузки  $I_H$  создается двумя источниками. Ток на-

грузки справедливо распределяется между источниками. Маломощный источник отдает в цепь нагрузки меньший ток  $I_1$ , 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.**

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  $U_0 > E$ .

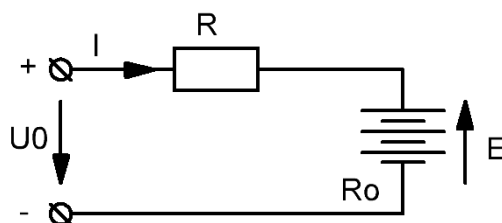


Рис. 2.5. Электрическая цепь зарядки аккумулятора

По второму закону Кирхгофа  $U_0 - E = (R + R_0)I$ , откуда  $I = \frac{U_0 - E}{R + R_0}$ .

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,  $R_0$ .

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  $R \gg R_0$ , то зарядный ток  $I \approx \frac{U_0}{R}$  практически не зависит от изменения ЭДС аккумулятора в процессе зарядки, однако при

этом КПД устройства резко падает, т.к. 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 (ВАХ) (зависимость между током и напряжением) таких элементов является нелинейной, и цепи с элементами переменного сопротивления – нелинейные.

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

Последовательное соединение НЭ заменяют одним эквивалентным. ВАХ эквивалентного элемента строится по точкам. Задаваясь произвольным значением тока в этих НЭ, складывают напряжения (рис. 2.6, а).

По заданному общему напряжению  $U_0$  и эквивалентной ВАХ определяет ток в цепи  $I_0$ , а по нему – напряжения на отдельных НЭ.

При параллельном соединении НЭ эквивалентная ВАХ строится также по точкам, но токи складывают при фиксированном напряжении (рис. 2.6, б).

По заданному напряжению  $U_0$  и ВАХ определяют токи во всех ветвях.

При смешанном соединении приемников и элементов последовательными преобразованиями приводят 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 ВАХ.

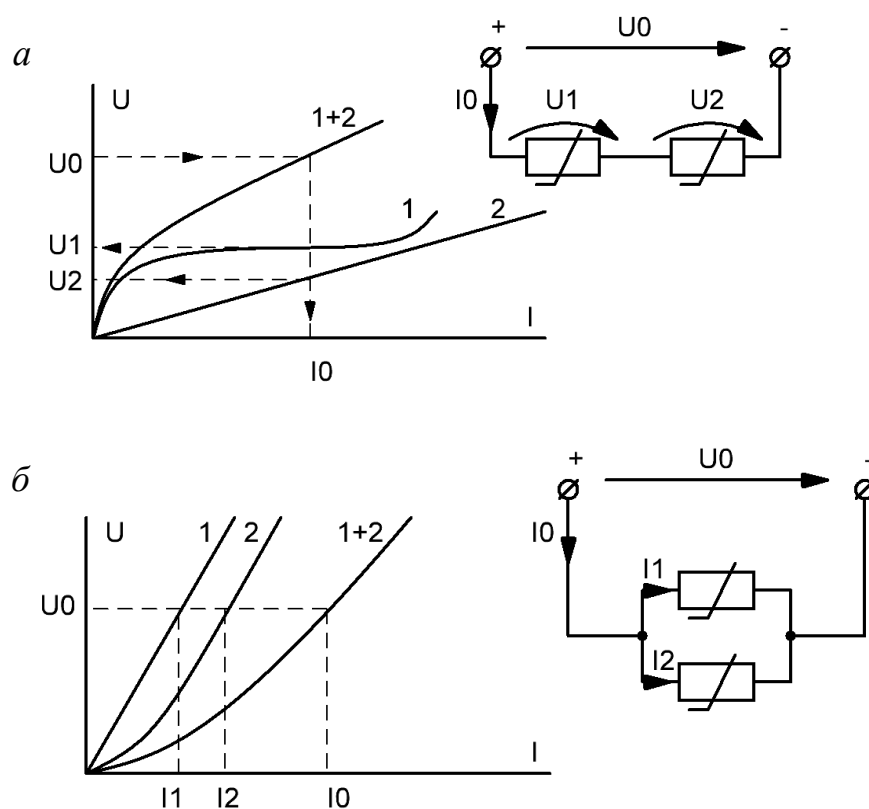


Рис. 2.6. Схемы соединения нелинейных элементов и их ВАХ:  
 а – при последовательном соединении НЭ; б – при параллельном соединении НЭ

В схемах промышленной электроники часто можно встретить схему последовательного соединения резистора и нелинейного элемента (транзистора), изображенную на рис. 2.7, а.

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

На рис. 2.7, 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  $R_b$ .

Чтобы не делать дополнительных построений, строят не эквивалентную вольтамперную характеристику последовательного соединения, а ли-



нию 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.

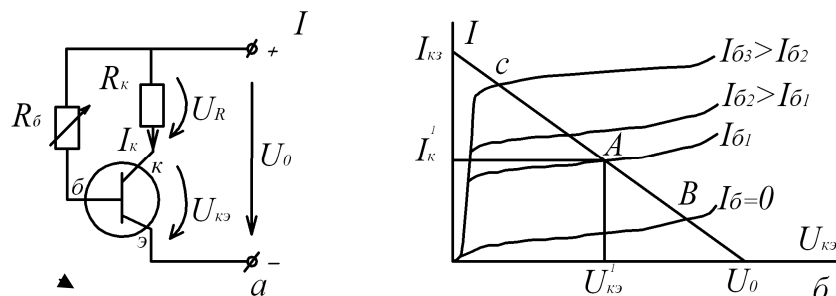


Рис. 2.7. Схема усилителя постоянного тока (а); выходные характеристики транзистора (б)

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 –  $I_{кз} = U_0 / R_k$  (режим короткого замыкания), а напряжение на транзисторе  $U_{кэ} = R_{кэ} I_{кз} = 0$ , т.к.  $R_{кэ} = 0$ .

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 к точке 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. 2.8, а показана схема стабилизатора, рис. 2.8, б – его вольтамперная характеристика.

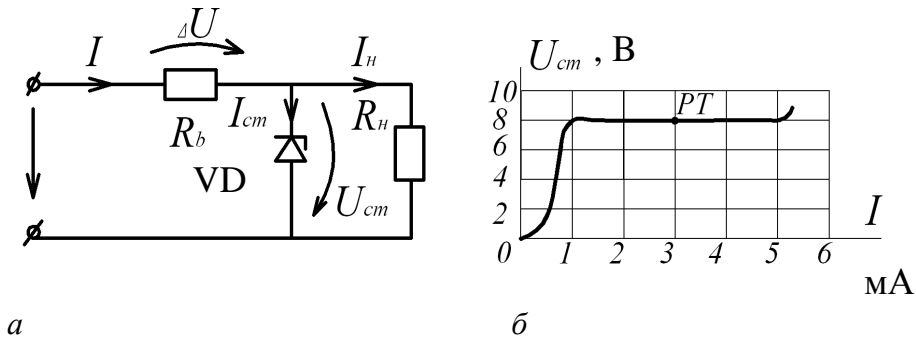


Рис. 2.8. Схема (а) стабилизатора и вольтамперная характеристика (б) стабилитрона

### Задача

Определить интервал входного напряжения, при котором возможна стабилизация выходного напряжения нагрузки, если  $U_{\text{ex}} = 32 \text{ В}$ , а ток нагрузки  $I_n = 9 \text{ мА}$ . 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  $I_{\text{cm}} = 3 \text{ мА}$ , а выходное стабилизированное напряжение равно  $8 \text{ В}$ .

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

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

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

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

6. Крайние значения входного напряжения режима стабилизации:

$$U' = \Delta U' + U_{\text{cm}} = 20 + 8 = 28 \text{ В},$$

$$U'' = \Delta U'' + U_{\text{cm}} = 28 + 8 = 36 \text{ В}.$$

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

Стабилизация выходного напряжения может осуществляться не только при изменении входного напряжения, но и при изменении тока на-

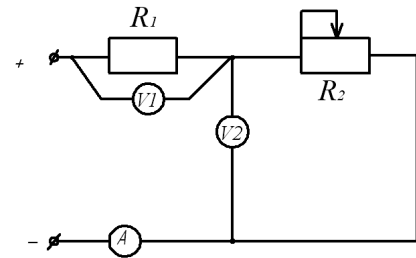
грузки. При заданном входном напряжении  $U = 32 \text{ В}$  и выбранном балластном сопротивлении режим стабилизации будет иметь место только при общем токе  $I = 12 \text{ мА}$ , а т.к. ток стабилитрона может изменяться от  $1 \text{ мА}$  до  $5 \text{ мА}$ , то ток нагрузки – от  $I'_н = I - I'_{cm} = 12 - 1 = 11 \text{ мА}$  до  $I''_н = I - I''_{cm} = 12 - 5 = 7 \text{ мА}$ , т.е.  $I_н = 9 \pm 2 \text{ мА}$ .

### Контрольные вопросы и задачи

1. Как составить из резисторов сопротивлением  $10 \text{ кОм}$  сборку  $15 \text{ кОм}$ ?

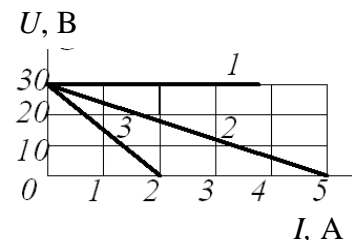
2. Электромагнитное реле рассчитано на напряжение  $24 \text{ В}$  и при этом потребляет ток  $40 \text{ мА}$ . Определить величину и мощность сопротивления, с помощью которого данное реле можно было бы включать в сеть  $110 \text{ В}$ . Составить вычисленное сопротивление из двухваттных резисторов сопротивлением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

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

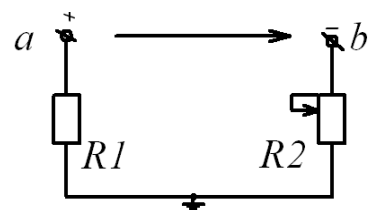


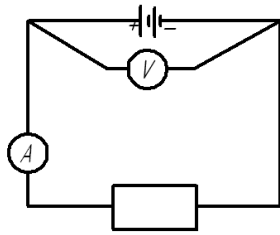
4. Что покажет вольтметр, который ошибочно включен как амперметр последовательно в цепь, состоящую из источника и приемника?

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 (рис.)?

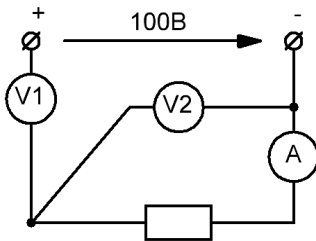




7. Определить показания вольтметра при отключенной нагрузке, если при токе нагрузки 5 А вольтметр показывал 48 В, а при токе 10 А показывал 46 В (рис.).

Ответ: 50 В.

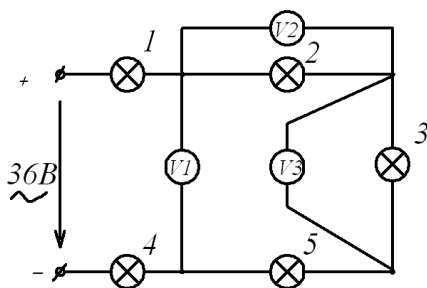
8. Как следует соединить две одинаковые спирали, чтобы получить наибольший тепловой эффект? Нарисовать схему подключения к источнику и привести доказательство.



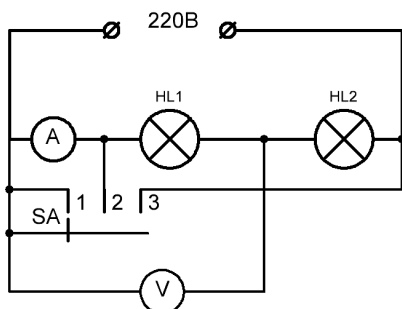
9. Определить и объяснить показания приборов на рисунке

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

11. 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.



12. 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 (рис.).

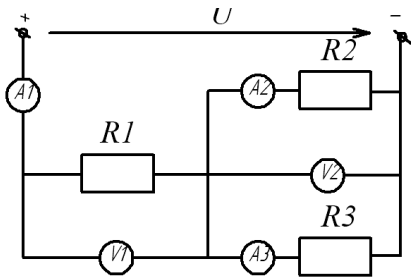


13. Две одинаковые лампы накаливания номинальной мощностью 5 Вт и напряжением 110 В включены последовательно в сеть напряжением 220 В.

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 (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  $R2$  (рис.)?

**16.** Вольтметр, подключенный к зажимам разряженного аккумулятора, показал 11 В, после зарядки – 14 В и в номинальном режиме после зарядки при токе 5 А – 12 В. Определить напряжение источника питания, зарядившего аккумулятор, и величину балластного сопротивления, которое было включено в цепь зарядки, если при начальном зарядном токе 5 А в конце зарядки ток изменился на 20 %.

Ответ: 26 В; 2,6 Ом.

**17.** Какое потребуется минимальное количество резисторов сопротивлением 470 Ом и мощностью 15 Вт и как их следует соединить, чтобы лампочку мощностью 50 Вт и напряжением 220 В включить в сеть напряжением 380 В?

### 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  $\omega$  в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  вокруг оси, перпендикулярной к силовым линиям магнитной индукции (рис. 3.1, а).

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

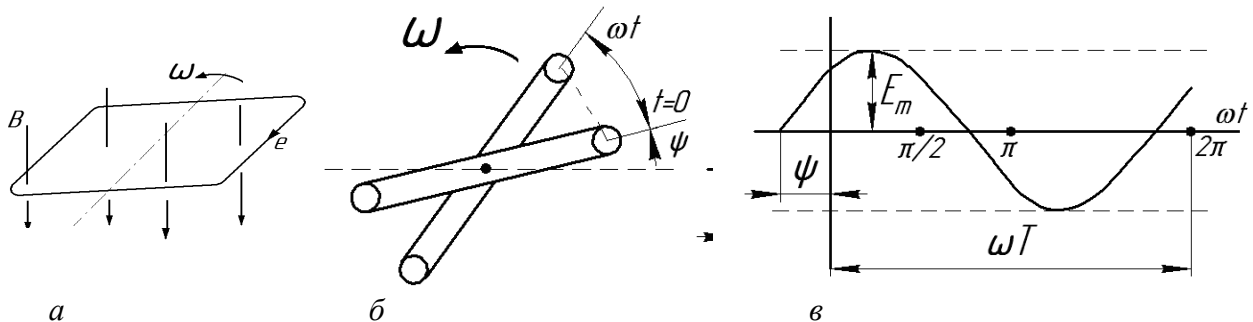


Рис. 3.1. Получение синусоидальной ЭДС:  
а – схема; б – схема в разрезе; в – временная (волновая) диаграмма

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;

$\psi$  – начальная фаза.

На рис. 3.1, в показана временная диаграмма ЭДС. Электродвижущая сила 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  $\omega t$  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  $\omega$ .

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  $2\pi$ .

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

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

В расчетах чаще всего используют так называемые эффективные или действующие значения синусоидальных ЭДС, токов, напряжений и т.д. Если два одинаковых приемника (например, резистора), один из которых включен в сеть переменного синусоидального тока, другой – в цепь постоянного тока, за одно и то же время 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 общеупотребительными 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 пере-

менного тока с напряжением 220 В, т.к. 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, 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).

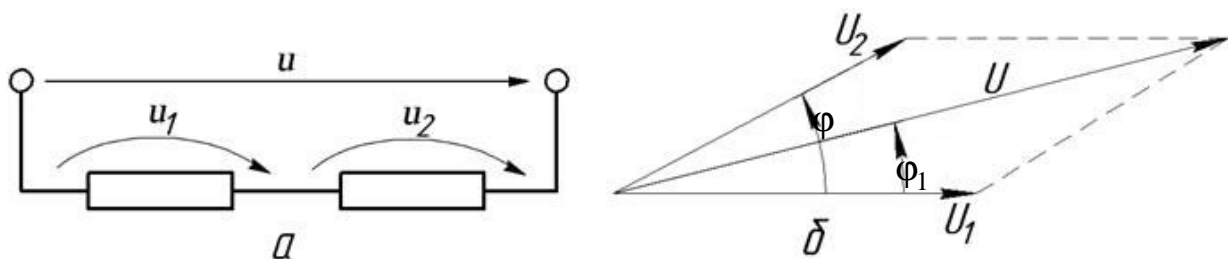


Рис 3.2. Цепь последовательного соединения двух приемников (а), ее векторная диаграмма (б)

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  $\varphi$  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  $\varphi$ . Если 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 определяются не только величина напряжения, но и его фаза. Вектор общего напряжения  $U$  опережает вектор  $U_1$  на угол  $\varphi_1$ . 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 ус-

ловными положительными направлениями токов и напряжений, как и в цепях постоянного тока.

В цепях переменного тока различают три 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, а). 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 (рис. 3.3, б).

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 (рис. 3.3, в). При этом в любой момент времени мощность положительна. Это означает, что в любой момент времени приемник забирает энергию из сети.

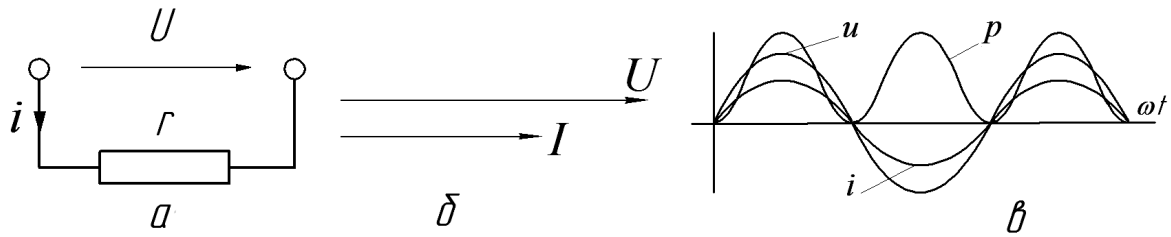


Рис. 3.3. Цепь с активным сопротивлением:  
*a* – электрическая схема; *б* – векторная диаграмма; *в* – волновая диаграмма

### 3.4.2. Цепь с индуктивностью

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

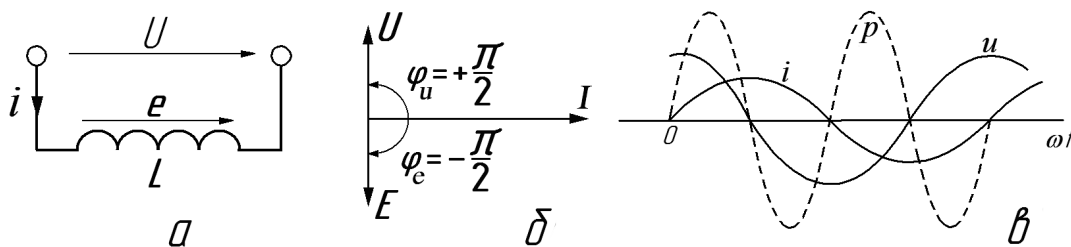


Рис. 3.4. Цепь с индуктивностью:  
*a* – схема; *б* – векторная диаграмма; *в* – волновая диаграмма

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

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

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  $\varphi = \left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) - \omega t = +\frac{\pi}{2}$ , т.е. напряжение опережает ток на  $90^\circ$  (см. рис. 3.4, *б* и *в*), а фазный сдвиг

ЭДС относительно тока равен  $-90^\circ$ . 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 противоЭДС, 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  $q$ ,

$$I = dq/dt = d(Cu)/dt = Cdu/dt = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}),$$

где амплитудное значение тока

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

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

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

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.

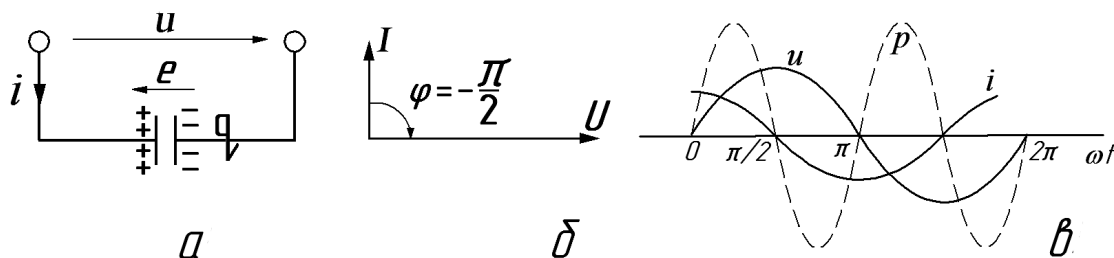


Рис. 3.5. Цепь с емкостью: *a* – схема; *б* – векторная диаграмма; *в* – временная (волновая) диаграмма

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, *a*).

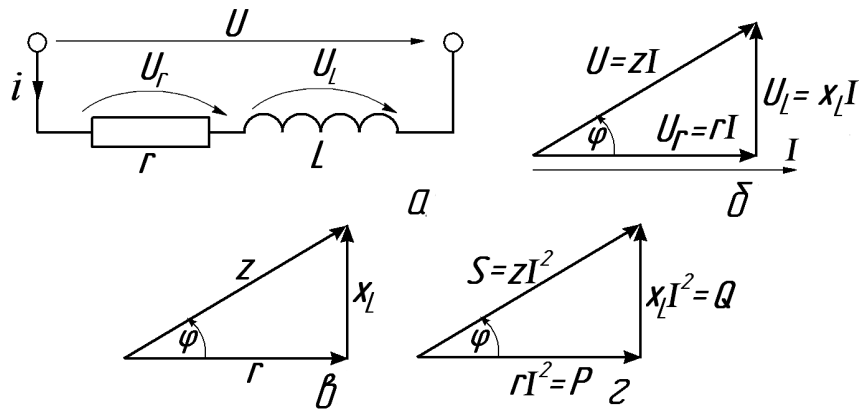


Рис. 3.6. Цепь последовательного соединения  $r$  и  $L$ :  
 $a$  – схема;  $b$  – векторная диаграмма;  $v$  – треугольник сопротивлений;  
 $z$  – треугольник мощностей

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  $90^\circ$ . 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,  $z$ ).

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., т.к. 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.

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

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

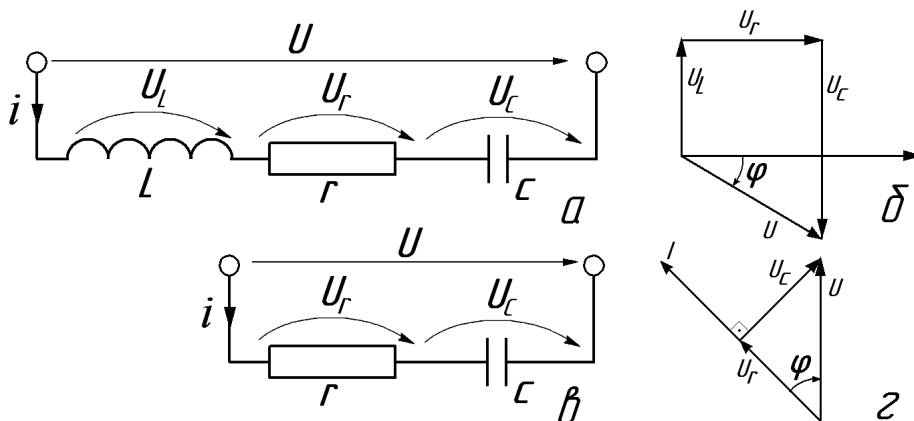


Рис 3.7. Последовательное соединение элементов (а и в) и векторные диаграммы токов и напряжений (б и з)

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

Практический интерес представляет собой случай, когда напряжение источника питания превышает номинальное напряжение приемника. Безусловно, эту задачу можно решить с помощью трансформатора. Кроме того, компенсировать избыточное напряжение можно балластным сопротивлением, расчет которого показан на примере параметрического стабилизатора напряжения (§ 2.5)

В цепях переменного тока задачу можно решить, если вместо балластного сопротивления включить конденсатор.

### Задача

Пусть требуется подобрать конденсатор для питания лампы накаливания мощностью  $P_n = 40$  Вт, напряжением  $U_r = 36$  В от сети напряжением  $U = 220$  В, частотой  $f = 50$  Гц.

Решение:

Так как лампа накаливания представляет собой активную нагрузку, то расчетная схема и векторная диаграмма соответствует рис. 3.7, в и з. Номинальный ток лампы накаливания:

$$I = P_n / U_r = 40 / 36 = 1,11 \text{ А.}$$

Активное сопротивление лампы накаливания:

$$r = U_r / I = 36 / 1,11 = 32,4 \text{ Ом.}$$

Чтобы в цепи последовательного соединения  $rc$  протекал ток 1,11 А в сети напряжения 220 В, полное сопротивление цепи должно быть равно:



$$Z = U / I = 220 / 1,11 = 198 \text{ Ом} .$$

При этом сопротивление конденсатора должно быть равно:

$$x_c = \sqrt{Z^2 - r^2} = \sqrt{198^2 - 32,4^2} = 195 \text{ Ом} .$$

Емкость конденсатора:

$$C = \frac{1}{\omega x_c} = \frac{1}{2\pi f x_c} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 195} = 16,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 16,3 \text{ мкФ} .$$

$$\text{Напряжение на конденсаторе: } U_c = x_c I = 195 \cdot 1,11 = 217 \text{ В} .$$

$$\text{Амплитудное значение напряжения: } U_{cm} = \sqrt{2} U_c = 1,41 \cdot 217 = 306 \text{ В} .$$

Так как целостность конденсатора (пробой) зависит не от действующего напряжения, а от амплитудного, то конденсатор следует выбрать на напряжение 350 или 400 В.

Использование конденсатора имеет ряд преимуществ: во-первых, конденсатор практически не греется, а активная мощность, потребляемая идеальной емкостью, равна нулю, во-вторых, габариты конденсатора, как правило, меньше балластного сопротивления, в-третьих, цепь с конденсатором повышает коэффициент мощности сети, поскольку общая нагрузка обычно имеет активно-индуктивный характер.

Балластное сопротивление и конденсатор нельзя применять в том случае, когда ток приемника не постоянный, а зависит от режима работы, например, электродвигатели. В этом случае напряжение на нагрузке будет изменяться, а для его стабилизации потребовалась бы регулировка величины балластного сопротивления или емкости, что технически выполнить непросто.

### 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.

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  $\varphi$  напряжения относительно тока можно определить, разложив все векторы по взаимно перпендикулярным осям, например, вдоль напряжения и перпендикулярно к нему.

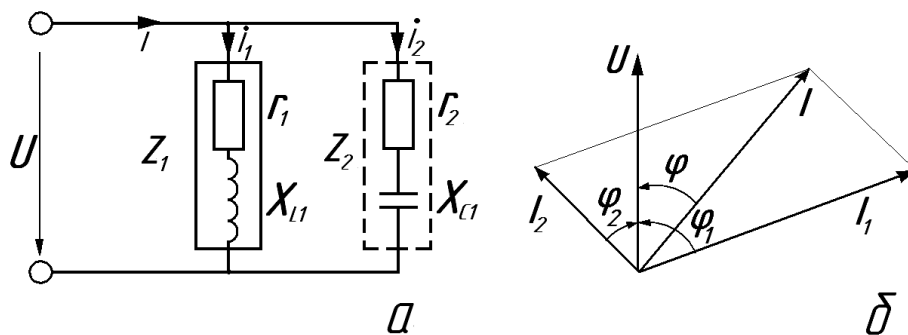


Рис. 3.8. Параллельное соединение приемников:  
а – схема; б – векторная диаграмма

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

### 3.7. Фазовращатель

Рассмотрим схему параллельного соединения двух ветвей. В одну ветвь последовательно включены два одинаковых резистора  $r_1$  и  $r_2$ , а в другую ветвь последовательно включен конденсатор и переменный резистор, величину сопротивления которого будем изменять от нуля до бесконечности (рис. 3.9, а).

В этой схеме мостового фазовращателя напряжение питания включено в одну диагональ моста, а с другой диагонали моста снимается напряжение  $U_{ab}$ , которое при изменении сопротивления  $r$  будет постоянным по величине, а его фазовый угол  $\alpha$  относительно приложенного напряжения  $U$  будет изменяться в широких пределах.

Из геометрии известно, что между двумя хордами, исходящими из одной точки и опирающимися на диаметр угол составляет  $90^\circ$ . В цепи  $rc$  ток  $I$  опережает напряжение  $U$  на угол  $\varphi$ . Вектор напряжения на резисторе  $U_r$  совпадает по фазе с вектором тока, а вектор  $U_c$  отстает от тока на  $90^\circ$ .

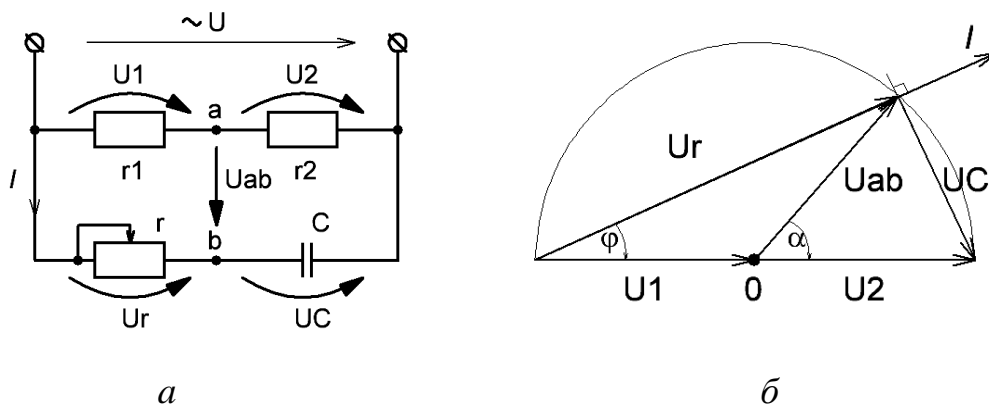


Рис. 3.9. Мостовой фазовращатель:  
*a* – схема; *б* – векторная диаграмма

При изменении сопротивления  $r$  угол  $\varphi$  будет изменяться ( $\varphi = \arctg x_c / r$ ); но угол между векторами  $\bar{U}_r$  и  $\bar{U}_c$  будет всегда равен  $90^\circ$ . Таким образом, векторы  $\bar{U}_r$  и  $\bar{U}_c$  можно рассматривать как хорды, опирающиеся на вектор  $\bar{U}$  как на диаметр. Следовательно, геометрическим местом конца вектора  $\bar{U}_{ab} = -\bar{U}_1 + \bar{U}_r$  или  $\bar{U}_{ab} = \bar{U}_2 - \bar{U}_c$  является окружность, а его величина, равная радиусу этой окружности изменяться не будет. Угол  $\alpha$  между векторами  $\bar{U}_{ab}$  и  $\bar{U}$  будет изменяться от  $0$  (когда  $r \rightarrow \infty$ , ток и  $\alpha$  стремятся к нулю,  $U_c = 0$ ,  $U_r = U$ , а конец вектора  $U_{ab}$  совпадает с точкой А) до  $180^\circ$  (когда  $r = 0$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ,  $U_r = 0$ ,  $U_c = U$ , а конец вектора  $U_{ab}$  совпадает с точкой В).

Таким образом, при изменении  $r$  от  $\infty$  до  $0^\circ$  фазовый угол  $\alpha$  напряжения  $U_{ab}$  относительно напряжения источника питания будет изменяться от  $0$  до  $180^\circ$ , а его величина будет равна половине напряжения источника питания.

В схемах промышленной электроники мостовой фазовращатель применяется довольно часто, например, в схеме однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя с импульсно-фазовым блоком управления.

### 3.8. 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. 3.10, *a*) соответствует ВД, изображенная на рис. 3.10, *б*, в которой напряжение опережает ток на угол  $\varphi$ . (Принято векторы синусоидаль-

ных величин на комплексной плоскости обозначать точкой над соответствующим символом).

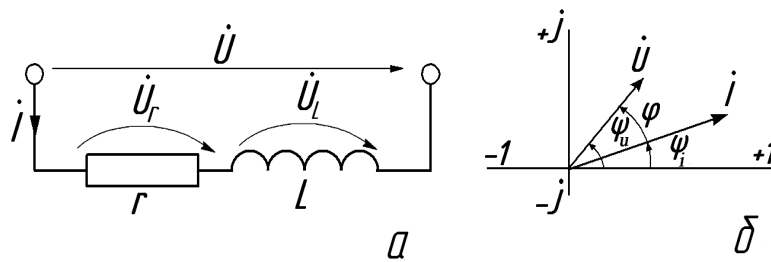


Рис. 3.10. Схема последовательного соединения  $r, L$  (а) и векторная диаграмма (б)

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;  $\psi_u$  и  $\psi_i$  – 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  $\tilde{N}$   $Z = r - jx_c$ , 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. 3.10), 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

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

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

Изобразим в масштабе вектор тока и векторы напряжений (рис. 3.11). По ВД определяется фазный сдвиг  $\varphi$  между током и напряжением, а также модули (абсолютные значения) тока и напряжения.

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

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

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

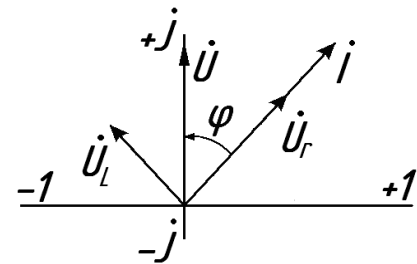


Рис. 3.11. Векторная диаграмма на комплексной плоскости

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

$$\tilde{S} = \dot{U}I^*.$$

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

В нашем примере  $\tilde{S} = j100(1,2 - j1,6) = 160 + j120$ . 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.

### 3.9. 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. 3.12, а).

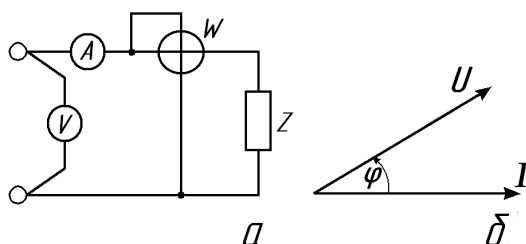


Рис. 3.12. Схема для определения параметров нагрузки (а), векторная диаграмма (б)

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. 3.12, б) угол  $\varphi$  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. 3.13, а), то данной ВД соответствует схема последовательного соединения  $r$  и  $L$  (рис. 3.13, б).

Параметры  $r$  и  $L$  можно определить по показаниям приборов:

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

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

$$L = x_L / \omega.$$

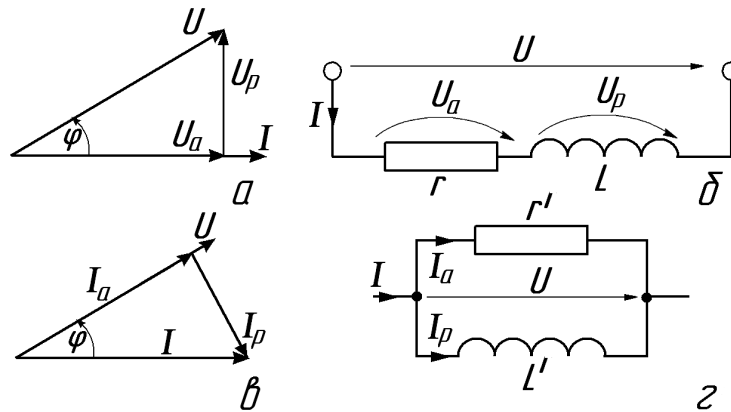


Рис. 3.13. Электрические цепи (б, г) и соответствующие им ВД (а, в)

Если разложить вектор тока на две составляющие – вдоль вектора напряжения ( $I_a$ ) и перпендикулярно к напряжению ( $I_p$ ) (см. рис. 3.13, в), то этой ВД соответствует схема параллельного соединения  $r'$  и  $L'$  (см. рис. 3.13, 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.

### Задача

Определить фазовый сдвиг между током и напряжением, а также параметры схемы замещения реальной катушки при отсутствии ваттметра, если использовали дополнительно конденсатор и произвели следующие измерения. К источнику напряжением 36 В подключили вначале катушку и измерили ток (1,2 А), затем конденсатор (1,6 А), а затем измерили ток параллельного соединения катушки и конденсатора (0,8 А).

Решение:

Построили векторную диаграмму параллельного соединения катушки и конденсатора (рис. 3.14, б).

Искомый фазовый сдвиг в катушке  $\varphi_k$  можно определить из треугольника токов, в котором угол  $\alpha$  определяются по теореме косинусов:

$$\cos \alpha = \frac{I_k^2 + I_c^2 - I^2}{2I_k I_c} = \frac{1,2^2 + 1,6^2 - 0,8^2}{2 \cdot 1,2 \cdot 1,6} = 0,875.$$

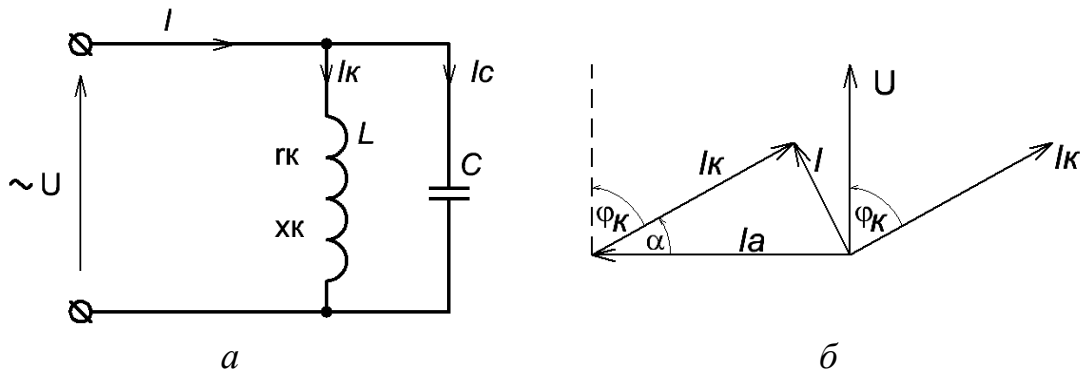


Рис. 3.14 Параллельное соединение катушки и конденсатора:  
а – схема; б – векторная диаграмма

Легко заметить, что

$$\cos \alpha = \sin \varphi_k = 0,875,$$

$$\cos \varphi_k = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi_k} = \sqrt{1 - 0,875^2} = 0,484,$$

$$\varphi_k = \arccos \varphi_k = \arccos 0,484 = 61^\circ.$$

Полное сопротивление катушки  $Z_k = U / I_k = 36 / 1,2 = 30 \text{ Ом}.$

Параметры последовательной схемы замещения катушки (см. рис. 3.13, б, з):

$$r'_k = Z_k / \cos \varphi_k = 30 / 0,484 = 62 \text{ Ом};$$

$$r_k = Z_k \cos \varphi_k = 30 \cdot 0,484 = 14,5 \text{ Ом};$$

$$x'_k = Z_k / \sin \varphi_k = 30 / 0,875 = 34,3 \text{ Ом};$$

$$x_k = Z_k \sin \varphi_k = 30 \cdot 0,875 = 26,3 \text{ Ом};$$

$$\angle'_k = x'_k / 2\pi f = 34,3 / 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 0,111 \text{ Г};$$

$$\angle_k = x_k / 2\pi f = 26,3 / 2 \cdot 3,14 \cdot 50 = 0,0835 \text{ Г}.$$

### 3.10. 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. 3.15).



В цепи последовательного соединения  $r, L, C$  резонанс напряжений имеет место при  $U_L = U_C$  или  $x_L = x_C$  (рис. 3.15, а). 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.

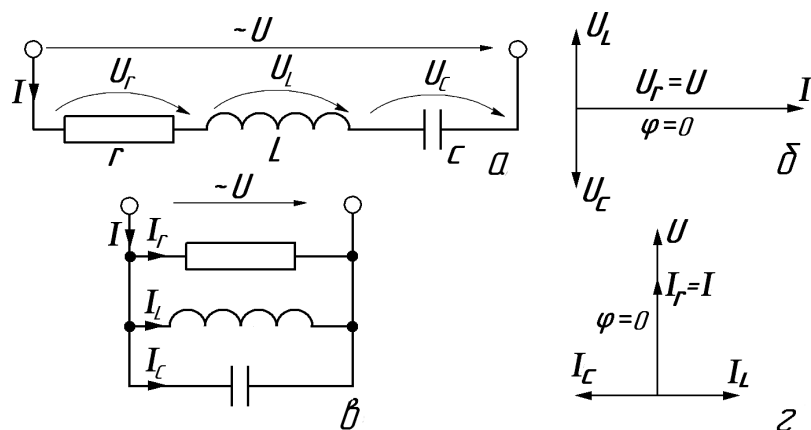


Рис. 3.15. Схемы последовательного (а) и параллельного (б) соединения  $r, L, C$  и векторные диаграммы (б и г) при резонансе

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  $\bar{I} = \bar{I}_r + \bar{I}_L + \bar{I}_C = I_r$  (рис. 3.15, в, г).

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.

### 3.11. Повышение коэффициента мощности

Большинство приемников электрической энергии имеет активно-индуктивный характер нагрузки, в которой ток отстает от приложенного напряжения на угол  $\varphi_n$ . Схему замещения такой нагрузки можно представить, например, параллельным соединением  $r, L$  (рис. 3.16, 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

$P_n = UI_n \cos \varphi_n$  пропорциональна активной составляющей тока нагрузки, а реактивная составляющая тока нагрузки пропорциональна реактивной мощности  $Q = UI_n \sin \varphi_n$ .

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

Если включить параллельно нагрузке конденсатор, ток в котором опережает приложенное напряжение по фазе на  $1/4$  периода ( $90^\circ$ ), то общий ток в линии  $I$  не увеличивается, а уменьшается (рис. 3.16, 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.

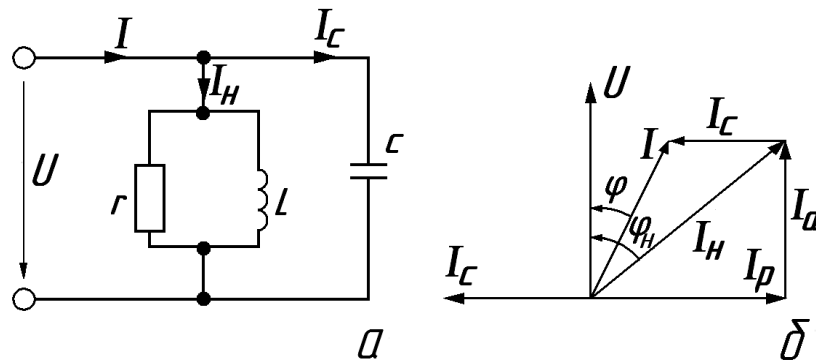


Рис. 3.16. Схема (а) и векторная диаграмма (б) при повышении коэффициента мощности

Можно подобрать такой конденсатор, при котором  $I_c = I_p$ . При этом  $\varphi = 0$  и для питания нагрузки мощностью  $P_n$  потребуется генератор, рассчитанный на полную мощность  $S$ , равную  $P_n$ . 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.

### 3.12. 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. 3.17, а).

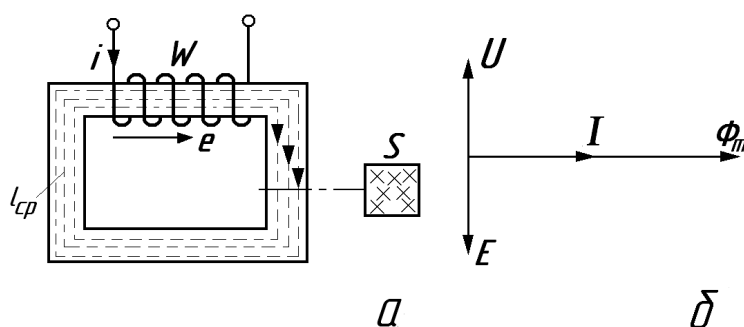


Рис. 3.17. Катушка со стальным сердечником (а) и упрощенная векторная диаграмма синусоидальных величин (б)

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  $90^\circ$ .

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

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

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

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

Отсюда амплитудное значение магнитного потока

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

Ток в катушке совпадает по фазе с магнитным потоком и отстает от напряжения на  $90^\circ$ , 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:

$$H_m l_{cp} = I_m w,$$

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 пропор-

ционален напряженности магнитного поля. Следовательно, ВАХ повторяет кривую намагничивания  $B = f(H)$  (рис. 3.18).

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. 3.18). При этом искажается и форма тока, которая будет отлична от синусоиды. Все это вызывает повышенный нагрев катушки.

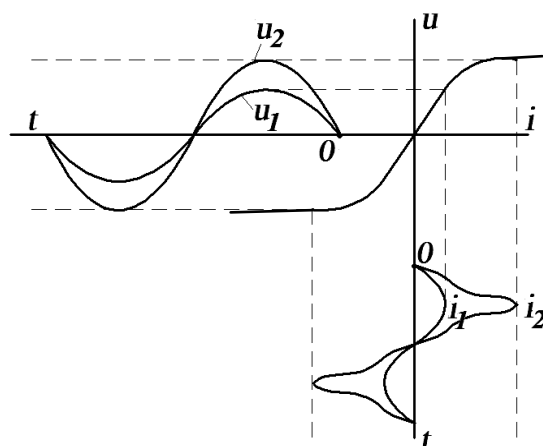


Рис. 3.18. Синусоиды напряжения и кривые тока в катушке со стальным сердечником

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 связано с резким увеличением намагничивающего тока и может вызвать перегрев катушки и стального сердечника.

### 3.13. 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. 3.19, *a*). 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  $\omega L$  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. 3.19, *б* показана схема включения обмотки якоря машины постоянного тока с возможностью изменения напряжения на ее зажимах с помощью магнитного усилителя.

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.

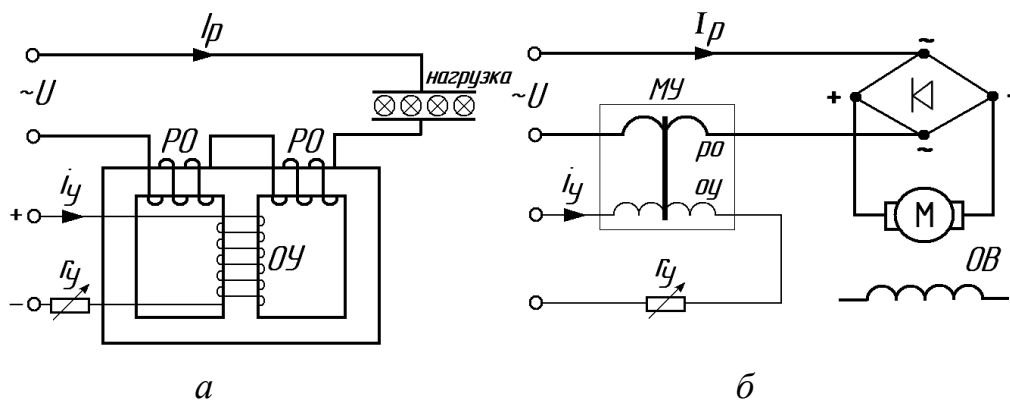


Рис. 3.18. Схема регулирования напряжения с помощью магнитного усилителя в нагрузке переменного тока (а) и постоянного тока (б)

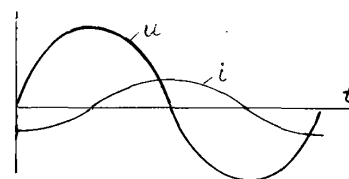
### Контрольные вопросы и задачи

1. Рамка размером  $10 \times 10$  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.

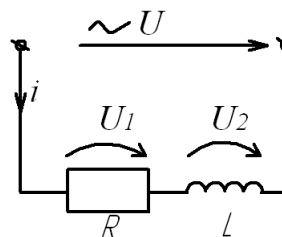
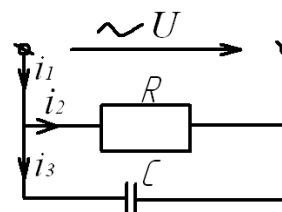
Определить амплитудное значение ЭДС, возникающей в рамке. Сколько витков должна иметь рамка, чтобы действующее значение ЭДС было равно 220 В?

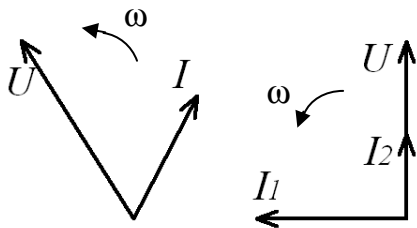
2. Как записать в аналитической форме напряжение сети в функции времени, если  $U = 100$  В, а частота сети 50 Гц?

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

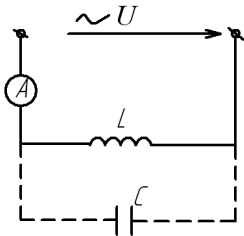


4. Построить качественно векторную диаграмму четырех обозначенных на рисунках синусоидальных величин.

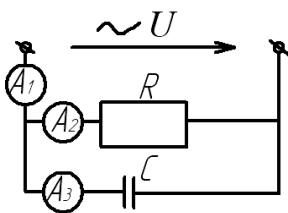




5. Составить электрическую цепь, соответствующую заданной векторной диаграмме (рис.).

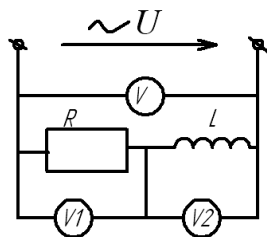


6. Как изменится показание прибора, если параллельно индуктивности включить емкость равного сопротивления (рис.)?



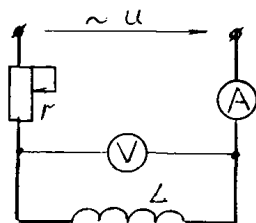
7. Чему равно показание третьего амперметра, если известны показания двух остальных (рис.)?  $I_1 = 5$  А,  $I_2 = 4$  А.

Решение пояснить векторной диаграммой.



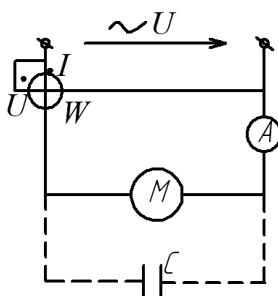
8. Чему равно показание третьего вольтметра, если показания двух  $U_1 = U_2 = 100$  В (рис.)?

Решение пояснить построением векторной диаграммы.



9. Как практически определить индуктивность реальной катушки (рис.)?

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



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



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

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

**14.** 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.

**15.** 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.

**16.** 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?

**17.** 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, дешевые 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  $120^\circ$ ). (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  $120^\circ$ , с угловой скоростью  $\omega$  в однородном магнитном поле (рис. 4.1).

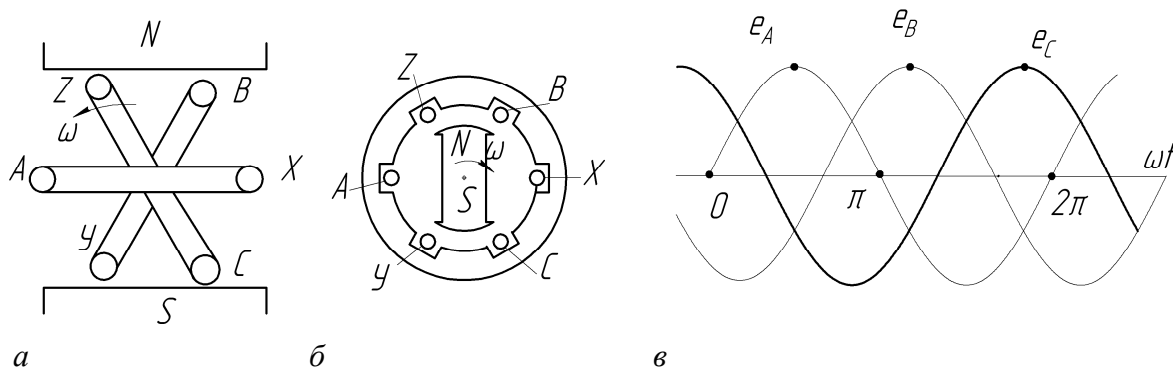


Рис. 4.1. Схемы для получения трехфазной ЭДС (а и б);  
временная диаграмма (в)

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.  $120^\circ$ . В свою очередь, ЭДС фазы С будет отставать от ЭДС фазы А на  $240^\circ$  или опережать ЭДС фазы А на  $120^\circ$ .

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

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

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

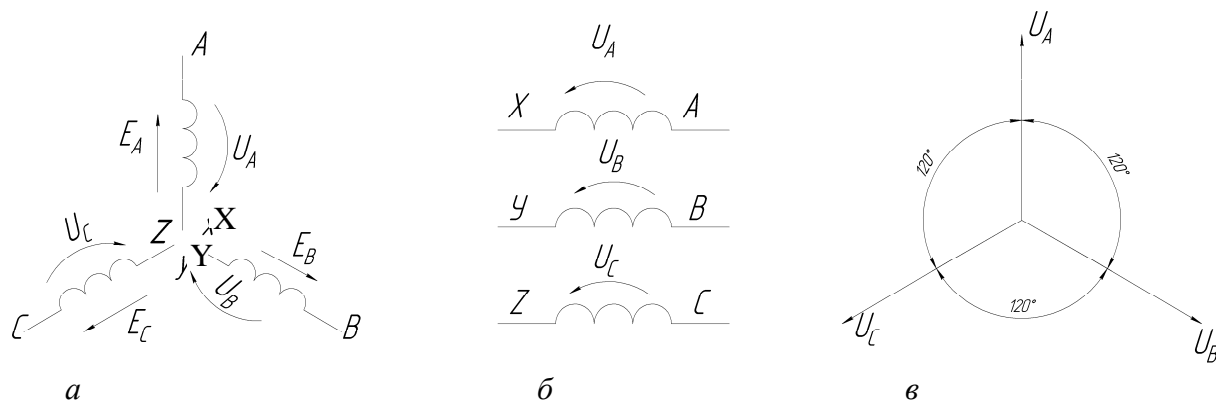


Рис. 4.2. Схемное обозначение фаз генератора (а, б) и векторная диаграмма напряжений на фазах (в)

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).

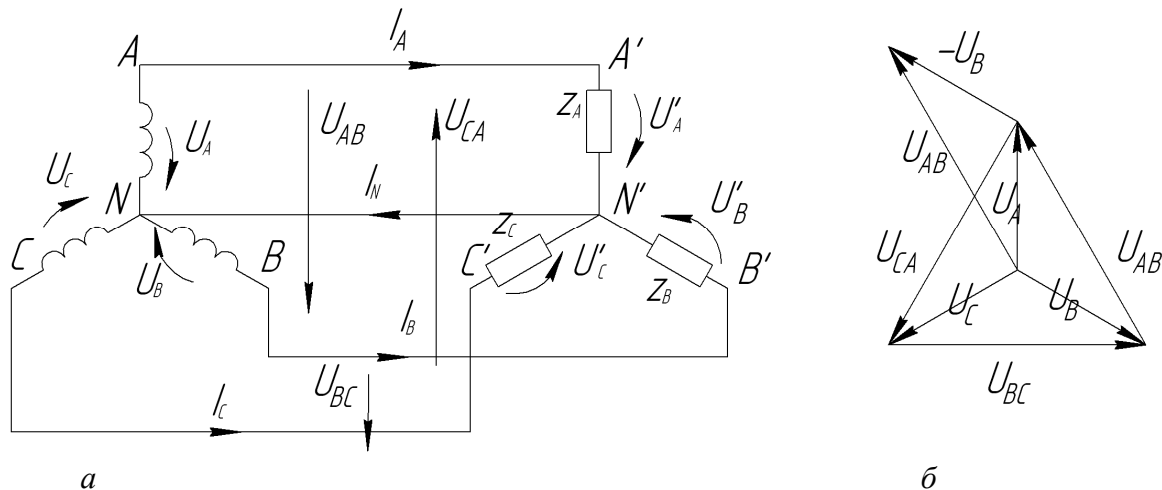


Рис. 4.3. Четырехпроводная трехфазная сеть

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  $U_{NB}$ , т.е.  $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{AN} + \dot{U}_{NB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$ . На рис. 4.3, б показано сложение этих векторов, а суммарный вектор  $U_{AB}$  перенесли параллельно, соединив концы векторов  $\dot{U}_A$  и  $\dot{U}_B$ . Аналогично строятся векторы других линейных напряжений  $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$  и  $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$ .

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

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

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  $120^\circ$ , 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 обесточивается соответствующая нагрузка.

При соединении приемника звездой без нулевого провода (рис. 4.4, *a*), если нагрузка несимметрична, то возникает напряжение между нулем приемника  $N'$  и нулем генератора  $N$ , величину и фазу которого можно определить по формуле

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A/Z_A + \dot{U}_B/Z_B + \dot{U}_C/Z_C}{1/Z_A + 1/Z_B + 1/Z_C}.$$

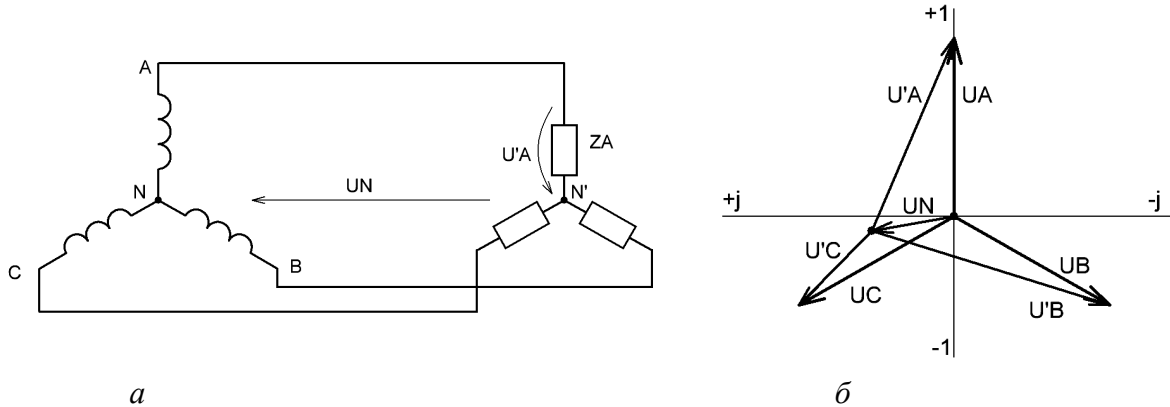


Рис. 4.4. Соединение звездой без нулевого провода:  
*a* – схема, *б* – векторная диаграмма

Напряжения на приемнике:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_A - \dot{U}_N, \quad \dot{U}_B = \dot{U}_B - \dot{U}_N, \quad \dot{U}_C = \dot{U}_C - \dot{U}_N$$

(см. рис. 4.4, *б*). Возникает так называемый перекося фаз, когда уменьшается напряжение на наиболее нагруженной фазе и, напротив, увеличивается напряжение на слабо нагружаемой фазе.

### Задача

Определить напряжение на фазах приемника, если фазное напряжение генератора  $U_A = U_B = U_C = 220$  В, а сопротивления фаз нагрузки  $r_A = r_B = r_C = 100$  Ом (рис. 4.5, *a*).

Решение:

Несмотря на равенство сопротивлений, нагрузка является несимметричной, т.к. в фазах А и В включены лампы накаливания с активным характером нагрузки, а в фазу С – конденсатор (емкостной характер нагрузки).

Направив вектор  $\bar{U}_A$  по действительной оси, запишем векторы фазных напряжений в комплексной форме:

$$\dot{U}_A = 220 \text{ В}, \quad \dot{U}_B = -110 - j190 \text{ В}, \quad \dot{U}_C = -110 + j190 \text{ В}.$$

Сопротивления фаз приемника в комплексном виде:

$$Z_A = 100 \text{ Ом}, Z_B = 100 \text{ Ом}, Z_C = -j100 \text{ Ом}.$$

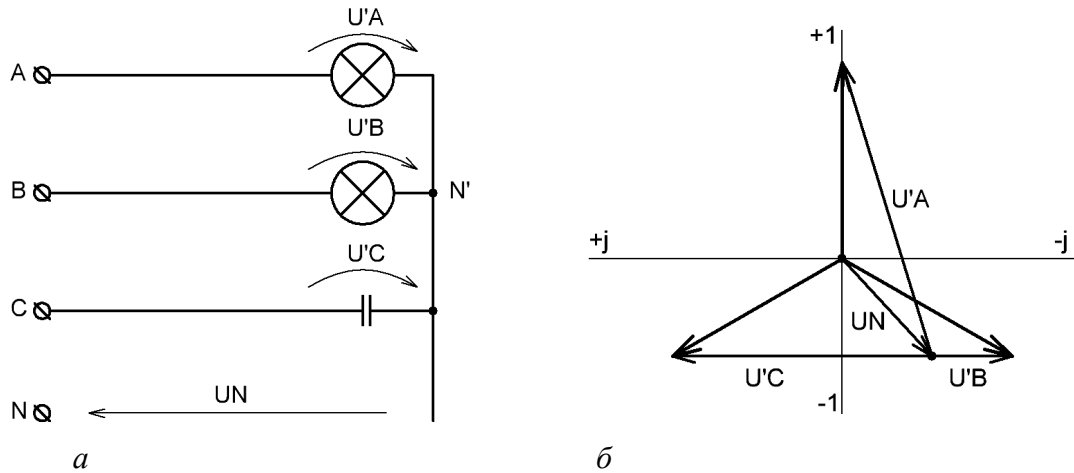


Рис. 4.5. Указатель порядка чередования фаз:

*a* – схема; *б* – векторная диаграмма

Смещение нейтрали:

$$\begin{aligned} \dot{U}_M &= \frac{\dot{U}_A / Z_A + \dot{U}_B / Z_B + \dot{U}_C / Z_C}{1/100 + 1/100 + 1/-j100} = \\ &= \frac{220/100 + (-110 - j190)/100 + (-110 + j190)/-j100}{1/100 + 1/100 + 1/-j100} = -92 - j104 \text{ В}. \end{aligned}$$

Напряжения на нагрузке:

$$\dot{U}_A' = \dot{U}_A - \dot{U}_{N'N} = 220 - (-92 - j104) = 312 + j104 \text{ В},$$

$$U_A' = \sqrt{312^2 + 104^2} = 329 \text{ В}.$$

$$\dot{U}_B' = \dot{U}_B - \dot{U}_{N'N} = -110 - j190 - (-92 - j104) = -18 - j86 \text{ В},$$

$$U_B' = \sqrt{18^2 + 86^2} = 88 \text{ В}.$$

$$\dot{U}_C' = \dot{U}_C - \dot{U}_{N'N} = -110 + j190 - (-92 - j104) = -18 + j294 \text{ В},$$

$$U_C' = \sqrt{18^2 + 294^2} = 295 \text{ В}.$$

Таким образом, если считать, что ярко горящая лампа включена в фазу А (329 В), то фазой В следует считать ту цепь, в которой лампочка горит слабо (88 В), а конденсатор включен в фазу С.

Векторная диаграмма фазных напряжений генератора и приемника показана на рис. 4.5, б.

Если нагрузка неравномерная, но чисто активная, то смещение нейтрали можно определить графически, не прибегая к расчету символическим методом с помощью комплексных чисел.

Пусть в фазу А будет включена одна лампа, в фазу В – 2 параллельно включенные лампы и в фазу С – три лампы (рис. 4.6, а).

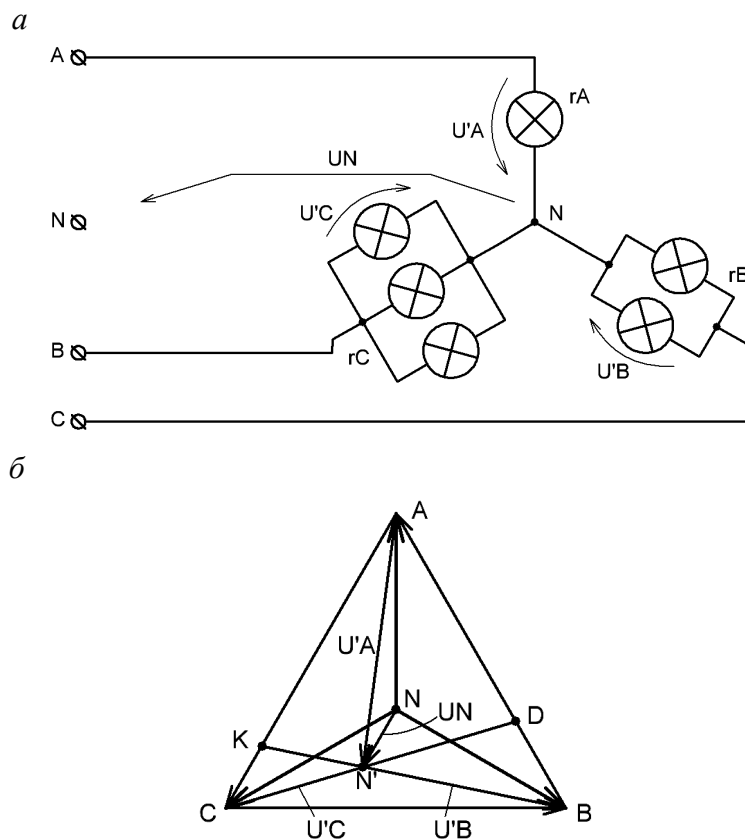


Рис. 4.6. Соединение звездой при неравномерной активной нагрузке:  
а – схема; б – векторная диаграмма

Таким образом, сопротивление фазы А в 2 раза больше, чем сопротивление фазы В и в 3 раза больше, чем сопротивление фазы С.

Определим геометрическое место нейтрали  $N'$  при изменении сопротивления фазы С. Если  $r = 0$  (короткое замыкание фазы), нейтраль  $N'$  будет иметь потенциал точки С, напряжение  $U'_A$  становится равным  $U_{AC}$ , а  $U'_B = U_{CB}$ , т.е. будут равными линейному напряжению.

Если  $r_C \rightarrow \infty$ , что равносильно обрыву фазы С, цепь становится однофазной и последовательное соединение  $r_A$  и  $r_B$  будет включено на линейное напряжение  $U_{AB}$ . Это напряжение будет распределяться обратно пропорционально сопротивлениям фаз и нейтральная точка D будет располагаться на линии АВ, причем  $U_{AD} = 2U_{BD}$ , т.к.  $r_A = 2r_B$ .

При изменении  $r_C$  от нуля до бесконечности нейтраль  $N'$  будет перемещаться по линии CD соответственно от точки С к точке D.



Аналогично изменяя сопротивление фазы В от нуля до бесконечности при неизменных сопротивлениях в других фазах, нейтраль  $N'$  будет перемещаться по линии ВК, причем  $U_{AK}$  будет в 3 раза больше напряжения  $U_{CK}$ , т.к.  $r_A = 3 \cdot r_C$ .

Нейтральная точка  $N'$  определяется на пересечении линий CD и ВК. В результате определяется смещение нейтрали  $U_{N'N}$  и напряжения на фазах приемника  $U_A', U_B'$  и  $U_C'$ .

Векторная диаграмма показывает, что на самой нагруженной фазе С напряжение  $U_C'$  меньше фазного напряжения генератора  $U_C$ , а на менее нагруженной фазе А напряжение  $U_A'$  больше фазного напряжения генератора.

### 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  $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A$ ;  $\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B$ ;  $\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C$ ;  $U = U_\phi$ .

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

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

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

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:

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

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  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$  и  $\varphi_C$ , 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.

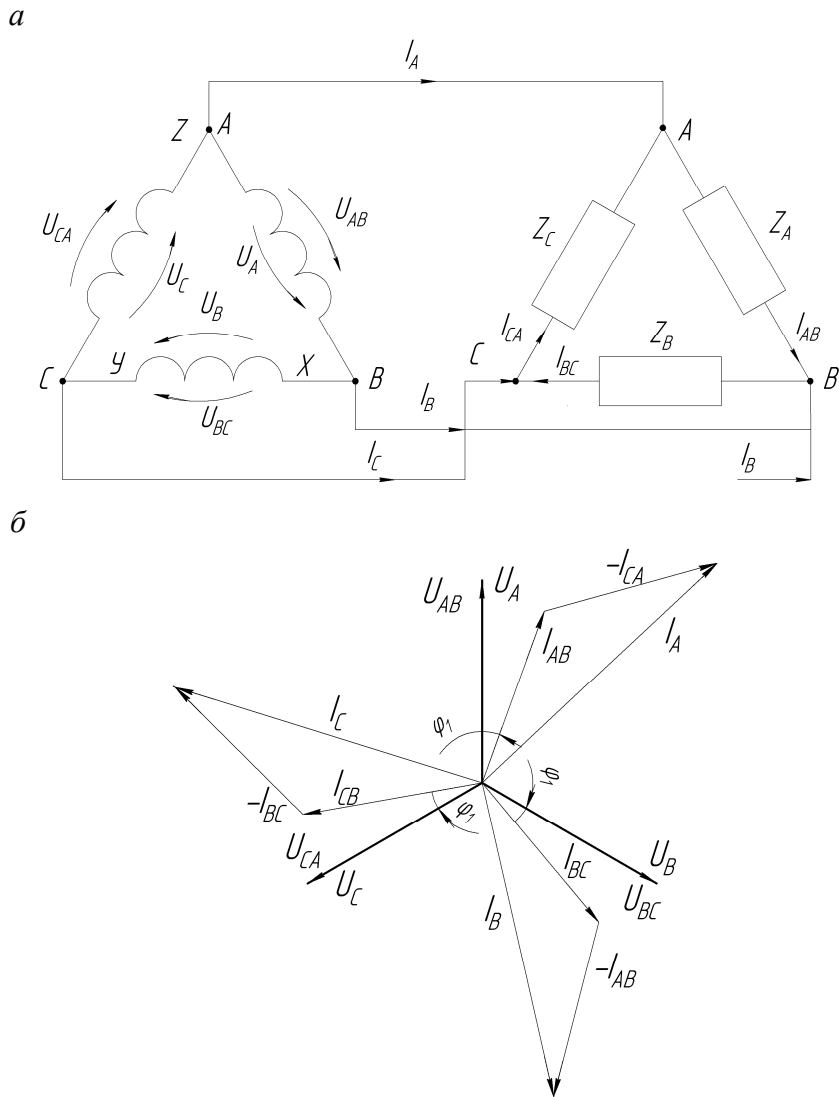


Рис. 4.4. Соединение треугольником:  
*a* – схема; *б* – векторная диаграмма

Итак, при симметричной нагрузке, соединенной треугольником,

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

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, т.к. передавая мощность при более высоком линейном напряжении, уменьшаем линейный ток, следовательно, эту же мощность можно передать на нагрузку проводом меньшего сечения.

#### 4.4. Мощность трехфазного тока

При несимметричной нагрузке активная мощность определяется арифметической суммой 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  $U_A, U_B, U_C$  и  $I_A, I_B, I_C$  – соответственно фазные напряжения и токи,  $\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$  – фазовые сдвиги напряжений относительно токов.

Если нагрузка симметричная ( $I_A = I_B = I_C = I_\varphi$ ,  $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = \varphi_\varphi$ ), то  $P = 3U_\varphi I_\varphi \cos \varphi_\varphi$ .

Известно, что при симметричной нагрузке, соединенной звездой,  $I = I_\varphi$ , а  $U = \sqrt{3}U_\varphi$ , а при нагрузке, соединенной треугольником,  $I = \sqrt{3}I_\varphi$ ,  $U = U_\varphi$ . Заменяя фазные токи и напряжения линейными значениями, получим формулу активной мощности независимо от способа соединения нагрузки:

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi_\varphi,$$

где  $U$  и  $I$  – линейные значения напряжения и тока.

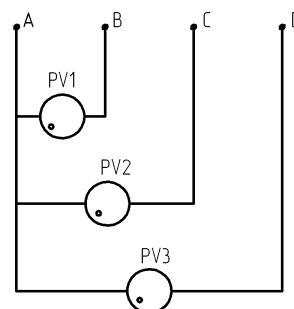
Реактивная и полная мощности при симметричной нагрузке:

$$Q = 3U_\varphi I_\varphi \sin \varphi_\varphi = \sqrt{3}UI \sin \varphi_\varphi,$$

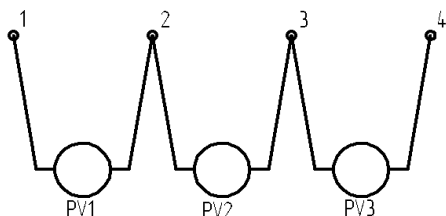
$$S = 3U_\varphi I_\varphi = \sqrt{3}UI.$$

#### Контрольные вопросы и задачи

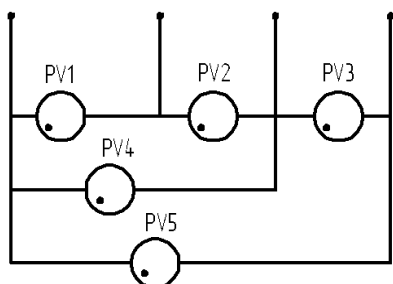
1. Определить показания вольтметров PV2 и PV3, подключенных к трехфазной сети, если вольтметр PV1 показал 220 В (рис.).



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



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

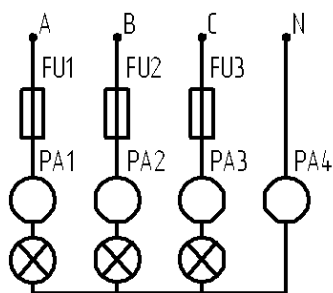


4. Определить показания приборов PV2 и PV3, включенных в трехфазную сеть, если показания остальных трех одинаковые и равны 380 В (рис.).

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?



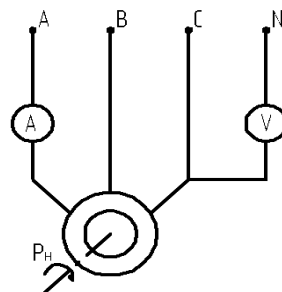
8. Определить показание четвертого амперметра при симметричной нагрузке ( $I_A = I_B = I_C = 1$  А) и показание всех четырех, если сгорел предохранитель фазы В (рис.).

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?

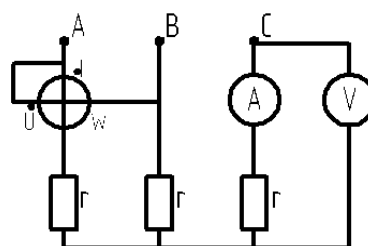
**11.** Чему равно показание амперметра, если мощность трехфазной симметричной нагрузки  $P_H = 3$  кВт, коэффициент мощности  $\cos \varphi = 0,8$ ,  $\eta = 0,75$ , а показание вольтметра – 380 В (рис.)?

Ответ: 4,37 А.



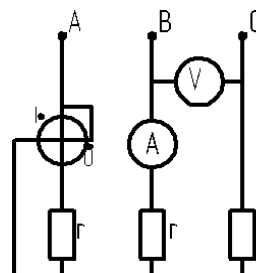
**12.** Что покажет ваттметр при симметричной активной нагрузке, если показания двух других приборов равны 10 А и 220 В (рис.)?

Ответ: 3,29 А.

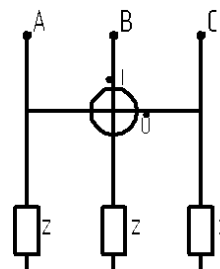


**13.** Что покажет ваттметр при симметричной активной нагрузке, если показания двух других приборов равны 10 А и 220 В (рис.)?

Ответ: 1,27 кВт.



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

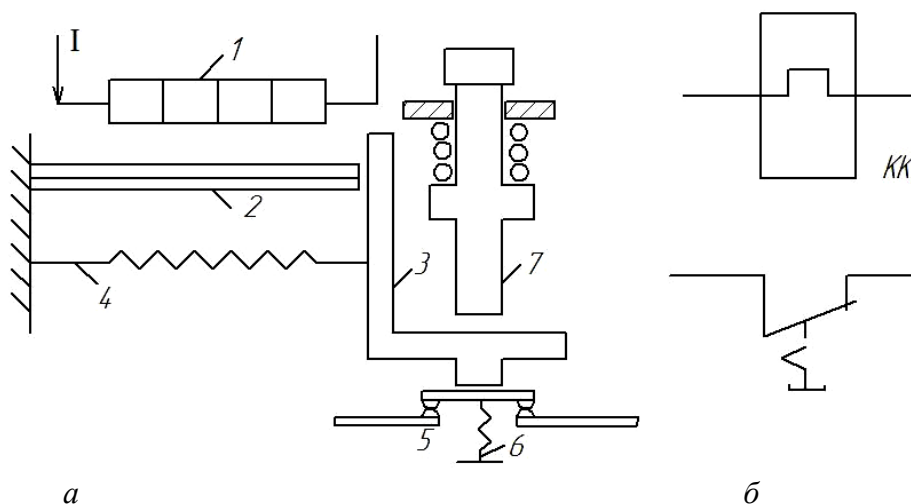


Рис. 5.1. Тепловое реле:  
*а* – устройство; *б* – условное графическое обозначение

### 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.

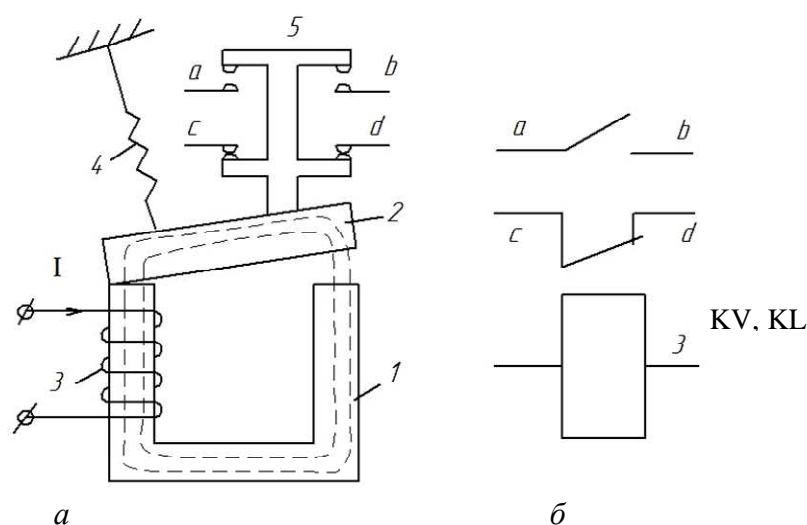


Рис. 5.2. Электромагнитное реле:  
*а* – устройство; *б* – условное графическое обозначение

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, т.е. 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 ре-

ле. 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**

Контактор – это электромагнитный аппарат, предназначенный для частых дистанционных включений и отключений силовой электрической цепи при нормальном режиме работы. Принцип действия контактора аналогичен работе электромагнитного реле. Контакторы различаются: по роду тока – постоянного и переменного тока; по числу главных контактов – одно-, двух- и многополюсные; 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 номи-

нального 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.

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 электромаг-

нитный 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.

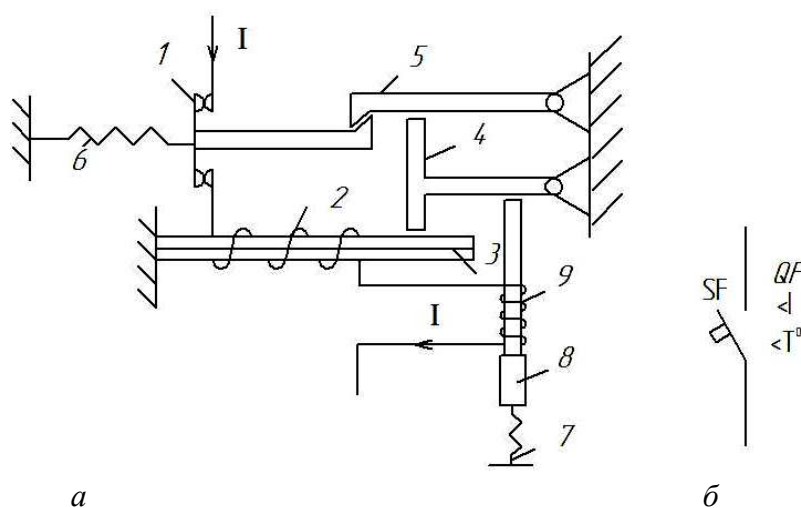


Рис. 5.3. Автоматический воздушный выключатель:  
*а* – устройство; *б* – условное графическое изображение

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 выше 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 подводящих 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.

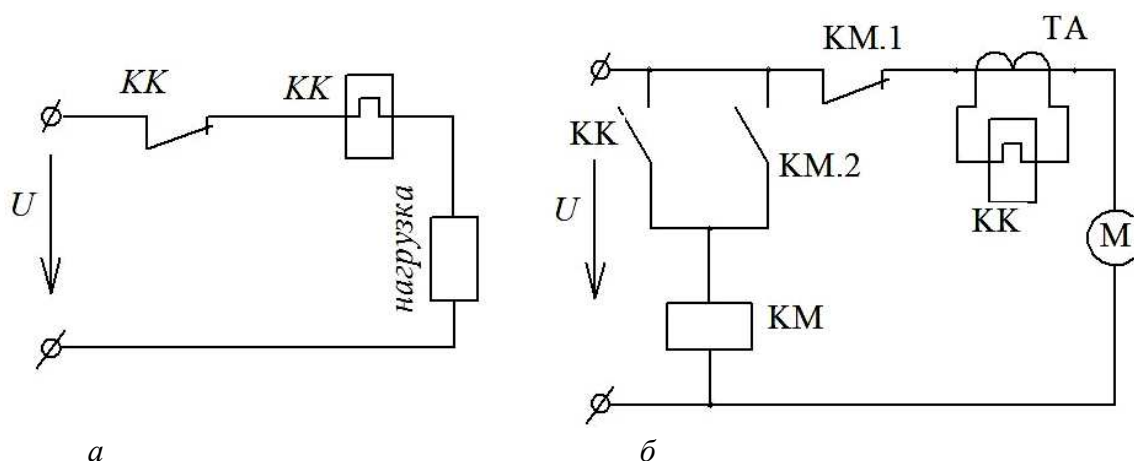


Рис. 5.4. Тепловая защита электрических цепей:  
а – для маломощной нагрузки; б – для силовых цепей

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 контактор будет оставаться в сработанном состоянии, т.к. обмотка питается через свой контакт КМ.2. Говорят, обмотка включена на самопитание.

Разорвать эту цепочку невозможно, т.к. 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, т.е. защитой от самозапуска, т.к. при исчезновении напряжения питания по какой-либо причине, когда оно вновь восстанавливается, нагрузка вновь будет самопроизвольно включаться.

Токовую 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.



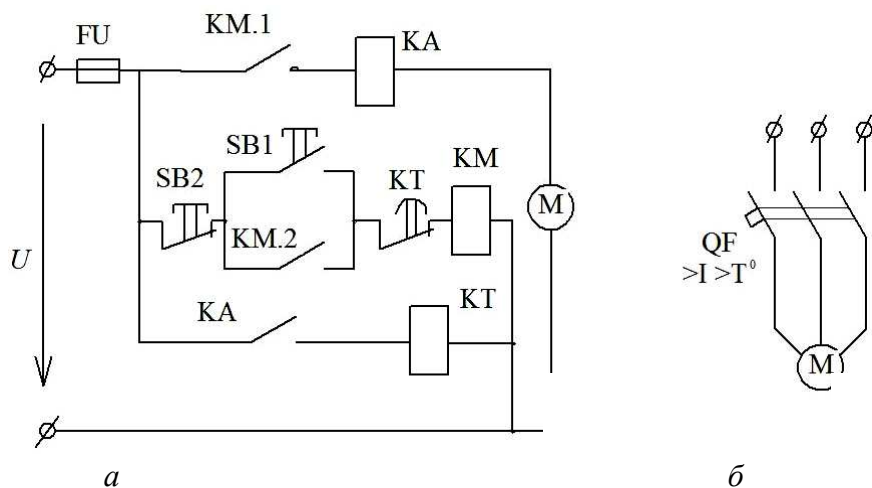


Рис. 5.5. Схема максимальной токовой защиты электродвигателя:  
 а – с помощью реле тока; б – с помощью автоматического воздушного выключателя

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 разомкнутым контактом КМ.1.

Предохранитель FU мгновенно отключает питание всей цепи при коротком замыкании.

Кроме того, данная схема предусматривает нулевую защиту, т.к. 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).

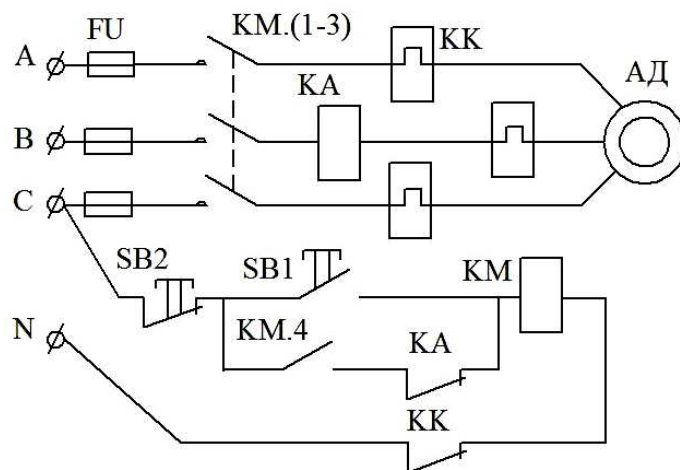


Рис. 5.6. Схема пуска в ход асинхронного электродвигателя с помощью магнитного пускателя, снабженного тепловой и токовой защитой

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, т.к. кнопка SB1 будет шунтирована 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

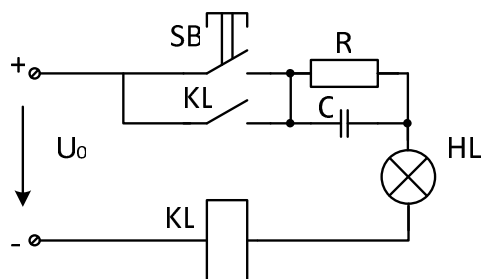
кнопку «Стоп». Но в данной схеме предусмотрено автоматическое отключение электродвигателя при аварийных режимах работы. Например, если увеличить механическую нагрузку на валу двигателя, при которой он будет потреблять ток выше номинального значения, срабатывает тепловое реле с некоторой выдержкой времени 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.

### Задача

Будет ли включаться и гореть сигнальная лампочка при нажатии на кнопку SB, если: а)  $R = 2 \text{ кОм}$ ; б)  $R = 4 \text{ кОм}$ . Номинальные данные лампочки – 15 Вт, 15 мА. Ток срабатывания промежуточного малоинерционного реле KL – 10 мА, ток отпуска – 5 мА, сопротивление обмотки – 1 кОм, конденсатор достаточно большой емкости. Напряжение источника питания  $U_0 = 24 \text{ В}$ .



## 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**  $\gamma_{np} = \frac{\Delta A \cdot 100}{A_n} \%$  (здесь  $A_n$  – верхний предел измерения измерительного прибора).

Абсолютная погрешность на разных участках шкалы не одинакова. Обычно прибор имеет наименьшую абсолютную погрешность 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

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

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  $\gamma = \frac{\Delta I \cdot 100}{I_x} = \frac{0,25 \cdot 100}{0,5} = 50 \%$ , т.е. может достигать 50 %.

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 измерительная рамка 3. Рамка вместе с цилиндрической частью магнитопрово-

да 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.

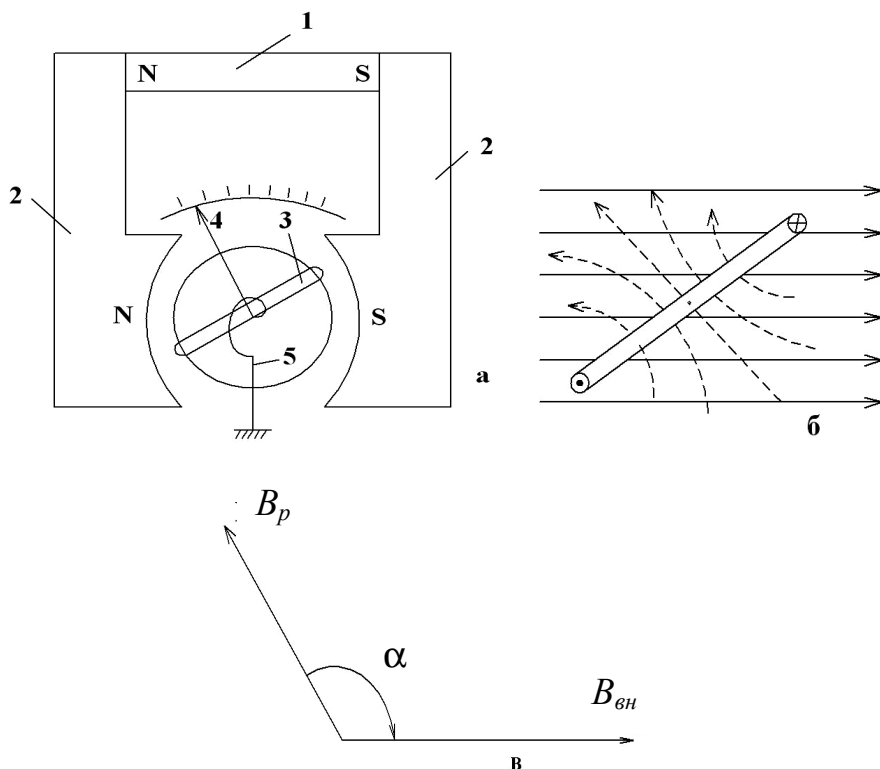


Рис. 6.1. Прибор магнитоэлектрической системы:  
а – устройство; б и в – направление магнитного потока и индукции

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 (пунктирные силовые линии).

Чтобы общая энергия магнитного поля была наибольшей, эти потоки должны быть однонаправленными. Поэтому подвижная рамка будет стремиться повернуться на угол  $\alpha$  (см. рис. 6.1, в), создавая вращающий момент  $M_{вр}$ . Если бы не было пружины, рамка поворачивалась бы на угол  $\alpha$  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).

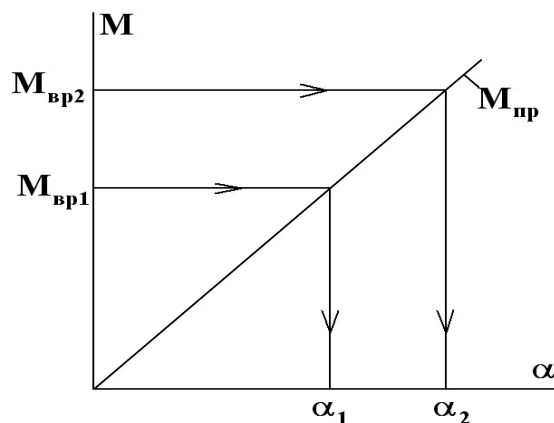




Рис. 6.2. Зависимость угла поворота рамки от величины вращающего момента

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 являются высокие 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) (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.

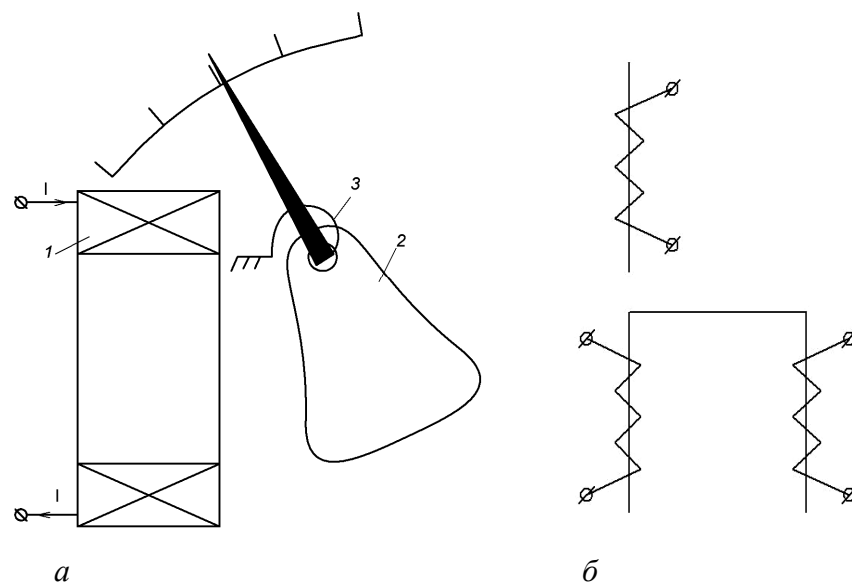


Рис. 6.3. Прибор электромагнитной системы: а – устройство; б – графическое изображение

### 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).

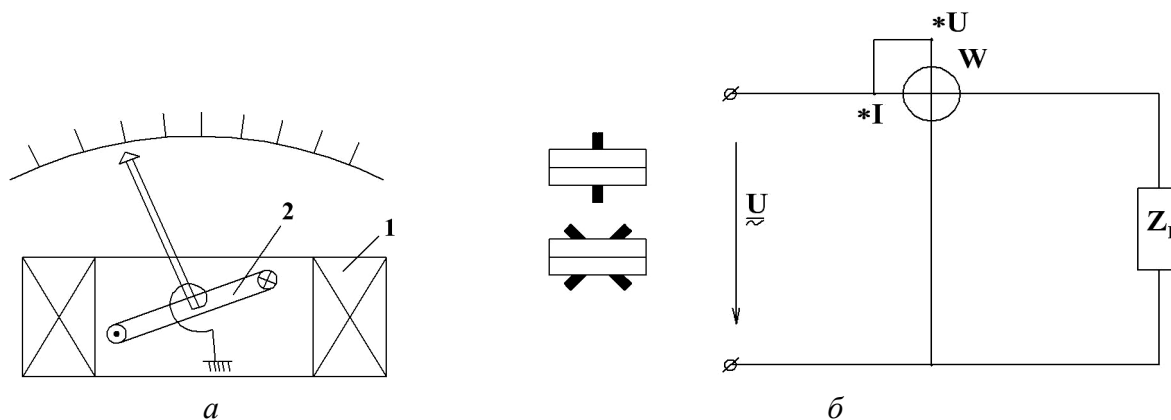


Рис. 6.4. Прибор электродинамической системы: а – устройство и графическое обозначение; б – схема включения



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 фазовый сдвиг  $\psi$  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.

Если угол  $\psi$  будет равен фазному сдвигу  $\phi$  между током и напряжением, то отклонение стрелки прибора будет пропорционально мощности:  $\alpha = kIU \cos \phi \equiv P$ . 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.

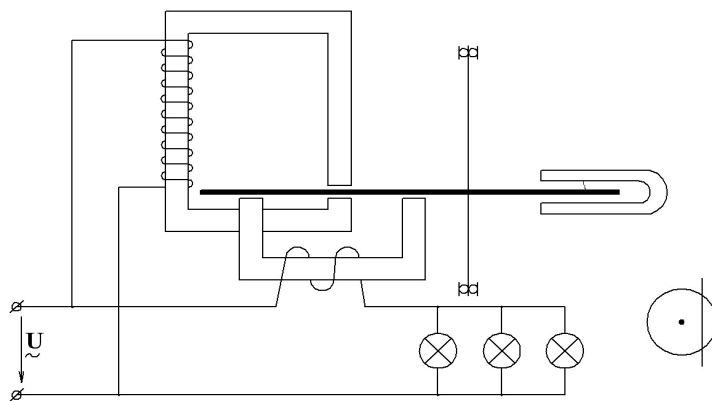


Рис. 6.5. Прибор индукционной системы

Как и в приборах электродинамической системы, вращающий момент пропорционален активной мощности  $M_{ep} \equiv P$ , а противодействующий момент, создаваемый постоянным магнитом, пропорционален скорости вращения диска  $M_{np} \equiv n$ . Установившаяся скорость диска соответствует равенству  $M_{ep} = M_{np}$ . Поэтому скорость вращения диска также будет пропорциональна активной мощности  $n = kP$ . Если частоту 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. Схема включения счетчика аналогична схеме включения ваттметра.

### 6.3. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов

На шкалах приборов обозначают характер измеряемой величины – А, V, mA,  $\mu$ A, W, Wh,  $\Omega$ , Hz,  $\varphi$ ,  $\cos \varphi$ , 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  $30^\circ$  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 термоЭДС, т.к. сопротивление вольтметра может быть значительно меньше внутреннего сопротивления источника термоЭДС. 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,  $P_A = I \Delta U = 0$ , т.е. прибор не потребляет энергию.

Вольтметр же подключается параллельно нагрузке или сети, и для того чтобы он сам не изменял величину измеряемого напряжения, необхо-

дим, 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  $r_{ш}$ , как правило, значительно меньше сопротивления прибора  $r_A$ . Шунты включаются параллельно амперметру.

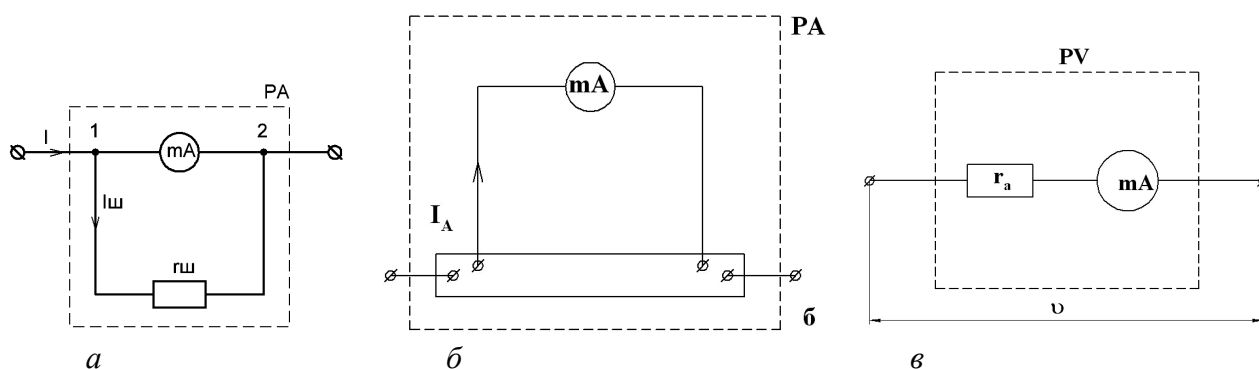


Рис. 6.6. Схема подключения шунта (а и б) и добавочного сопротивления (в)

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  $I_{ш} = I - I_A = 2 - 0,005 = 1,995$  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:  $r_{ш} = \frac{U_{12}}{I_{ш}} = \frac{1}{1,995} \approx 0,5$  Ом.

В общем случае при расширении предела измерения амперметра в  $n$  раз сопротивление шунта  $r_{ш} = \frac{r_A}{(n-1)}$ . 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 (см. рис. 6.6, б).

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  $1,5 \text{ Вт}$ .

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  $35 \text{ А}$ , с помощью амперметра, рассчитанного на  $2 \text{ А}$ , то трансформатор тока ТА 40/5 не годится, хотя первичная и вторичная обмотки не будут перегружены. Действительно, по первичной обмотке трансформатора будет проходить ток  $35 < 40 \text{ А}$ , по вторичной обмотке  $35/8 = 4,375 < 5 \text{ А}$ , а амперметр будет перегружен, т.к.  $4,375 > 2 \text{ А}$ . Поэто-

му 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.

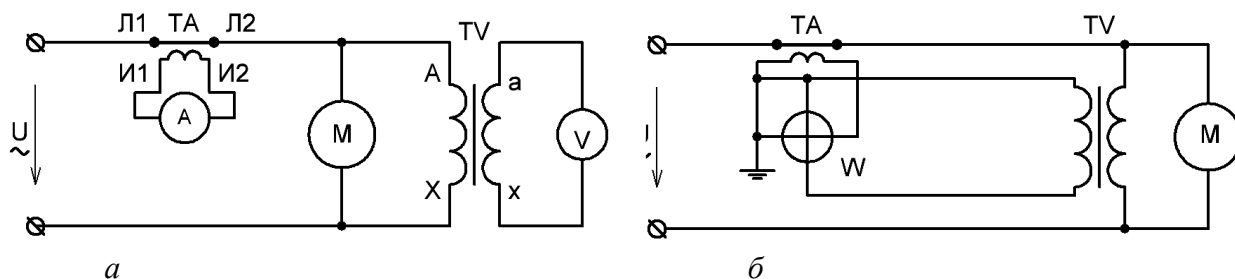


Рис. 6.7. Измерение тока, напряжения (а) и мощности (б) с помощью измерительных трансформаторов

Аналогично при выборе трансформатора напряжения TV 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).

В трехпроводной сети при любой несимметричной нагрузке трехфазную мощность можно измерить двумя ваттметрами. Действительно, ак-

тивная 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.

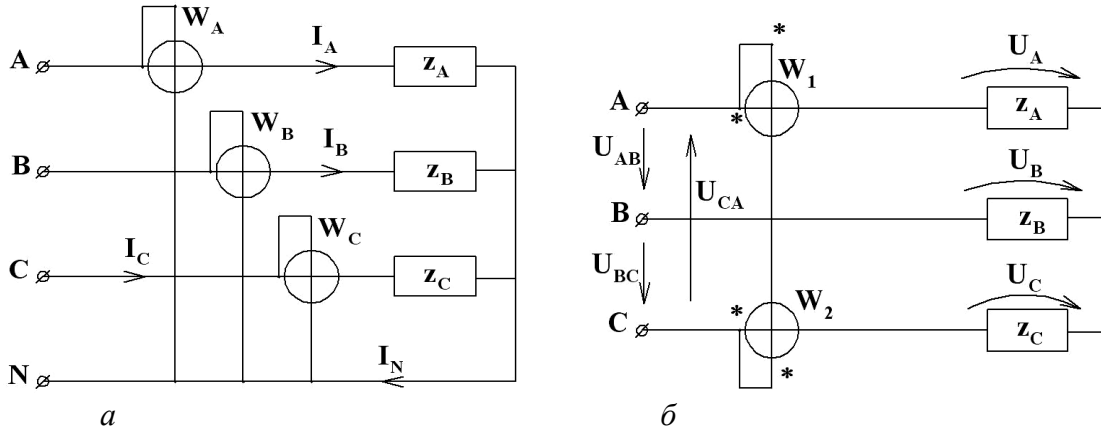


Рис. 6.8. Измерение мощности в трехфазных цепях:  
а – четырехпроводной; б – трехпроводной

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  $\varphi_A$ ,  $\varphi_B$  и  $\varphi_C$ . Если, например, измеряется мощность двумя ваттметрами, нагрузка симметричная с коэффициентом мощности  $\cos \varphi = 0,5$  (т.е. фазный сдвиг между фазными значениями тока и напряжения равен  $60^\circ$ ), то угол между векторами  $\bar{I}_A$  и  $\bar{U}_{AB}$  будет равен  $90^\circ$ , первый ваттметр покажет 0, а второй – мощность всей трехфазной цепи.

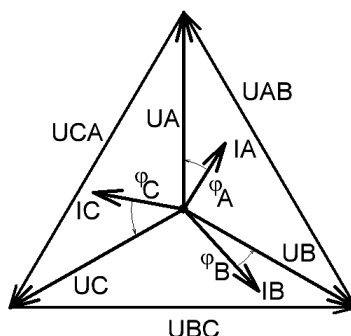


Рис. 6.9. Векторная диаграмма токов и напряжений при активно-индуктивной нагрузке

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, т.к. линейное напряжение в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного.

Необходимо помнить, что показание ваттметра равно произведению тока, проходящего через токовую обмотку, и 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.

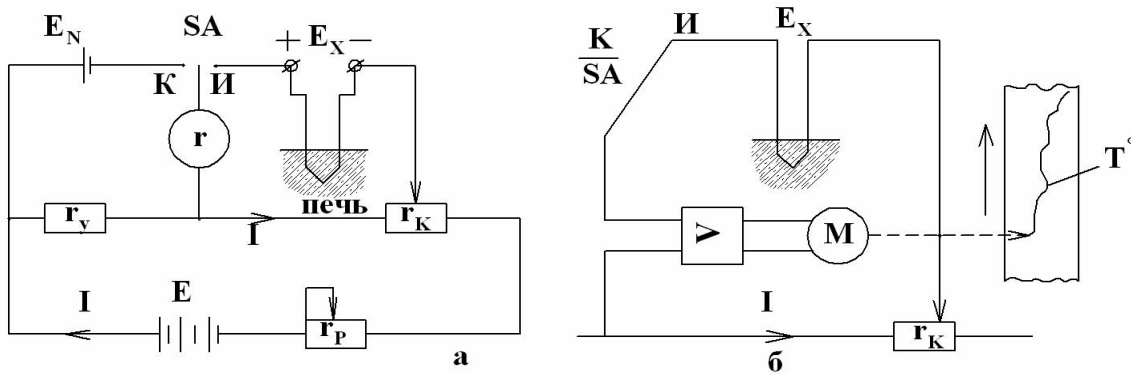


Рис. 6.10. Компенсационный метод измерения:  
 а – схема измерения; б – автоматический компенсатор (фрагмент)

Схема содержит источник  $E$ , служащий для создания рабочего тока,  $E_N = 1,01865 \text{ В}$  – 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  $r_y$ , добиваются нулевого показания гальванометра. В этом случае падение напряжения на установочном резисторе будет скомпенсировано ЭДС нормального элемента  $E_N = r_y I$ , рабочий ток  $I = \frac{E_N}{r_y}$ .

После установки рабочего тока ставят переключатель SA в положение И (измерение). Перемещением движка 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 поверки 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: возможности дистанционного измерения, автоматизации и управления технологическим процессом, практически безынерционности процесса измерения, высокой чувствительности, точности 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 два вида: **параметрические** и **генераторные**. Первые воздействуют неэлектрической величиной на электрические парамет-

ры (активное сопротивление, индуктивность, емкость). Они нуждаются в постороннем источнике энергии. Генераторные датчики преобразуют неэлектрическую величину в зависящую 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 градуировать в миллиметрах.

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 какую-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, *г*). В термометрах сопротивления используется свойство проводников или полупроводников изменять свое сопротивление при изменении температуры.

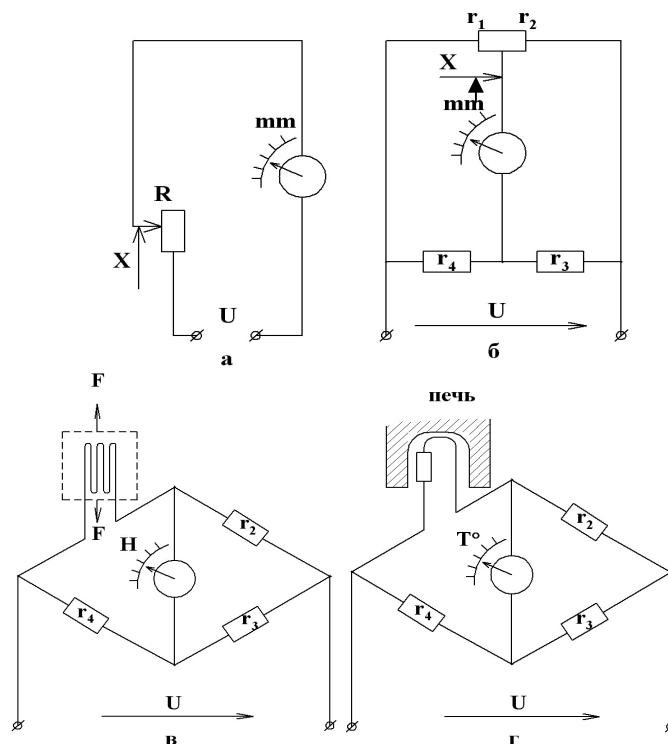


Рис. 6.11. Резистивные преобразователи:  
*а, б* – перемещения; *в* – давления; *г* – температуры

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*).

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  $L_1$  и  $L_4$ , а также  $L_2$  и  $L_3$  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, отградуированный в единицах давления, будет иметь обратную шкалу.

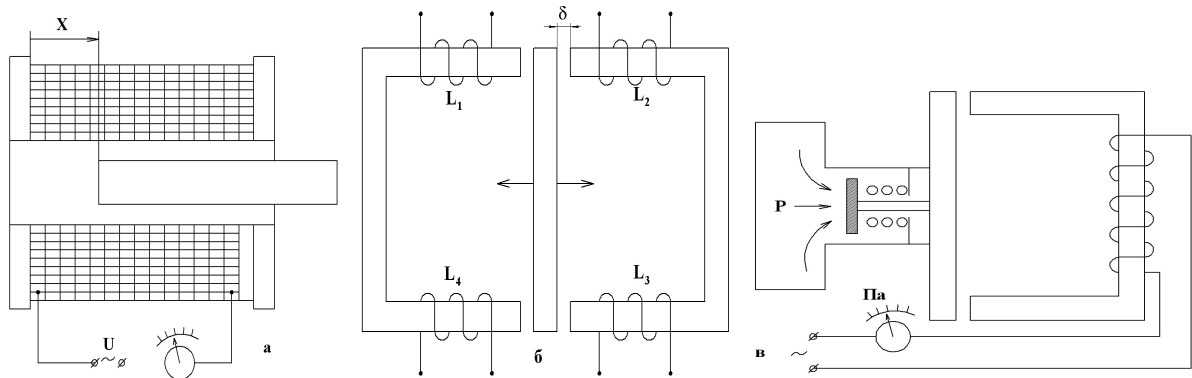


Рис. 6.12. Индуктивные преобразователи:  
*а* – линейного перемещения; *б* – давления; *в* – дифференциальный (собирается по мостовой схеме)

**Емкостные датчики** также могут быть использованы в качестве преобразователей перемещения. Емкость плоского конденсатора определяется абсолютной диэлектрической проницаемостью среды  $\epsilon$ , площадью пластин  $S$  и расстоянием  $d$  между ними,  $C = \frac{\epsilon S}{d}$ . В емкостных преобразователях 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, будет 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 – абсолютную диэлектрическую проницаемость  $\epsilon_2$  и  $C_2 = \frac{\epsilon_2 S_2}{d}$ .

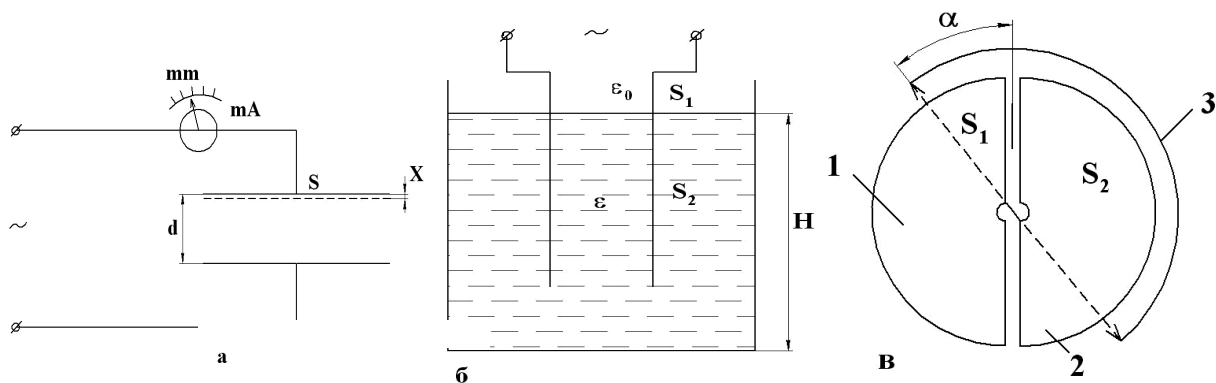


Рис. 6.13. Емкостные датчики:  
*a* – перемещения; *б* – уровня жидкости; *в* – углового перемещения

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 будут изменяться площади  $S_1$  (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 при-

бору, показание которого будет пропорционально разности температур спая и свободных концов. Термопары используются для измерения высоких температур от 600 до 1600 °С.

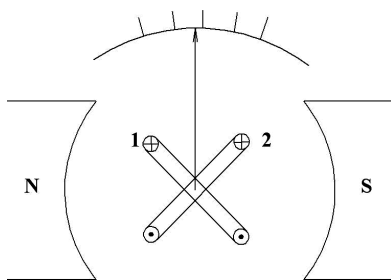
**Фотоэлектрические преобразователи** основаны на явлении фотоэффекта. При освещении фотоэлемента, фотодиода, фототранзистора на их зажимах возникает ЭДС, величина которой зависит от степени освещенности прибора.

**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, 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 О, 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

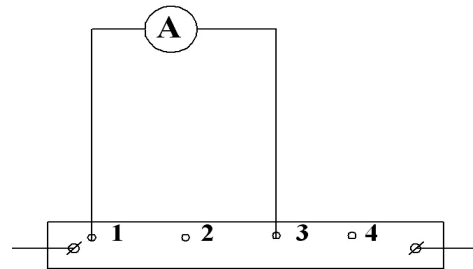


подключить к этому вольтметру, чтобы расширить его пределы измерения до 75 В? Определить минимальную мощность добавочного сопротивления.

Ответ: 9,6 кОм, 0,54 Вт.

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 (рис.)? Решение объяснить.



6. Почему ббльшему значению номинального напряжения многопредельного вольтметра соответствует ббльшее 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.

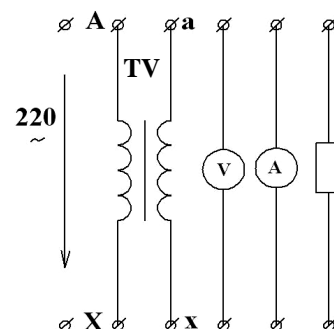
Ответ: TV 500/100, 225 В.

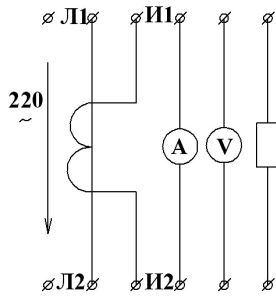
8. Выбрать трансформатор тока для измерения тока нагрузки номинальной мощностью 2 кВт и напряжением 220 В с помощью одноамперного прибора.

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

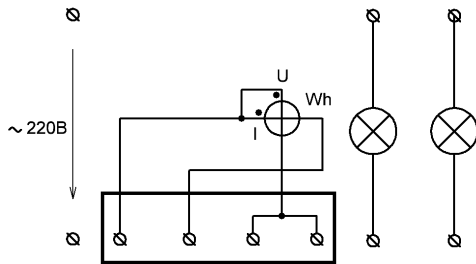
Ответ: ТА 50/5.

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

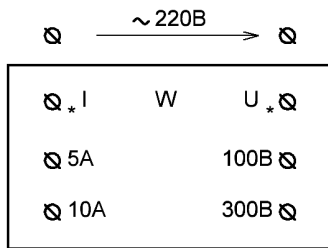




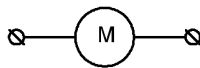
**10.** Составить монтажную схему питания нагрузки с измерением напряжения и тока в ней, сохранив расположение клеммных выводов электрооборудования на стенде (рис.).



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

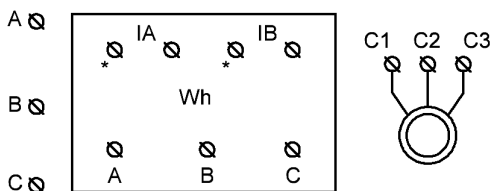


**12.** Как следует включить многопредельный ваттметр для измерения мощности однофазного электродвигателя, номинальная мощность которого равна 1,5 кВт?



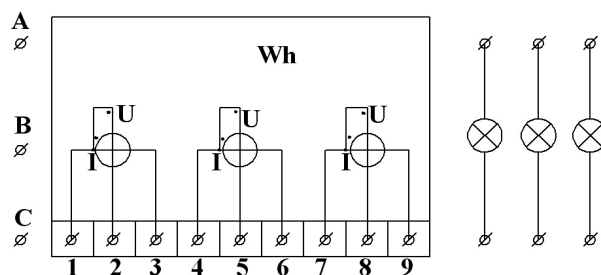
Чему будет равна цена деления прибора, имеющего 150 делений (рис.)?

Ответ: 20 Вт/дел.



**13.** Как следует подключить трехфазный двухэлементный счетчик активной энергии для измерения энергии, забираемой трехфазным электродвигателем из сети (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 (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)?

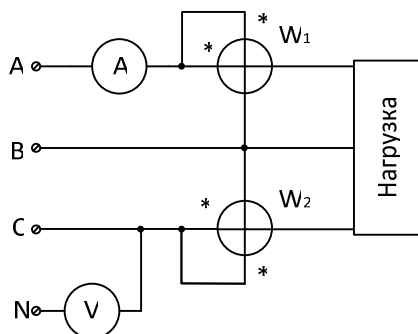
Перечислить типы и объяснить принцип работы тензодатчика.

**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.** Трехфазная сеть питает симметричный потребитель. Показание приборов: 220В, 10А и ваттметра  $P_1 = 0$ . Определить показание второго ваттметра.



## 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  $\Delta P = r_{л} I^2$ . 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).

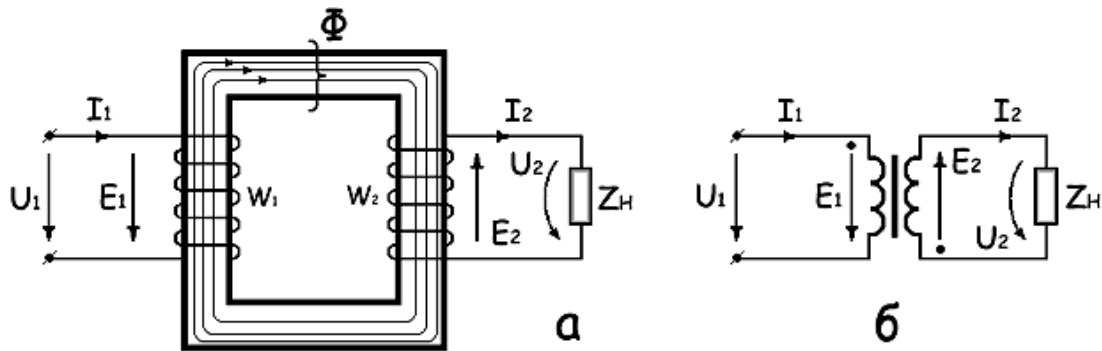


Рис. 7.1. Однофазный трансформатор (а) и его условное графическое изображение (б)

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

$$e_1 = -\frac{d\Psi_1}{dt} = -\frac{w_1 d\Phi}{dt} = -w_1 \Phi_m \cos(\omega t) \omega = \omega w_1 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = E_{1m} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}),$$

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, т.е. 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 (рис. 7.2, б) трансформаторы.

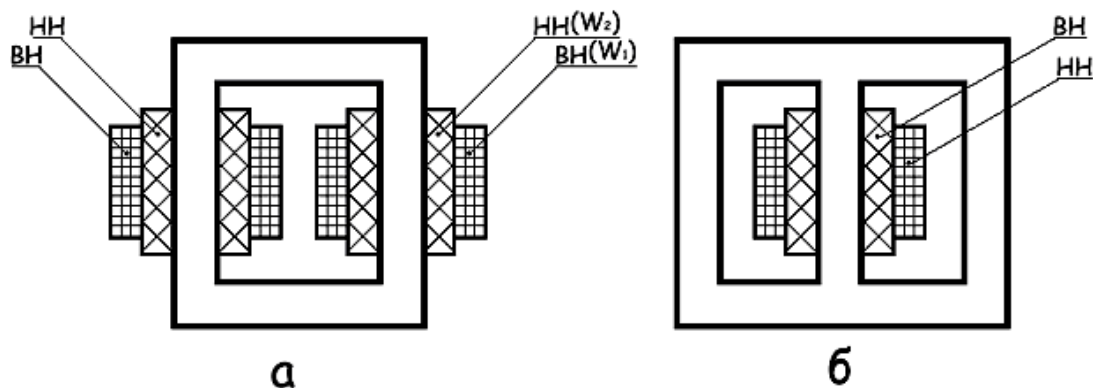


Рис. 7.2. Однофазные трансформаторы стержневого (а) и броневого (б) типов

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.

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).

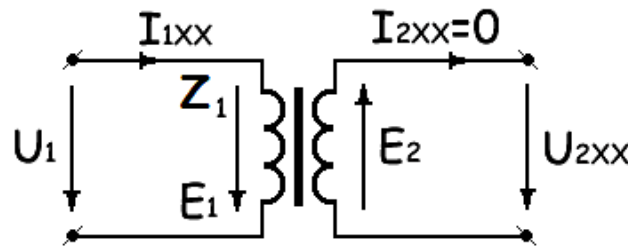


Рис. 7.3. Трансформатор в режиме холостого хода

По второму закону Кирхгофа для первичной и вторичной цепи

$$\dot{E}_1 = Z_1 \dot{I}_{1xx} - \dot{U}_1; \quad (7.4)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2, \quad (7.5)$$

где  $Z_1$  – полное сопротивление первичной обмотки, состоящее из активного сопротивления этой обмотки и индуктивного сопротивления  $Z_1$ , которое учитывает рассеяние магнитного потока

$$\dot{I}_{1xx} = \frac{\dot{E}_1 + \dot{U}_1}{Z_1}. \quad (7.6)$$

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)  $\dot{E}_1 \approx -\dot{U}_1$ , т.е. ЭДС, воз-

никающая 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

$$I_{1xx} w_1 = \frac{(\dot{H}_{ctm} l_{ct} + \dot{H}_{om} \delta)}{\sqrt{2}}, \quad (7.11)$$

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 качест-



веннее 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 уменьшаются, 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

$$\dot{U}_1 = Z_1 \dot{I}_1 - \dot{E}_1; \quad (7.12)$$

– для вторичной цепи

$$\dot{E}_2 = Z_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_2. \quad (7.13)$$

Для идеализированного трансформатора, если пренебречь падением напряжения в обмотках и рассеянием магнитного потока ( $Z_1 = Z_2 = 0$ ), уравнения электрического равновесия упрощаются:

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1, \quad (7.14)$$

$$\dot{E}_2 \approx \dot{U}_2. \quad (7.15)$$

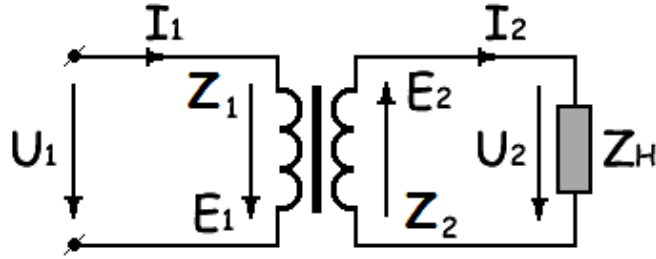


Рис. 7.4. Трансформатор под нагрузкой

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  $w_2 \dot{I}_2$  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)):

$$\dot{I}_1 = (\dot{U}_1 + \dot{E}_1) / Z_1.$$

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  $\dot{U}_1 = -\dot{E}_1$  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  $w_1 \dot{I}_{1xx}$ . Под нагрузкой МДС создается двумя токами  $w_1 I_1$  и  $w_2 I_2$ :

$$w_1 \dot{I}_{1xx} = w_1 \dot{I}_1 + w_2 \dot{I}_2. \quad (7.16)$$

Разделив левую и правую части на  $W_1$ , получим:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{1xx} - \frac{w_2 \dot{I}_2}{w_1}. \quad (7.17)$$

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  $\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2$  (см. формулу (7.15)). Если пренебречь падением напряжения во вторичной обмотке, то в соответствии со вторым законом Кирхгофа  $\dot{E}_2 = \dot{U}_2$ . Ток во вторичной обмотке  $\dot{I}_2 = \dot{U}_2 / Z_H$  будет сдвинут относительно напряжения на угол  $\varphi_2$ , определенный конкретной нагрузкой. Для активной нагрузки  $\varphi_2 = 0$  (на рис. 7.5 показан вектор  $I_2$ , отстающий от напряжения  $U_2$  на угол  $\varphi_2$  для активно-индуктивной нагрузки). Вектор ЭДС  $E_1$  совпадает по направлению с вектором ЭДС  $E_2$ , магнитный поток  $\Phi$  опережает векторы ЭДС на  $\pi/2$  ( $e = -d\psi/dt$ ). Ток холостого хода совпадает по фазе с магнитным потоком.

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.

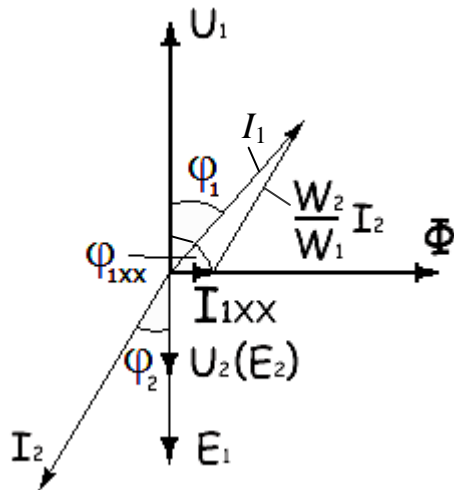


Рис. 7.5. Упрощенная векторная диаграмма трансформатора

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  $90^\circ$ .

### 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

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

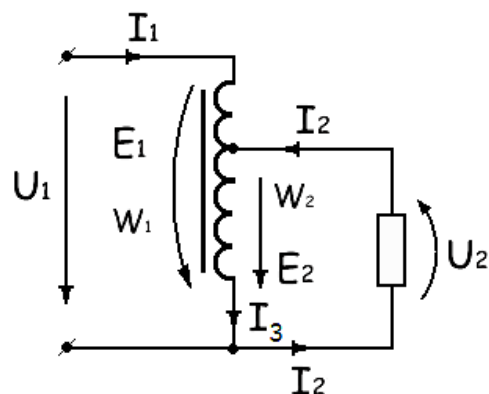
Пренебрегая падением напряжения в обмотках, можно записать:

$$U_1 = E_1 \text{ и } U_2 = E_2, \text{ т.е. } U_2 = U_1/K.$$

Если пренебречь током холостого хода (см. формулу (7.17)), связь между первичным и вторичным током определяется зависимостью

$$I_1 = \frac{w_2 I_2}{w_1}, \text{ т.е. } I_1 = \frac{I_2}{K}.$$

Рис. 7.6. Автотрансформатор



По общей для первичной и вторичной обмоток части течет суммарный ток  $\dot{I}_3 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$ , но т.к. 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.

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 неизолированной 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).

Начала и концы обмоток высшего напряжения обозначают буквами А, В, С и X, Y, Z, а низшего напряжения – а, b, с 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.

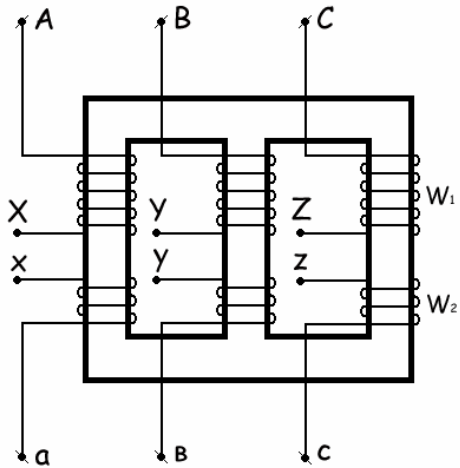


Рис. 7.7. Трехфазный трансформатор

Например,  $Y/\Delta$  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).

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:  $Y/Y_N$ ,  $Y/\Delta$  и  $Y_N/\Delta$ .

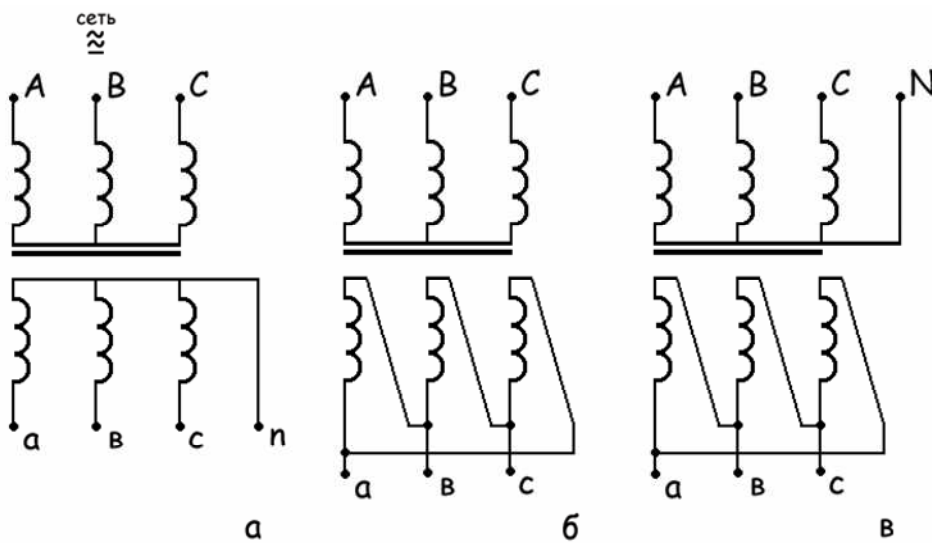


Рис. 7.8. Схемы соединения трехфазных обмоток:

$a - Y/Y_N$ ;  $б - Y/\Delta$ ;  $в - Y_N/\Delta$

Как и для однофазных трансформаторов, коэффициент трансформации трехфазного трансформатора определяется отношением фазных или линейных напряжений:

$$K_\phi = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} \text{ или } K_L = \frac{U_1}{U_2}.$$

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  $\Delta/Y$  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 – 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.

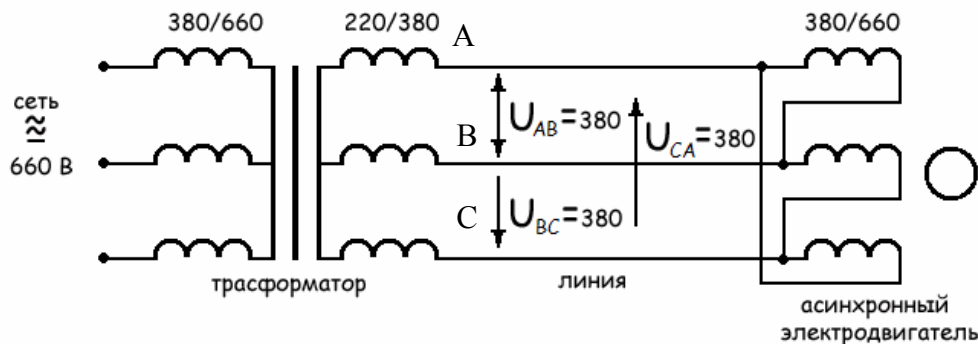


Рис. 7.9. Схема подключения трехфазной нагрузки к сети с помощью трехфазного трансформатора

Вторичные обмотки являются источником новой трехфазной сети и, например, запись  $\Delta/Y$  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.

### 7.9. Многообмоточные трансформаторы

Многообмоточные маломощные однофазные трансформаторы применяются в радиотехнике для получения одновременно нескольких различных по величине напряжений переменного тока. Обычно они имеют

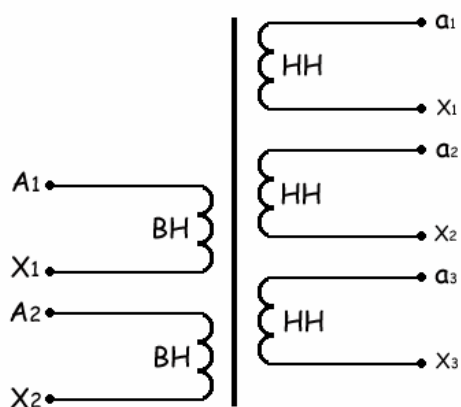


Рис. 7.10. Многообмоточный трансформатор

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.



## 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 (рис. 7.11):

$$Z_{\text{экв}} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{KU_2}{\frac{I_2}{K}} = K^2 \frac{U_2}{I_2} = K^2 Z_H.$$

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  $K = 10$ , который увеличивает сопротивление нагрузки в 100 раз. Правда, режим

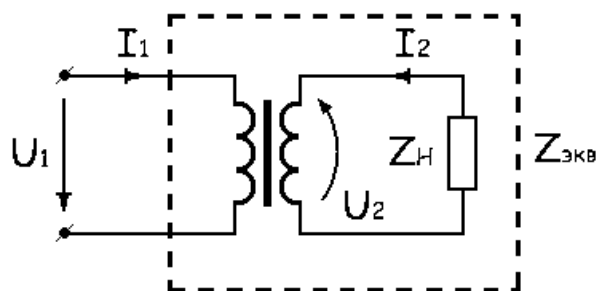


Рис. 7.11 . Включение нагрузки через согласующий трансформатор

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 TV 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.

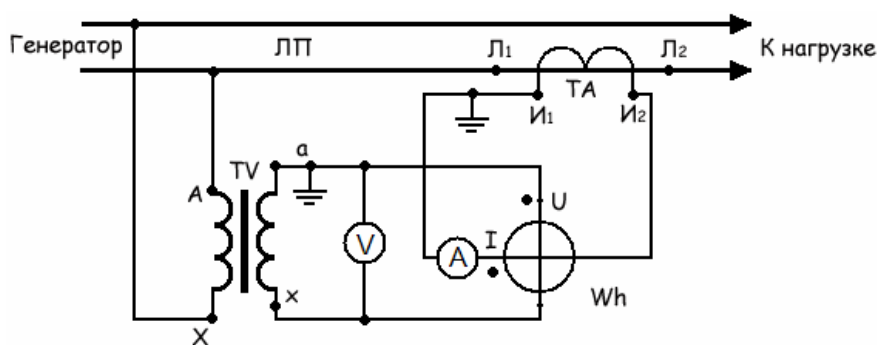


Рис. 7.12. Схема включения счетчика электрической энергии, амперметра и вольтметра с помощью измерительных трансформаторов

## 7.12. Сварочные трансформаторы

К силовым трансформаторам относятся сварочные трансформаторы, которые используются при дуговой электрической сварке. Их режим работы 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.

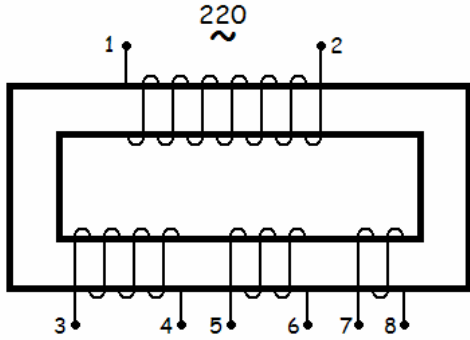
Если перемещать вторичную обмотку вдоль магнитопровода, удаляя ее от первичной, то сварочный ток будет уменьшаться. Это происходит потому, что часть магнитного потока, создаваемая током первичной обмотки, будет рассеиваться в пространстве и ЭДС вторичной обмотки будет уменьшаться. Обычно напряжение вторичной 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.

Ответ: 80 и 40 В; 240 и 120 В.

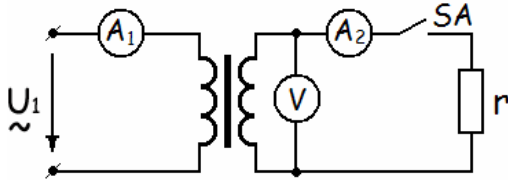


5. Какое минимальное количество вторичных обмоток однофазного трансформатора необходимо иметь и на какое напряжение они должны быть рассчитаны, чтобы получить ряд номинальных напряжений от 0 до 130 В через каждые 10 В?

Ответ: 3.

6. Три вторичные обмотки однофазного трансформатора рассчитаны на напряжения 12, 36 и 108 В. Какие напряжения можно получить во вторичной цепи кроме указанных?

Ответ: до 156 В через каждые 12 В.

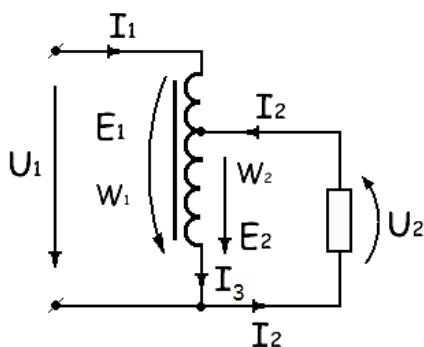


7. Как изменятся показания приборов, если:

- уменьшить число витков первичной обмотки;
- уменьшить число витков вторичной обмотки;
- увеличить напряжение питания;
- увеличить частоту питающего напряжения;
- увеличить сечение магнитопровода;
- убрать стальной сердечник

(рис.)?

Ответ: дать для разомкнутого и замкнутого тумблера SA.



8. Чему равны токи  $I_1$  и  $I_3$  автотрансформатора (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?

**9.** Как можно определить начало и конец вторичных обмоток трехфазного трансформатора с помощью вольтметра, если известна маркировка одной из них?

**10.** Как следует соединить три вторичные обмотки трехфазного трансформатора, чтобы получить наибольшее однофазное напряжение? Решение пояснить векторной диаграммой.

**11.** 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, соединенные треугольником?

Ответ: 3.

**12.** 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?

Ответ: 1,8 А; 45,1 А; 0,781.

**13.** Однофазный трансформатор, в первичную цепь которого включены амперметр и ваттметр, работая в номинальном режиме, питает группу ламп накаливания, ток которых контролируется амперметром. Как изменятся показания приборов и накал ламп, если отмотать половину первичной обмотки и включить ее на напряжение сети, уменьшенное в 2 раза? Током холостого хода пренебречь. Будет ли этот режим для первичной и вторичной обмоток трансформатора нормальным?

## 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.

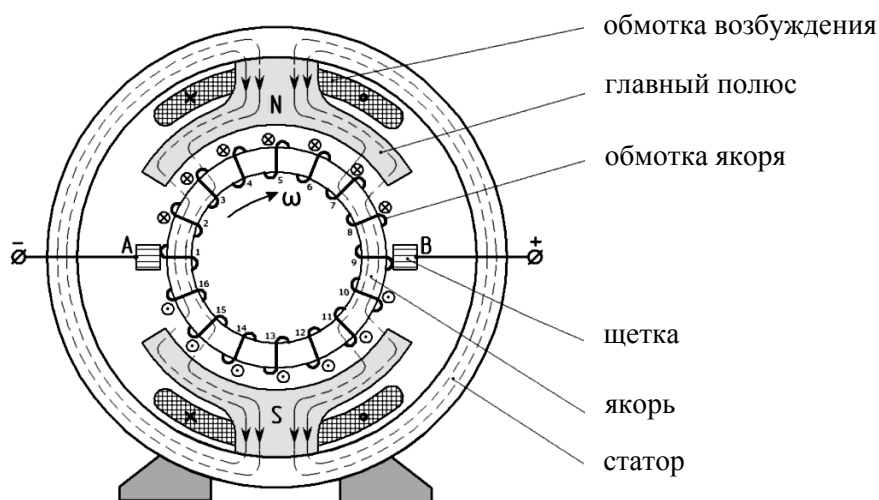


Рис. 8.1. Устройство машины постоянного тока

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).

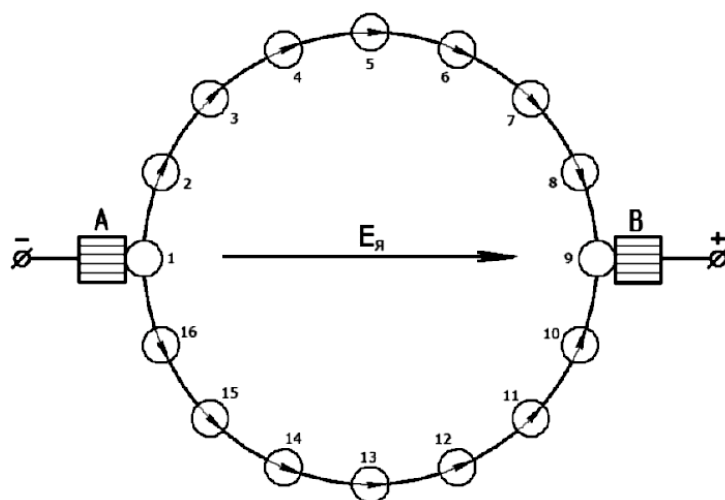


Рис. 8.2. Образование ЭДС якоря во вращающейся машине постоянного тока

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 паз под северным полюсом, то обратный провод уложен в паз под южным

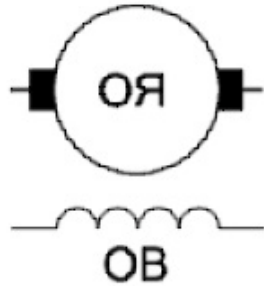


Рис. 8.3. Условное графическое изображение машины постоянного тока

полюсом. Таким образом, уменьшается длина неактивной части обмотки и повышается ЭДС обмотки якоря. 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  $\omega$  – угловая скорость вращения якоря (рад/с или  $\text{с}^{-1}$ );

$\Phi$  – 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  $I_{\text{я}}$ , то на этот ток действует сила  $f = lBI_{\text{я}}$ . 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:

$$M_{\text{ЭМ}} = \kappa \Phi I_{\text{я}}. \quad (8.2)$$

### 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  $E_{\text{я}}$ , 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  $I_{\text{я}}$ . Если этот элементарный источник тока замкнуть на электрическую нагрузку, то по второму закону Кирхгофа  $E_{\text{я}} = R_{\text{я}} I_{\text{я}} + U$  (рис. 8.4, б). То есть напряжение на зажимах якоря меньше его ЭДС на величину падения напряжения в обмотке якоря:

$$U = E_{\text{я}} - R_{\text{я}} I_{\text{я}}. \quad (8.3)$$

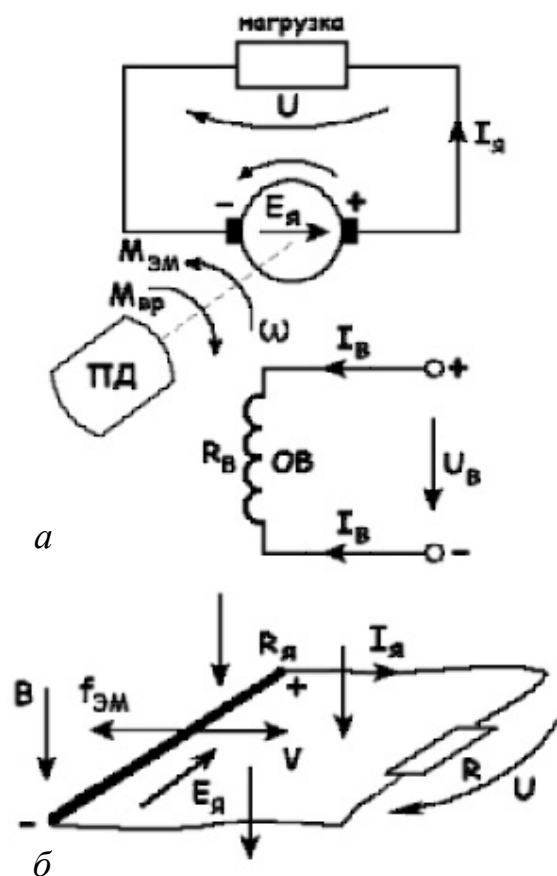


Рис. 8.4. Режим генератора

На ток в магнитном поле действует сила  $f$  (закон Ампера). Направление этой силы определяется правилом левой руки. Суммарное действие этих сил создает электромагнитный момент  $M_{\text{ЭМ}} = \kappa \Phi I_{\text{я}}$ , который направлен против вращения якоря. Это означает, что электромагнитный момент в генераторе является тормозным.

Если увеличить электрическую нагрузку (уменьшить внешнее сопротивление  $R$ ), то с возрастанием тока увеличивается тормозной электро-

магнитный момент и для вращения генератора необходимо увеличить вращающий момент первичного двигателя.

На холостом 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

$$\eta_{\text{г}} = \frac{P_{\text{эл}}}{P_{\text{мех}}}.$$

В зависимости от схемы включения обмотки возбуждения различают генераторы с независимым, параллельным, последовательным и смешанным возбуждением (рис. 8.5).

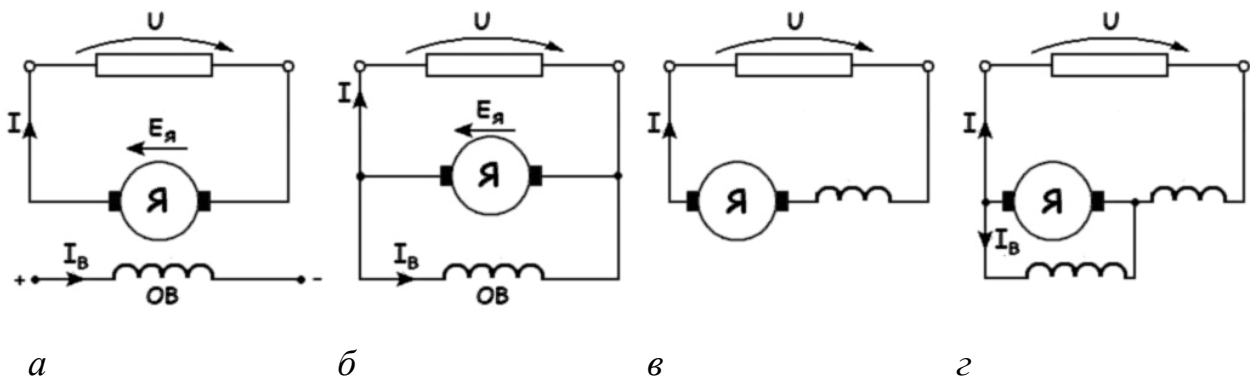


Рис. 8.5. Возбуждения генератора:  
*а* – независимое; *б* – параллельное; *в* – последовательное; *г* – смешанное

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  $\omega$ .

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.

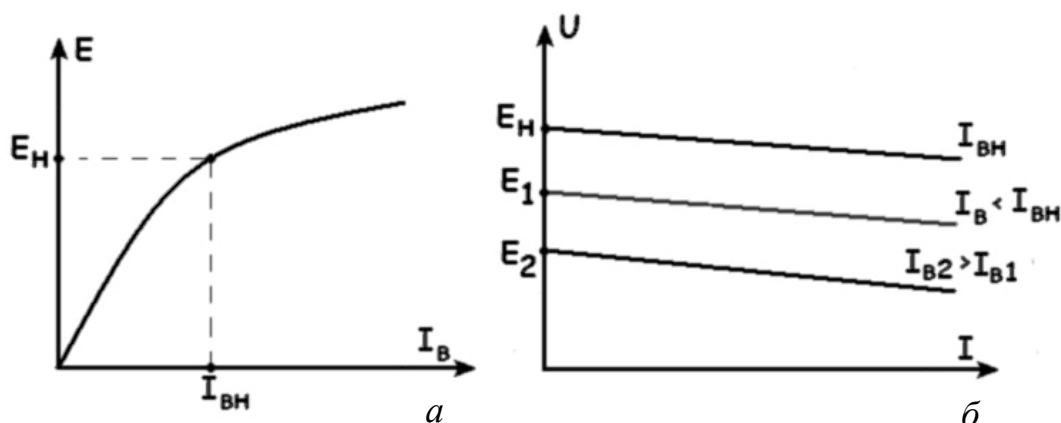


Рис. 8.6. Характеристики генератора:  
а – характеристика холостого хода; б – семейство внешних характеристик

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  $\omega$ . 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 создают электромагнитный момент, который вращает РМ, создающую момент сопротивления. В проводниках обмотки якоря, вращающегося с угловой скоростью  $\omega$ , возникает ЭДС, направленная навстречу току.

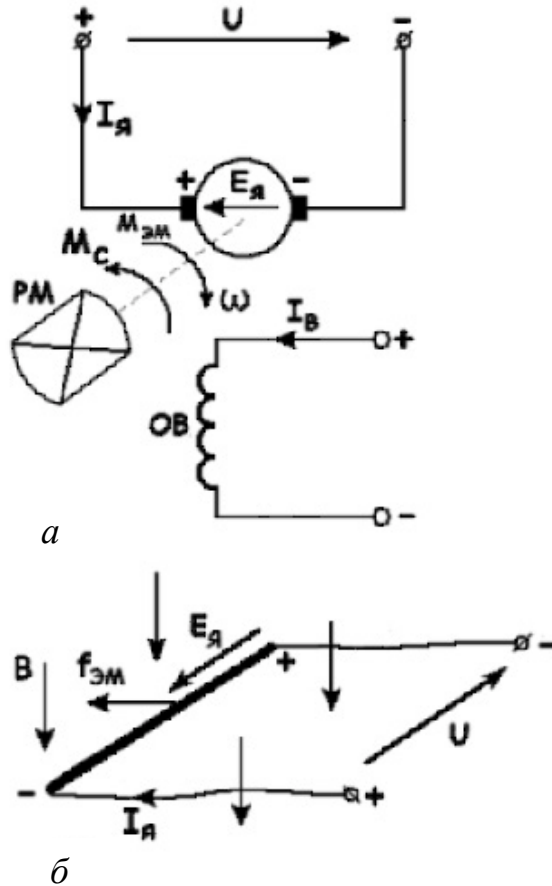


Рис. 8.7. Режим двигателя

форму (8.1)) и, как следствие, – к возрастанию тока якоря (см. формулу (8.4)). При этом электромагнитный момент  $M_{ЭМ}$  возрастает (см. формулу (8.2)). Увеличение электромагнитного момента будет происходить до тех пор, пока  $M_{ЭМ}$  не станет равным моменту сопротивления  $M_С$ .

**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

По второму закону Кирхгофа

$$E_я = U - R_я I_я$$

или

$$U = E_я + R_я I_я. \quad (8.3)$$

Напряжение источника должно уравновесить ЭДС якоря и падение напряжения в обмотке якоря.

Ток в обмотке якоря определяется не только напряжением сети, но и противоЭДС обмотки якоря, величина которой составляет около 90 % от напряжения сети в номинальном режиме.

$$I_я = \frac{U - E_я}{R_я}. \quad (8.4)$$

При увеличении механической нагрузки  $M_С$  скорость вращения двигателя падает. Это приводит к уменьшению противоЭДС (см. формулу (8.1)) и, как следствие, – к возрастанию тока якоря (см. формулу (8.4)).

машину РМ со скоростью  $\omega$ , развивая электромагнитный момент, равный и противоположно направленный моменту сопротивления рабочей машины.

При вращении в обмотке якоря возникает противоЭДС.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа

$$U = E_{\text{я}} + (R_p + R_{\text{я}})I_{\text{я}} = \kappa\Phi\omega + (R_p + R_{\text{я}})I_{\text{я}}, \quad (8.5)$$

откуда

$$\omega = \frac{U}{\kappa\Phi} - \frac{(R_p + R_{\text{я}})}{\kappa\Phi} I_{\text{я}}. \quad (8.6)$$

Ток якоря зависит от электромагнитного момента  $I_{\text{я}} = \frac{M_{\text{ЭМ}}}{\kappa\Phi}$ .

Следовательно,

$$\omega = \frac{U}{\kappa\Phi} - \frac{(R_p + R_{\text{я}})}{(\kappa\Phi)^2} M_{\text{ЭМ}}. \quad (8.7)$$

Зависимость (8.6)  $\omega = f(I_{\text{я}})$  называется электромеханической характеристикой, а зависимость (8.7)  $\omega = \varphi(M_{\text{ЭМ}})$  – механической характеристикой (рис. 8.8, б).

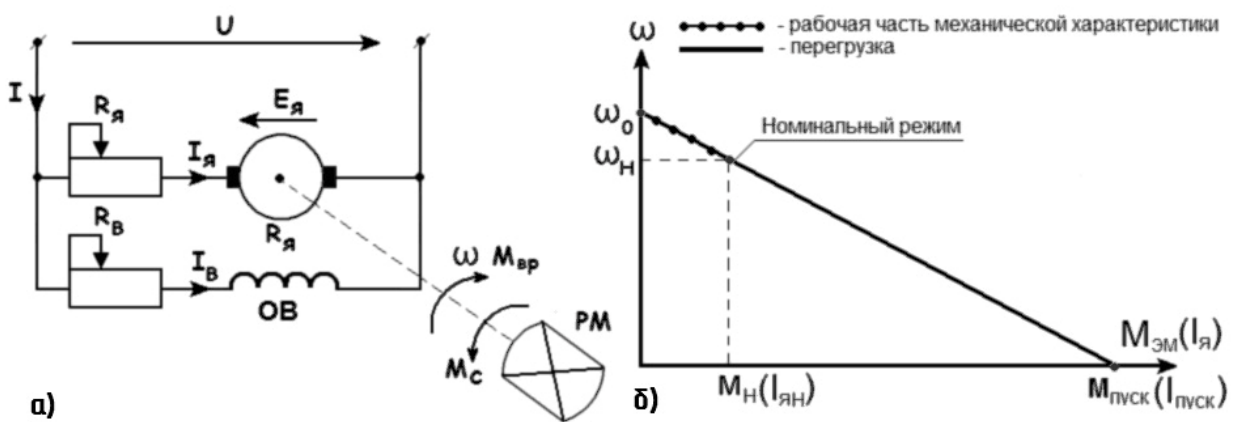


Рис. 8.8. Схема включения двигателя (а) и его электромеханическая и механическая характеристики (б)

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  $M_{\text{ЭМ}} = 0$  (режим холостого хода) скорость холостого хода  $\omega_0 = U/\kappa\Phi$  максимальна, с увеличением электромагнитного момента она уменьшает-

ся. 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  $\omega_0$ , 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 противоЭДС, 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).

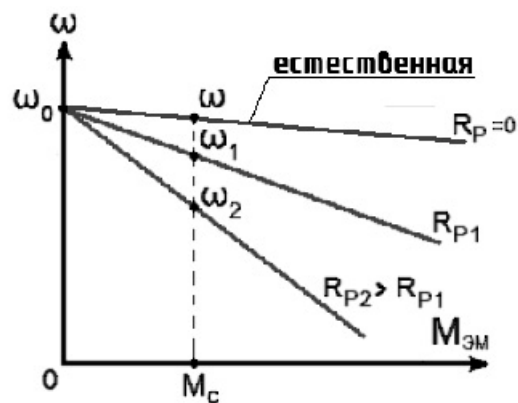


Рис. 8.9. Механические характеристики двигателя при изменении сопротивления в цепи якоря

Если в цепи якоря отсутствует регулировочное сопротивление ( $R_P = 0$ ), то такая характеристика называется естественной. При нагрузке  $M_C$  двигатель будет развивать скорость  $\omega$ . 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, сильноточной 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 применим 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 выбирают на изгибе кривой намагничивания, после которого наступает насы-

щение. Чтобы даже незначительно увеличить магнитный поток, необходимо резко увеличить ток возбуждения. При уменьшении 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.

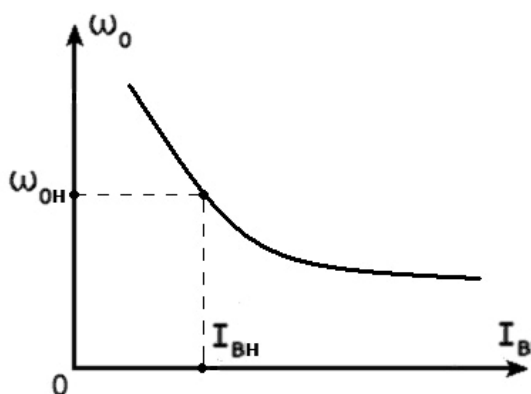


Рис. 8.10. Регулировочная характеристика холостого хода

При уменьшении магнитного потока увеличивается и наклон механической характеристики, которая становится более «мягкой». При этом способе регулирования при уменьшении магнитного потока скорость вращения может возрасть до величины  $\omega'_1$ , если нагрузка небольшая ( $M_{c1}$ ), но при больших нагрузках ( $M_{c2}$ ) скорость вращения будет уменьшаться до  $\omega'_2$  (рис. 8.11).

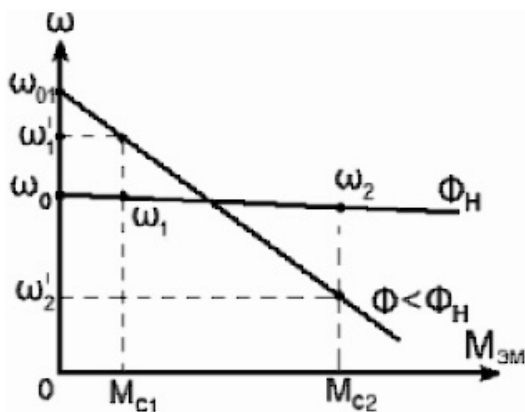


Рис. 8.11. Механические характеристики двигателя при изменении магнитного потока



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  $\omega$ , а скорость холостого хода  $\omega_0$  (рис. 8.12).

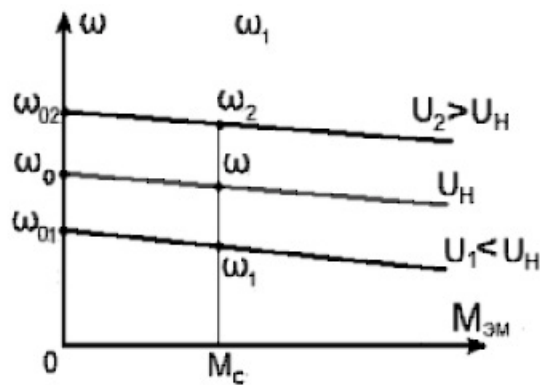


Рис. 8.12. Механическая характеристика двигателя при изменении напряжения сети

Если уменьшить ( $U_1$ ) или увеличить ( $U_2$ ) напряжение сети, то и скорости двигателя в режиме холостого хода и под нагрузкой  $M_C$  станут равными соответственно  $\omega_{01}$ ,  $\omega_1$  и  $\omega_{02}$ ,  $\omega_2$ .

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.

## 8.7. 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  $\Phi$ , 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  $\omega$ , ЭДС якоря  $E_Y$ , ток, потребляемый двигателем,  $I_Y$  и электромагнитный момент  $M_{ЭМ}$ . Эти четыре параметра являются зависимыми.

### 8.7.1. 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:

$$M_{ЭМ} = M_C, \text{ где } M_{ЭМ} = k\Phi I_Y.$$

Затем рассматривается электрическое равновесие – уравнение, составленное по второму закону Кирхгофа,

$$U = E_Y + R_{ЦЯ} I_Y,$$

где  $E_{\text{я}} = \kappa\Phi\omega$ , а сопротивление цепи якоря  $R_{\text{ЦЯ}} = R_{\text{я}} + R_{\text{рег}}$  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 сопротивления 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  $R_{\text{ЦЯ}}I_{\text{я}}$ , а так как  $U = \text{const}$ , то ЭДС якоря должна уменьшиться настолько, насколько увеличилось  $R_{\text{ЦЯ}}I_{\text{я}}$ . С уменьшением ЭДС якоря уменьшается и скорость вращения двигателя, т.к. магнитный поток мы не изменяли.

Другой пример. Как будут изменяться  $\omega$  и  $I_{\text{я}}$  с уменьшением магнитного потока (тока возбуждения)?

Так как  $M_{\text{с}} = \text{const}$ , то  $M_{\text{эм}} = \kappa\Phi I_{\text{я}}$  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  $E_{\text{я}} = \kappa\Phi\omega$ , 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 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).**

### 8.7.2. 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  $E_{\text{я}} = k\Phi\omega$  остается прежней, то скачкообразно увеличивается ток в обмотке якоря:

$$I_{\text{я}} = \frac{(U - E_{\text{я}})}{R_{\text{я}}},$$

следовательно, и электромагнитный момент. Т.к. момент сопротивления мы не изменяли, то нарушается механическое равновесие и скорость привода возрастает. При этом увеличивается противоЭДС 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. 8.13, а. При  $t = 0$  происходит коммутация, т.е., в данном случае, – включение двигателя на повышенное напряжение.

Если известны механические характеристики двигателя при различных напряжениях, то можно количественно определить скорость вращения якоря  $\omega_2$  в новом установившемся режиме и то, как протекает переходный процесс (рис. 8.18, б).

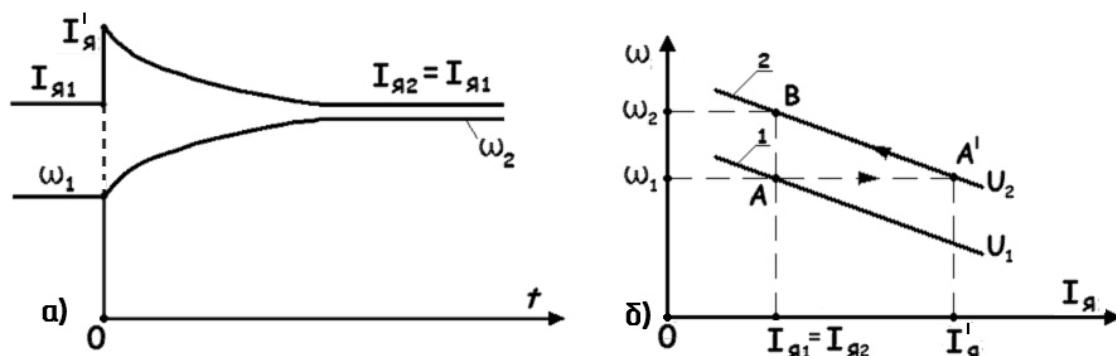


Рис. 8.13. Переходной процесс при увеличении напряжения сети: а – временная диаграмма; б – электромеханическая характеристика

Пусть режим работы двигателя соответствовал точке А на электро-механической характеристике. При увеличении напряжения до величины  $U_2$  ток якоря возрастает до величины  $I'_я$  (точка А') при скорости  $\omega_1$ , 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.

### 8.8. 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  $I_я = \frac{(U - E_я)}{R_я}$ , где  $E_я = k\Phi\omega$ . Однако в момент пуска скорость двигателя равна нулю и ЭДС якоря равна нулю, поэтому пусковой ток якоря  $I_я = \frac{U}{R_я}$  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:  $I_{япуск} = \frac{U}{R_я + R_{пуск}} = (1,5...2,5)I_{ян}$ . 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. 8.14, а).

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.

Для пуска двигателя нажимают на кнопку SB1. Срабатывает контактор КМ1, 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 С) до точки В по искусственной электромеханической характеристике (см. рис. 8.14, б).

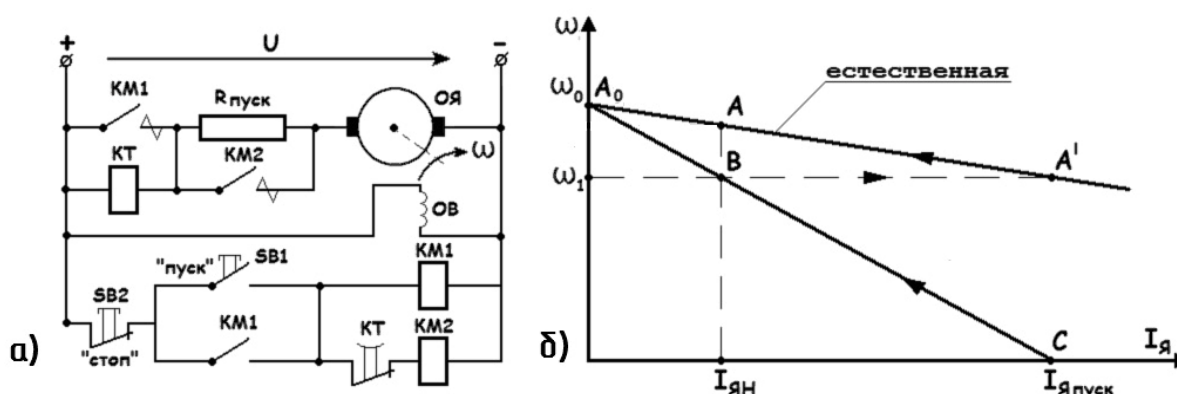


Рис. 8.14. Электрическая схема (а) и электромеханические характеристики (б) при двухступенчатом пуске в ход двигателя постоянного тока

При достижении скорости  $\omega_1$  замыкается контакт КТ и включается второй контактор, который своим силовым контактом шунтирует пусковое сопротивление. В этот момент происходит скачок тока (точка А'), и в дальнейшем режим работы двигателя изменяется от точки А' до точки А (номинальный режим) по естественной электромеханической характеристике. Если разгон двигателя происходит без нагрузки, то установившийся режим будет соответствовать не точке А, а точке А<sub>0</sub> (режим холостого хода).

### 8.9. 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 (сериесная) главных полюсов включаются последовательно с обмоткой якоря, а обмотка параллельного возбуждения (шунтовая) – на полное напряжение сети. Схема включения двигателя показана на рис. 8.15.

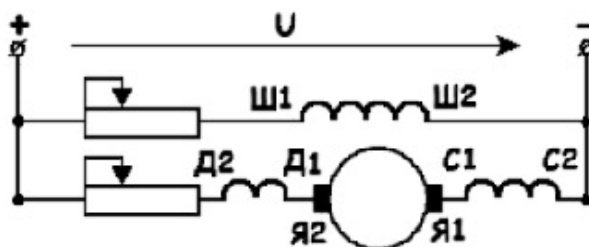


Рис. 8.15. Схема включения двигателя смешанного возбуждения

Для изменения направления вращения якоря изменяют полярность обмоток, располагающихся на главных полюсах, – шунтовой и сериесной. Направление тока в обмотке добавочных полюсов и обмотке якоря оставляют прежним.

### 8.10. Исполнительные двигатели постоянного тока

В схемах автоматики, управления, регулирования и контроля применяются двигатели, с помощью которых электрический сигнал (напряжение управления) преобразуется 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. 8.16, *а*), либо обмотка возбуждения (обмотка полюсов – двигатели с полюсным управлением, рис. 8.16, *б*).

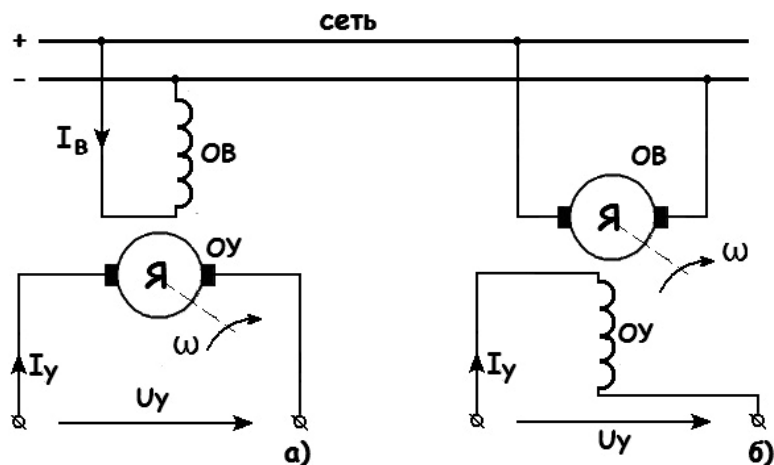


Рис. 8.16. Схема включения исполнительного двигателя с якорным (*а*) и полюсным (*б*) управлением

### 8.11. Тахогенераторы постоянного тока

Тахогенератор постоянного тока – машина постоянного тока с независимым возбуждением (рис. 8.17, *а*) или возбуждением постоянными магнитами (рис. 8.17, *б*), работающая в генераторном режиме.

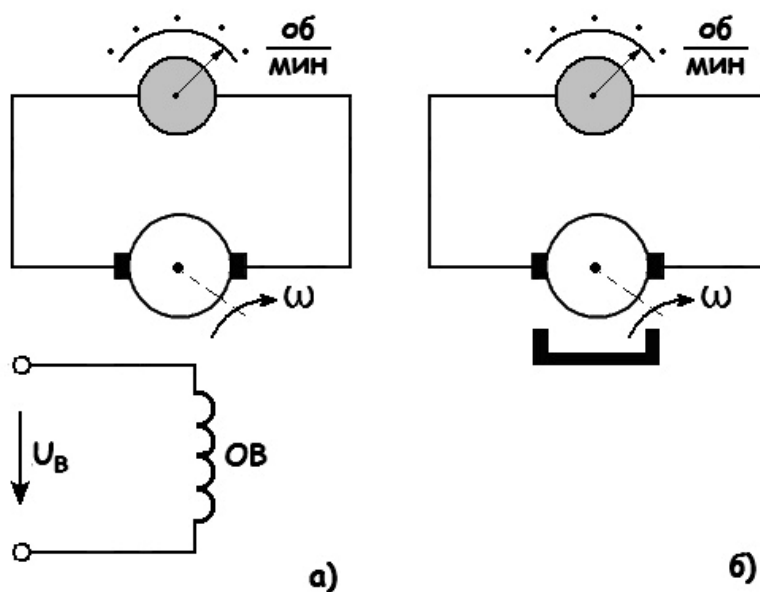


Рис. 8.17. Схема включения тахогенератора постоянного тока с возбуждением: *а* – независимым; *б* – от постоянных магнитов



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 расединить муфту сцепления между валами рабочей машины и двигателя?

4. Как изменится скорость вращения двигателя  $\omega$  независимого возбуждения, ток обмотки якоря  $I_{я}$ , ЭДС обмотки якоря и электромагнитный момент  $M_{ЭМ}$ , если:

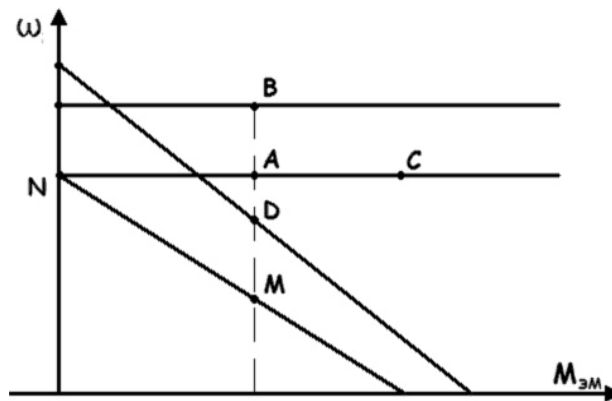
- изменить (увеличить или уменьшить) напряжение сети;
- включить сопротивление в цепь якоря;
- уменьшить ток в цепи возбуждения;
- изменить механическую нагрузку на валу двигателя.

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 (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 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.

**11.** По результатам двух опытов определить сопротивление обмотки якоря двигателя постоянного тока независимого возбуждения, включенного в сеть напряжением 220 В. При нагрузке, соответствующей току якоря 9 А, двигатель вращался с частотой  $\eta_1 = 3000$  об/мин, а при токе 4,5 А –  $\eta_2 = 3100$  об/мин. Определить электромагнитные моменты в обоих случаях, а также частоту вращения при холостом ходе.

План решения:

Записать уравнения электромеханической характеристики двигателя для двух значений тока якоря  $\omega = \frac{U}{k\Phi} - \frac{r_{\text{я}}}{k\Phi} = I_{\text{я}}$  и найти два неизвестных:  $k\Phi$  и  $r_{\text{я}}$ . После этого можно найти электромагнитные моменты  $M = k\Phi I_{\text{я}}$  и электромагнитные мощности  $P = \omega M$ , а также частоту вращения в режиме холостого хода  $\omega_0 = v/k\Phi$ .

Ответ:  $r_{\text{я}} = 1,53$  Ом;  $M_1 = 5,88$  Нм;  $M_2 = 2,94$  Нм;  $P_1 = 1,85$  кВт;  $P_2 = 0,955$  кВт;  $\eta_0 = 3214$  об/мин.

**12.** Определить номинальный электромагнитный момент двигателя постоянного тока независимого возбуждения, включенного в сеть напряжением  $U = 220$  В, если в номинальном режиме он развивал 1400 об/мин. при включении сопротивления в цепь якоря  $R_{\text{доб}} = 2$  Ом – 1200 об/мин., а в режиме холостого хода – 1500 об/мин. Какова приблизительно мощность на валу двигателя.

План решения:

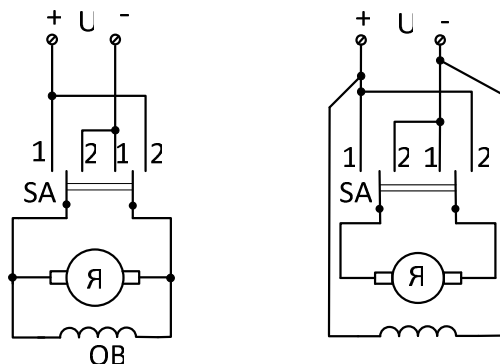
Вначале определить  $k\Phi$  по частоте вращения двигателя в режиме холостого хода  $k\Phi = U/\omega_0$ .

Затем составить два уравнения электромеханической характеристики при номинальном токе: естественной и при включении добавочного сопротивления в цепь якоря. Решая два уравнения с двумя неизвестными, определить  $r_{\text{я}}$  и  $I_{\text{я}}$ , а затем электромагнитный момент  $M = k\Phi I_{\text{я}}$ .

Вопрос: почему ток холостого хода асинхронного двигателя значительно больше тока трансформатора такой же мощности?

Ответ:  $M = 20,5$  Нм,  $P \approx 2,2$  кВт.

**13.** Позволяют ли схемы с помощью двухполюсного переключателя SA с нейтральным положением реверсировать двигатель постоянного тока? Нарисуйте с помощью такого же переключателя еще одну схему реверсирования.



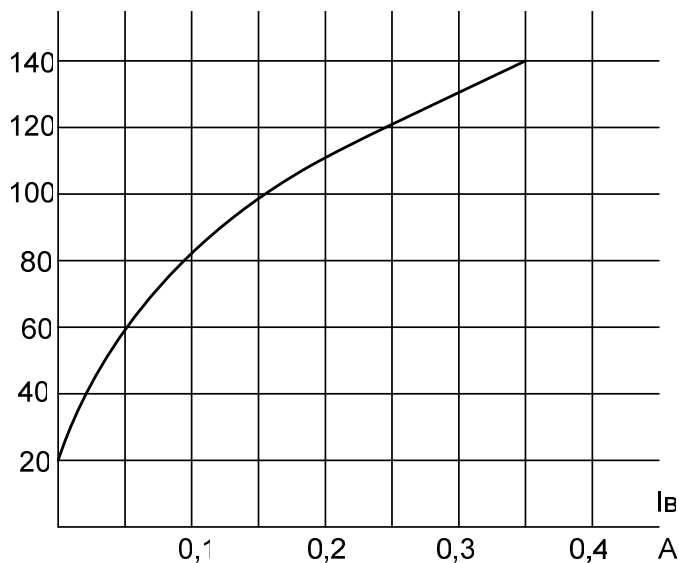
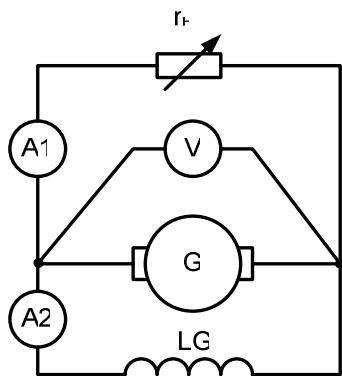
**14.** Определить сопротивление обмотки якоря двигателя постоянного тока параллельного возбуждения с известной электромеханической характеристикой (см. задача № 11), если напряжение сети  $U = 220$  В.

План решения аналогичен плану решения задачи № 11.

Ответ: 2 Ом.

**15.** Показания приборов в номинальном режиме:  $I_1 = 5$  А,  $I_2 = 0,25$  А,  $U = 115$  В.

Определить показание амперметра  $A_1$ , если при изменении нагрузки вольтметр показал 112 В. Считать характеристику холостого хода линейной в интервале тока возбуждения от 0,15 до 0,3 А. Определить сопротивление нагрузки  $r_n$  для режима, при котором вольтметр показал 69 В.



План решения:

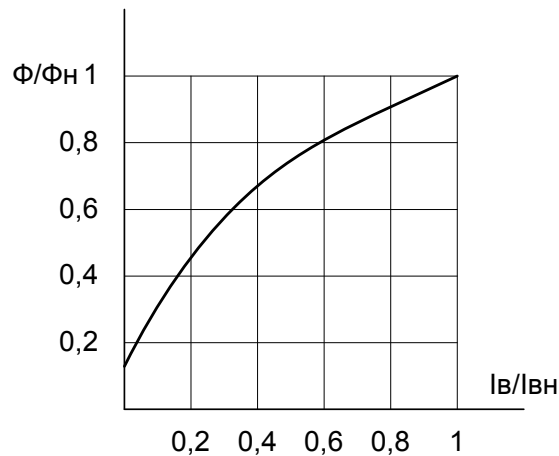
По исходным данным можно определить ЭДС генератора, сопротивление обмотки возбуждения и ток в цепи якоря. Составив уравнение по второму закону Кирхгофа для цепи нагрузки, можно определить сопротивление обмотки якоря.

В новом режиме по напряжению определяют ток возбуждения и новое значение ЭДС. Затем по второму закону Кирхгофа можно определить ток якоря, а ток нагрузки будет меньше тока якоря на величину тока возбуждения. Аналогично определяют ток нагрузки и его сопротивление при  $U = 69 \text{ В}$ .

Ответ: 6,79 А, 2,13 Ом.

**16.** Во сколько раз изменится ток якоря двигателя постоянного тока параллельного возбуждения, если напряжение сети уменьшилось на 20 %, а момент нагрузки остался неизменным. Зависимость магнитного потока от тока возбуждения показана на рис.

Ответ:  $I_{я}/I_{ян} = 1,11$ .



## 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  $90^\circ$ , 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  $B_2$ . (рис. 9.1, б).

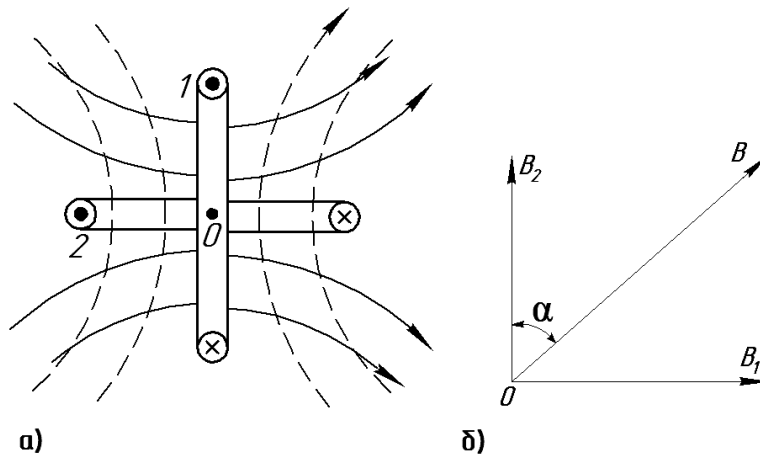


Рис. 9.1. Образование ВМП двухфазной системой токов:  
а – схема; б – векторная диаграмма

Так как векторы  $B_1$  и  $B_2$  сдвинуты на  $90^\circ$ , 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  $\alpha$  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  $\alpha$  непрерывно и равномерно возрастает во времени, т.е. вектор индукции  $B$  равномерно вращается с угловой скоростью  $\omega$ , 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  $90^\circ$  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  $120^\circ$ , по которым протекают синусоидальные токи, сдвинутые во времени на треть периода, т.е. по фазе на  $120^\circ$  (рис. 9.2, *а*).

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 (рис. 9.2, *б*).

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.

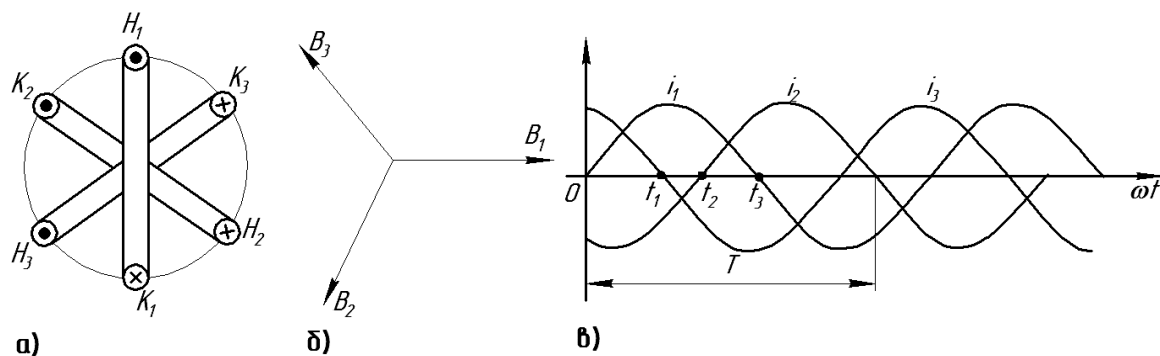


Рис. 9.2. Трехфазная система токов

Как показано на рис. 9.3, через  $1/6$  часть периода магнитное поле поворачивается на  $60^\circ$ . Картина поля получится такой, какую бы создавал постоянный магнит, вращаясь со скоростью  $\omega_0$ .

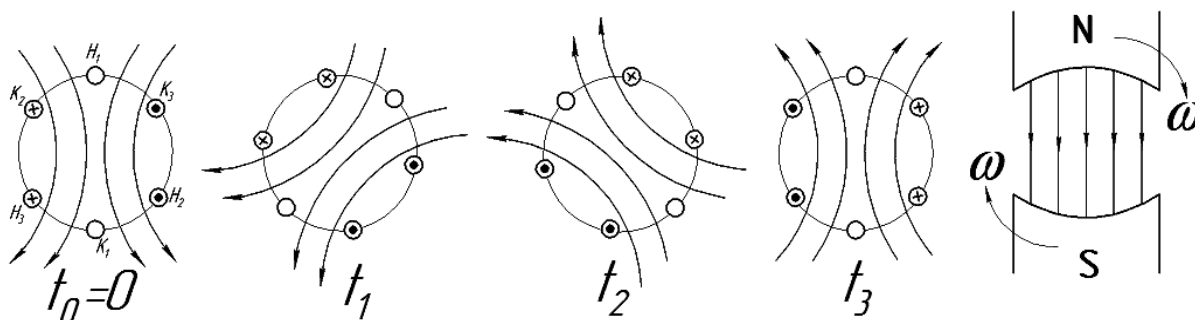


Рис. 9.3. Картина магнитного поля трехфазной системы токов

**Система трех синусоидальных токов, сдвинутых в пространстве на  $120^\circ$  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, а, где вторая секция обозначена индексом «штрих»), то, соединяя их последовательно и со-



гласно (конец первой секции соединен с началом второй), получим 2 пары полюсов (рис. 9.4, б и рис. 9.5), а соединяя их последовательно и встречно – одну пару полюсов (рис. 9.4, в и рис. 9.6).

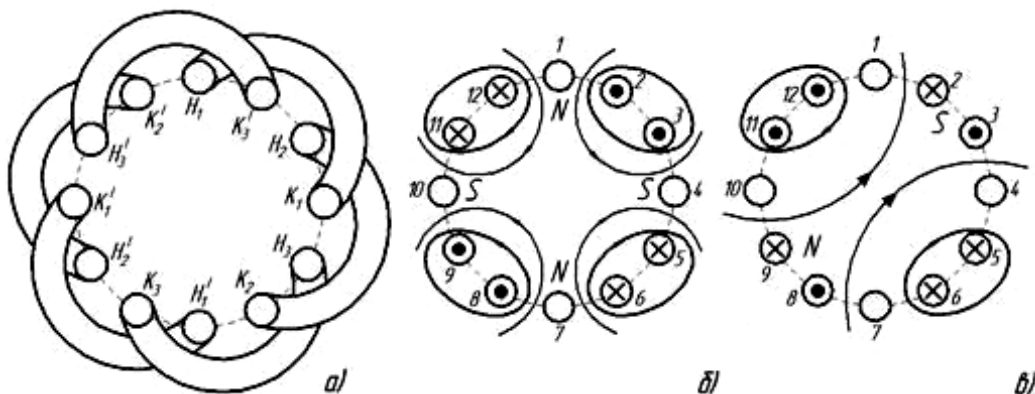


Рис. 9.4. Двухсекционная трехфазная обмотка (а); токо- и потокораспределение в секциях при согласном (б) и встречном (в) их включении

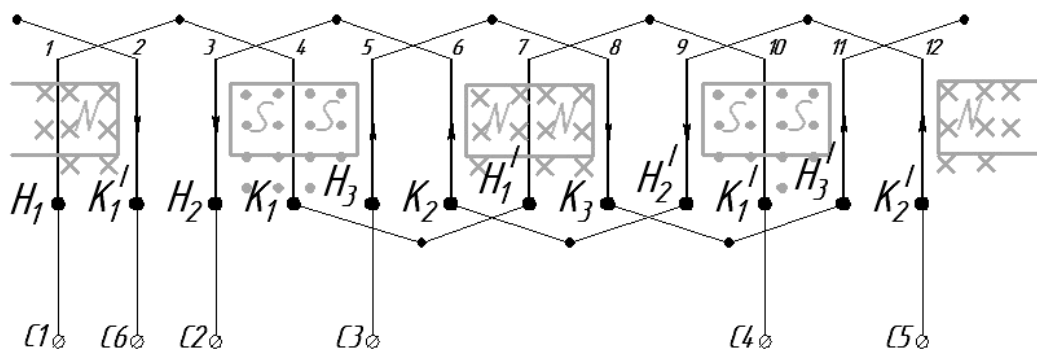


Рис. 9.5. Последовательное согласное соединение двух секций трехфазной обмотки

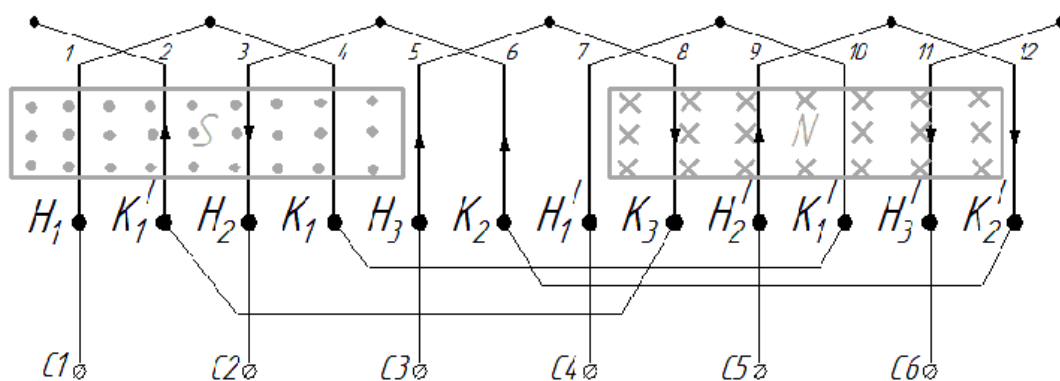


Рис. 9.6. Последовательное встречное включение двух секций трехфазной обмотки

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*.

Неподвижная часть машины – статор – представляет собой полый цилиндр, составленный из листов электротехнической стали. Зубчатые листы в сборе образуют на внутренней поверхности пазы, в которые укладывается 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 (рис. 9.8, *б*).

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.

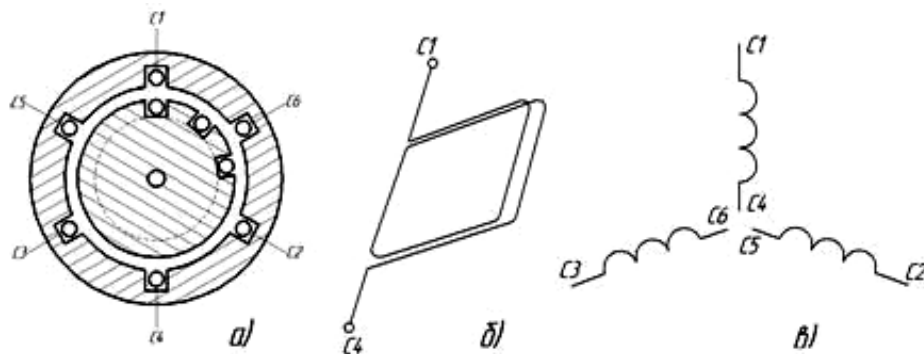


Рис. 9.7. Асинхронный двигатель:  
*a* – устройство; *б* – фазная обмотка; *в* – обмотки статора

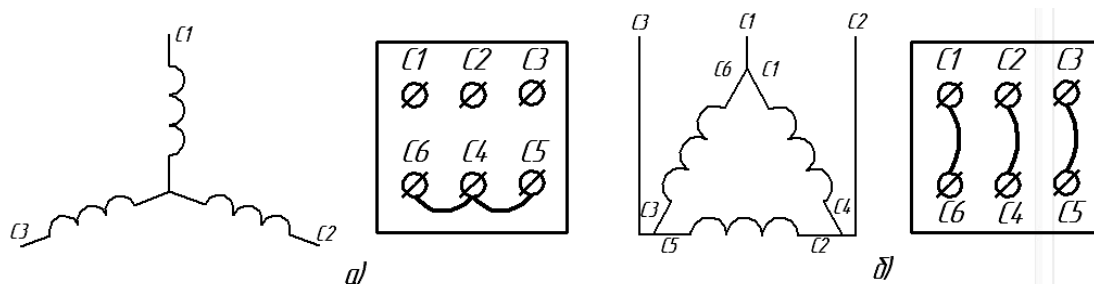


Рис. 9.8. Схема подключения АД к сети:  
*a* – звездой; *б* – треугольником

**Короткозамкнутая обмотка** (рис. 9.9, *a*) выполняется в форме «беличьего 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.

**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 (рис. 9.9, *б*).

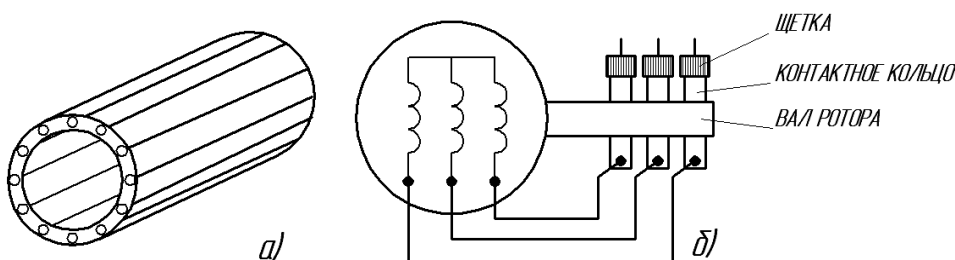


Рис. 9.9. Обмотки ротора:  
*a* – короткозамкнутого; *б* – фазного

### 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  $\omega_0$  магнитов (рис. 9.10).

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.

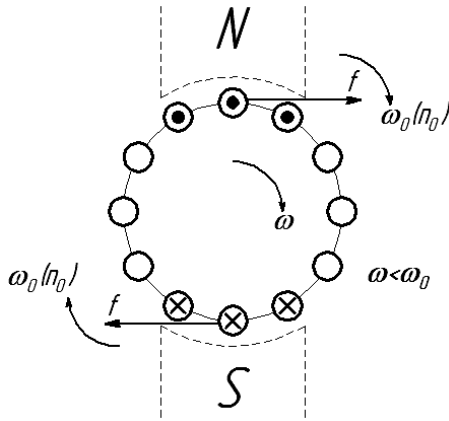


Рис. 9.10. Принцип работы асинхронного двигателя

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, т.е. поле статора увлекает за собой ротор.

Однако скорость вращения ротора  $\omega$  должна быть меньше скорости вращения поля  $\omega_0$ . 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, т.е. увеличивается скорость относительного дви-

жения ротора и ВМП ( $\omega_0 - \omega$ ), увеличиваются ЭДС в проводниках ротора, ток и вращающий момент.

Уменьшение скорости ротора и возрастание вращающего электромагнитного момента  $M_{эвр}$  будет происходить до тех пор, пока не наступит механическое равновесие:  $M_{эвр} = M_c$ , 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.

Вращающий момент в асинхронном двигателе пропорционален не только магнитному потоку и току в проводниках ротора  $I_p$ , но и фазному сдвигу  $\psi$  между ЭДС и током в роторе:

$$M = c\Phi I_p \cos\psi, \quad (9.1)$$

где  $\Phi$  – 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  $\psi$ , а  $\cos\phi$  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 (рис. 9.11, б).

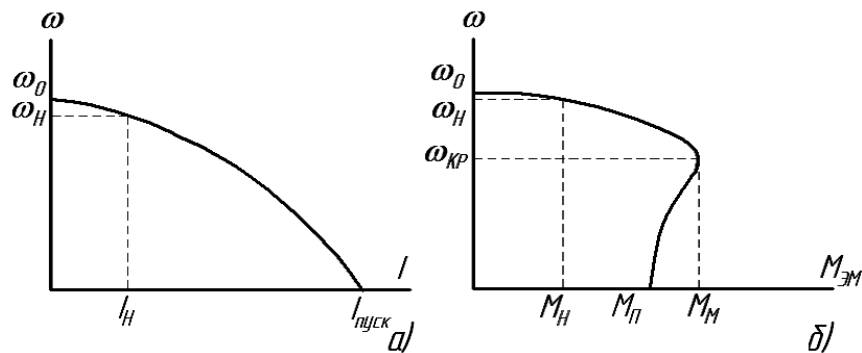


Рис. 9.11. Электромеханическая (а) и механическая (б) характеристики асинхронного двигателя

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

$$K_{\Pi} = \frac{M_{\Pi}}{M_H} = 1,1 - 1,6. \quad (9.3)$$

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. Действи-

тельно,  $M_H = \frac{2M_M}{\frac{S_{кр}}{S_H} + \frac{S_H}{S_{кр}}}$ , 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;

$\eta_H$  – 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,  $\Delta/Y$  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  $\varphi$  (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  $\varphi$  и выше коэффициент мощности  $\cos\varphi$ .

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.

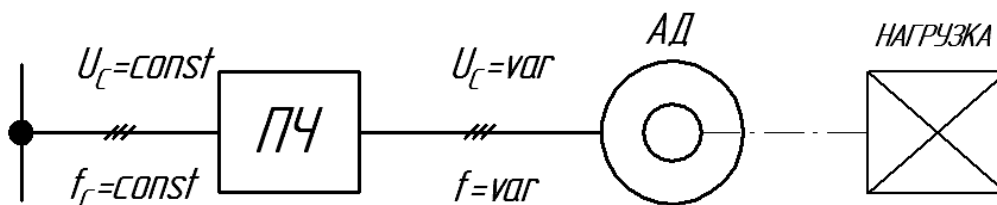


Рис. 9.13. Блок-схема частотного регулирования скорости вращения асинхронного двигателя

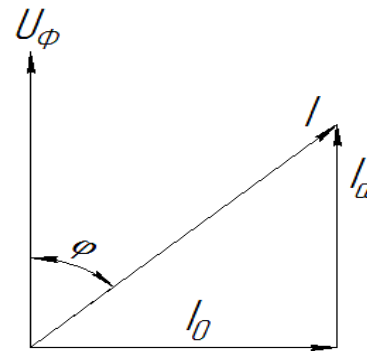


Рис. 9.12. Упрощенная векторная диаграмма электродвигателя

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  $180^\circ$ , 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  $90^\circ$  (рис. 9.14, а).

*Принцип работы.* При питании обмотки статора переменным током создается пульсирующее магнитное поле с амплитудой  $\Phi_m$ , которое можно представить двумя вращающимися в противоположные стороны полями величиной  $\Phi_m / 2$ . В любой момент времени сумма вращающихся потоков равна действительному пульсирующему потоку (рис. 9.14, б). Каж-

дому вращающемуся полю соответствует механическая характеристика: прямое поле создает положительный вращающийся момент, обратное поле – отрицательный, тормозной. Каждой скорости соответствуют различные 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  $M_c$  (рис. 9.14, в), то после сообщения ротору скорости немного выше  $\omega_1$  вращающийся момент станет больше  $M_c$  и двигатель самостоятельно начнет набирать обороты до скорости  $\omega$ , 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  $90^\circ$ .

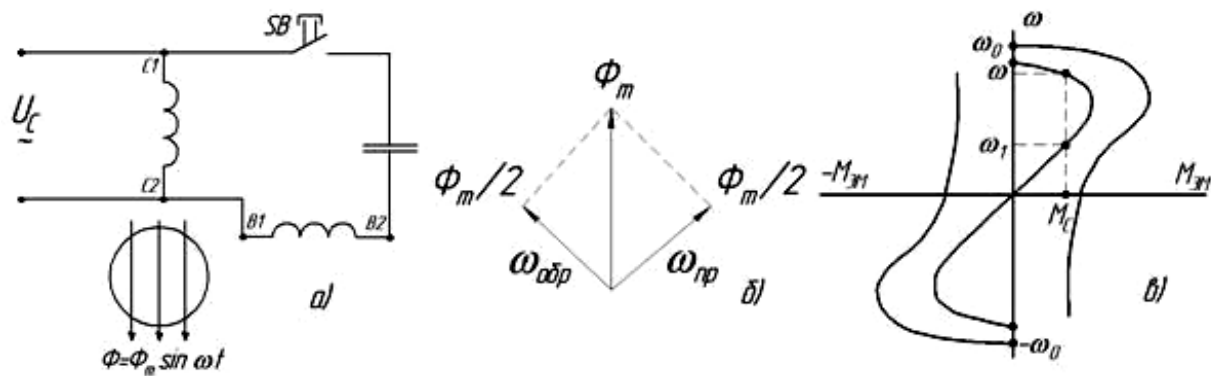


Рис. 9.14. Однофазный асинхронный двигатель:  
 а – схема включения; б – магнитный поток; в – механическая характеристика

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).

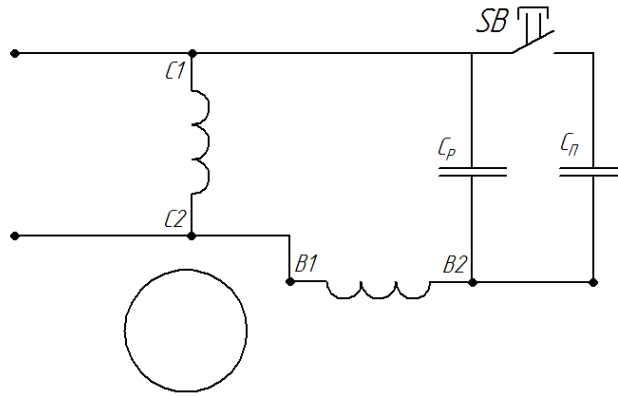


Рис. 9.15. Схема включения двухфазного асинхронного двигателя

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.

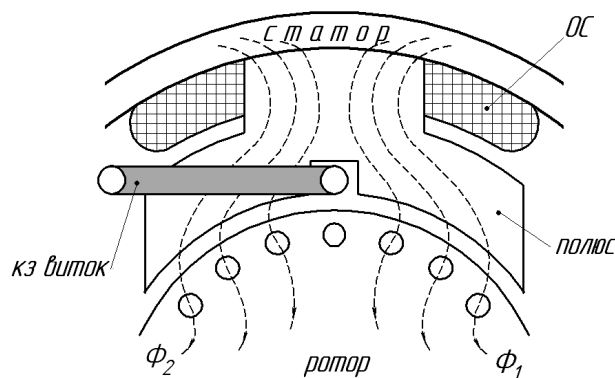


Рис. 9.16. Однофазный асинхронный двигатель с экранированными полюсами

Действительно, два потока  $\Phi_1$  и  $\Phi_2$  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  $\Phi_2$ , создаваемый током рабочей обмотки и током короткозамкнутого витка, и магнитный поток  $\Phi_1$  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.

*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, а).

Одна из обмоток статора с выводами С1 и С2 называется обмоткой возбуждения и включается на напряжение сети. Вторая – обмотка управления с выводами У1 и У2, смещенная в пространстве на  $90^\circ$ , 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.

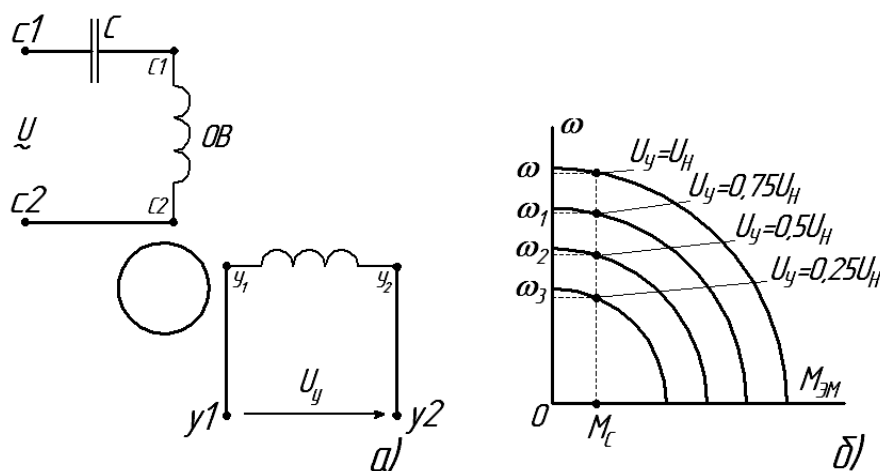


Рис. 9.17. Схема включения асинхронного исполнительного двигателя (а) и его механические характеристики (б)

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).

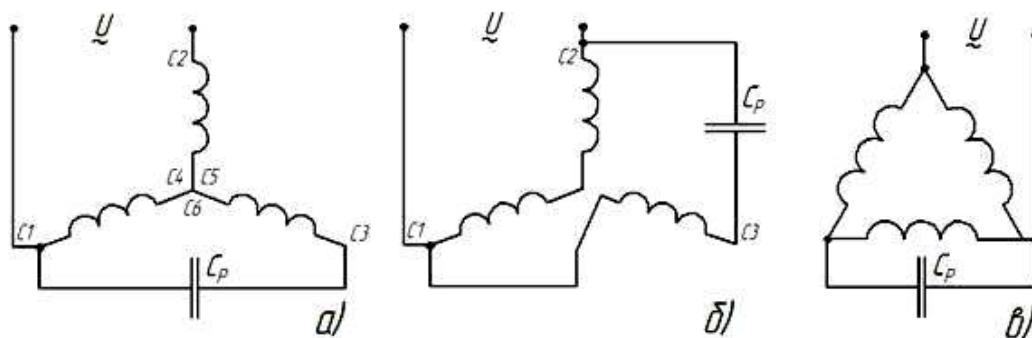


Рис 9.18. Схемы включения трехфазного асинхронного двигателя в однофазную сеть

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 ме-



ханическая 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).

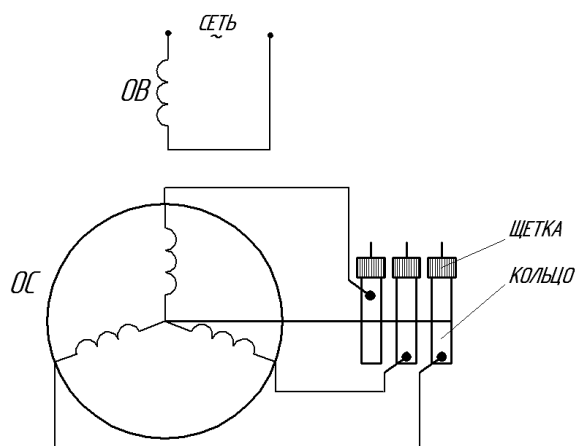


Рис. 9.19. Устройство и условное графическое обозначение сельсина

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 об-

мотки 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).

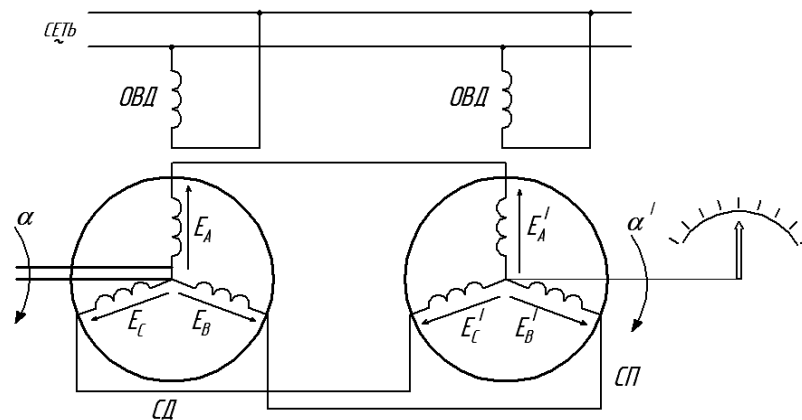


Рис. 9.20. Индикаторная система дистанционной передачи угла

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  $\alpha$ , 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).

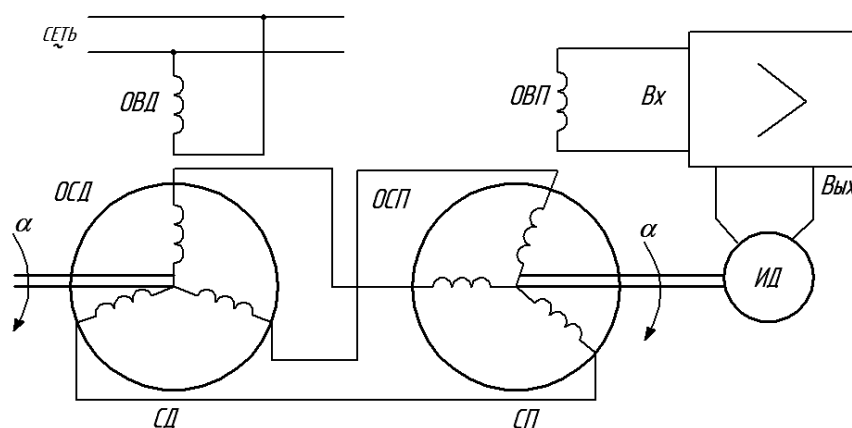


Рис. 9.21. Индикаторная система синхронной передачи угла

*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  $\alpha$ , 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  $\alpha$ .

Вертикальная составляющая этого потока, пронизывая витки ОВП, создает в нем ЭДС, и двигатель начнет обрабатывать заданный сельсином-датчиком угол. Когда ведомый вал повернется на угол  $\alpha$ , 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).

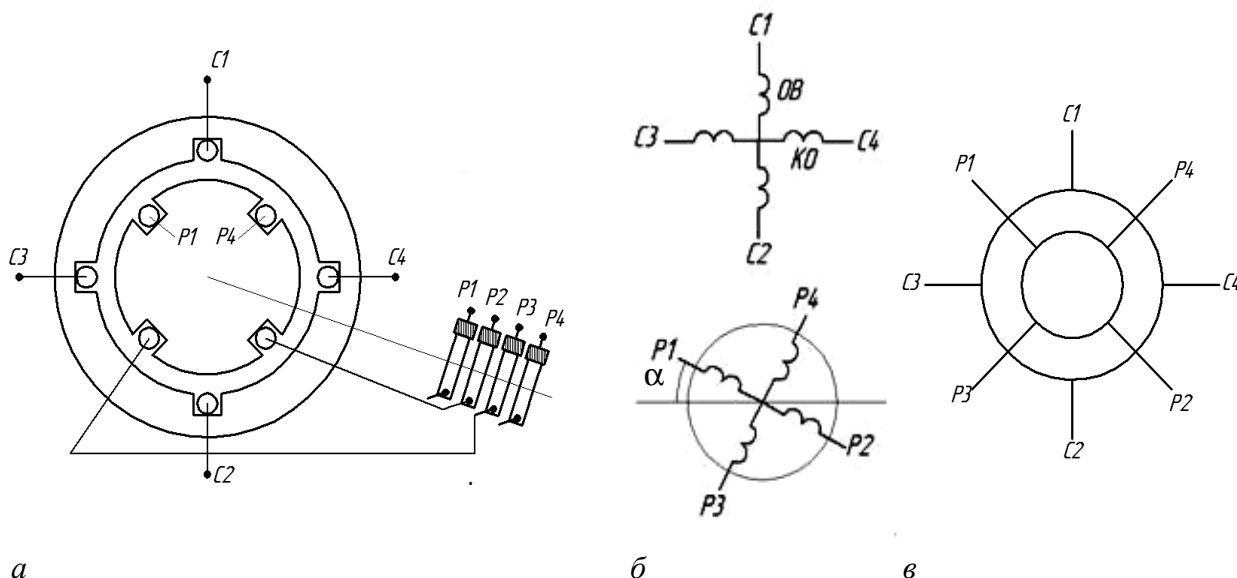


Рис. 9.22. Поворотный трансформатор:  
 а – устройство; б – маркировка обмоток статора и ротора;  
 в – условное графическое обозначение

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 ОВ) включается в сеть переменного тока, другая (компенсационная обмотка ОК) 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  $\alpha$ .

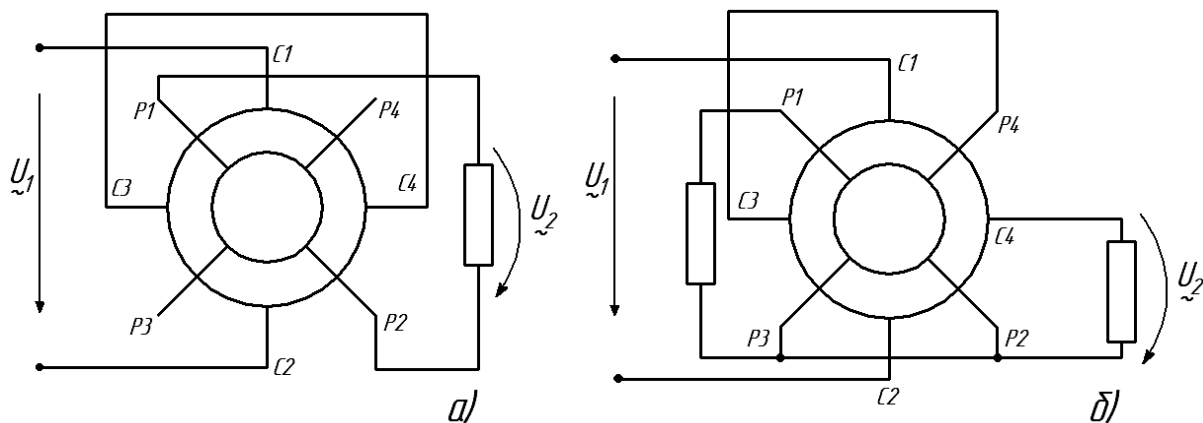


Рис. 9.23. Схемы включения поворотного трансформатора:  
а – синусно-косинусного; б – линейного

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).

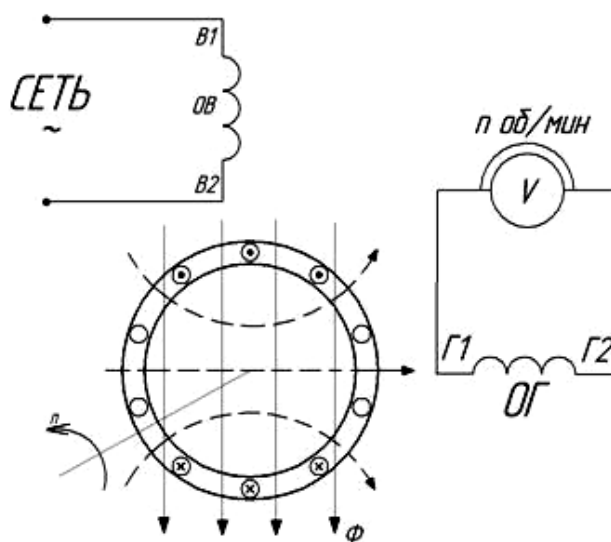


Рис. 9.24. Асинхронный тахогенератор

*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.

На рисунке показано направление ЭДС при вращении ротора против часовой стрелки в момент времени, когда поток направлен вниз.

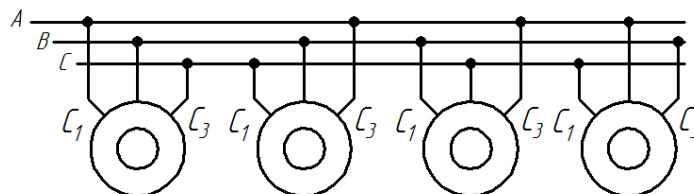
Под действием переменной ЭДС вращения в проводниках обмотки ротора возникает ток, совпадающий по направлению с ЭДС и создающий свой магнитный поток, который будет перпендикулярен к основному магнитному потоку и совпадать по направлению с осью генераторной обмотки (на рис. 9.24 показан пунктиром). В генераторной 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.

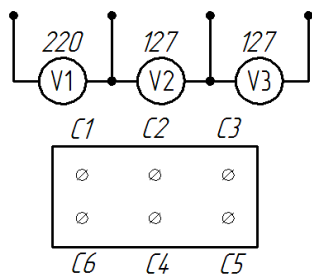
Но если скорость вращения ротора будет меняться, то ЭДС вращения, ток в проводниках ротора и магнитный поток будут также переменными во времени и ЭДС на зажимах ОГ будет тем больше, чем больше будет изменяться скорость вращения вала. Следовательно, при включении ОВ в сеть постоянного тока показание прибора будет пропорционально угловому ускорению и асинхронный тахогенератор можно проградуировать, например, в  $\text{рад/с}^2$ .

### 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 (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. Изменятся 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  $Q$  (рис.). Диаметр барабана 20 см;  $P = 0,25$  кВт;  $n_H = 1440$  об/мин; 220/380 В; КПД = 0,68;  $\cos\varphi = 0,65$ ;  $M_{\max}/M_H = 2,2$ ;  $I_{\text{пуск}}/I_H = 5$ .

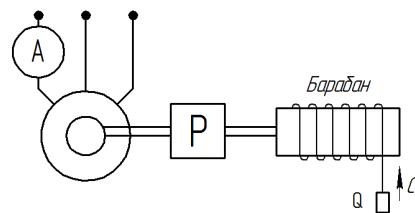


Определить:

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?



**16.** В чем сходство и различие однофазных асинхронных электродвигателей с расщепленными полюсами и конденсаторного: а) по принципу действия; б) по конструкции статора и ротора (показать схемы включения)?

**17.** Объяснить назначение и принцип действия индикаторной схемы синхронного вращения двух механически несвязанных валов.

**18.** Объяснить назначение и принцип действия трансформаторной схемы синхронной передачи угла механически несвязанных валов.

**19.** В качестве электрических машин синхронной связи кроме сельсинов могут быть использованы вращающиеся трансформаторы. Как с помощью этих трансформаторов организовать синхронную схему передачи угла, если на ведомом валу существует значительный момент сопротивления?

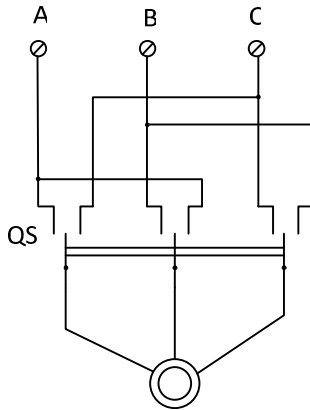
**20.** С помощью поворотных трансформаторов нарисовать индикаторную схему синхронной передачи угла и пояснить ее работу.

**21.** В чем сходство и различие индикаторной и трансформаторной схем включения сельсинов: а) по назначению, б) по принципу действия?

**22.** Почему показания измерительного прибора асинхронного тахогенератора зависит от скорости вращения вала? Ответ пояснить рисунком.

**23.** Как можно асинхронный тахогенератор использовать для измерения ускорений вала? Ответ пояснить рисунком.

**24.** Номинальная частота вращения асинхронного двигателя 950 об/мин. Сколько пар полюсов имеет обмотка статора и чему равно номинальное скольжение?



**25.** Можно ли с помощью переключателя QS изменить направление вращения асинхронного электродвигателя?

**26.** При вращении ротор асинхронного двигателя касался статора. Чтобы исключить нежелательное трение, решено было несколько сточить ротор, уменьшив его диаметр. Как повлияет такой ремонт на паспортные данные двигателя  $P_n$ ,  $\cos \gamma_n$ ,  $\eta_n$  и ток холостого хода  $I_0$ ?

**Подсказка:**

Номинальная мощность  $P_n = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$ . Чтобы двигатель не перегревался, номинальный ток должен оставаться прежним. Но как при этом изменится  $\cos \varphi_n$ ? Анализ рекомендуется провести с помощью векторной диаграммы тока и напряжения одной фазы. Может ли сложиться такая ситуация, когда даже при холостом ходе двигатель будет перегреваться?

**28.** Сможет ли асинхронный электродвигатель, включенный в сеть с линейным напряжением 220 В, через редуктор поднимать груз весом 17 кг со скоростью 1 м/с?

Номинальные данные электродвигателя: 150 Вт; 220/380 В; 1400 об/мин;  $M_{\text{пуск}}/M_n = 1,2$ ;  $M_{\text{макс}}/M_n = 2$ .

Какой груз может поднять этот двигатель с той же скоростью, если поменять схему включения обмоток статора?

**29.** Определить частоту вращения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором, если он с помощью редуктора поднимает груз весом  $Q = 100$  кГ со скоростью 1 м/с.

Паспортные данные двигателя:  $P_n = 1,5$  кВт,  $n_n = 2850$  об/мин,  $K_m = M_{\text{макс}} / M_n = 2$ , КПД редуктора  $\eta_{\text{ред}} = 0,9$ .

План решения:

По заданным величинам можно определить мощность на валу двигателя, номинальное и критическое скольжение при заданной нагрузке и частоту вращения двигателя.

Решение:

1. Мощность на валу двигателя

$$P = Q P = Qv / \eta_{ред} = 100 \cdot 9,8 \cdot 1 / 0,9 = 1089 \text{ Вт.}$$

2. Номинальная частота вращения ротора

$$\omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = \frac{3,14 \cdot 2850}{30} = 298 \text{ рад/с.}$$

3. Частота вращения магнитного поля

$$\omega_0 = \pi n_0 / 30 = 3,14 \cdot 3000 / 30 = 314 \text{ рад/с.}$$

4. Номинальное скольжение

$$S_n = (n_0 - n) / n_0 = (3000 - 2850) / 3000 = 0,05.$$

5. Критическое скольжение

$$S_{кр} = S_n (K_m + \sqrt{K_m^2 - 1}) = 0,05(2 + \sqrt{2^2 - 1}) = 0,1866.$$

6. По формуле Клосса определяем реальное скольжение при заданной нагрузке:

$$M = 2M_{макс} / (S_{кр} / S + S / S_{кр})$$

или

$$\frac{P}{\omega_0(1-S)} = \frac{2 \cdot K_m P_n}{\omega_n} / (S_{кр} / S + S / S_{кр}).$$

Подставляя данные и найденные величины, получим:

$$\frac{1089}{314(1-S)} = \frac{2 \cdot 2 \cdot 1500}{298} / (0,1866 / S + S / 0,1866).$$

Решая квадратное уравнение, получим  $S = 0,0344$ .

Частота вращения двигателя:

$$n = n_0(1-S) = 3000(1-0,0344) = 2897 \text{ об/мин.}$$

Ответ: 2897 об/мин.

## 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).

Ротор представляет собой электромагнит, обмотка возбуждения которого питается постоянным током от независимого источника. Он может иметь явно выраженные полюса (рис. 10.1, *а*) или быть неявнополюсным (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 об/мин.

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 контакторные кольца, закрепленные на втулке изолятора и вращающиеся вместе с ротором (рис. 10.1, *в*).

Условное графическое обозначение СМ показано на рис. 10.1, *г*.

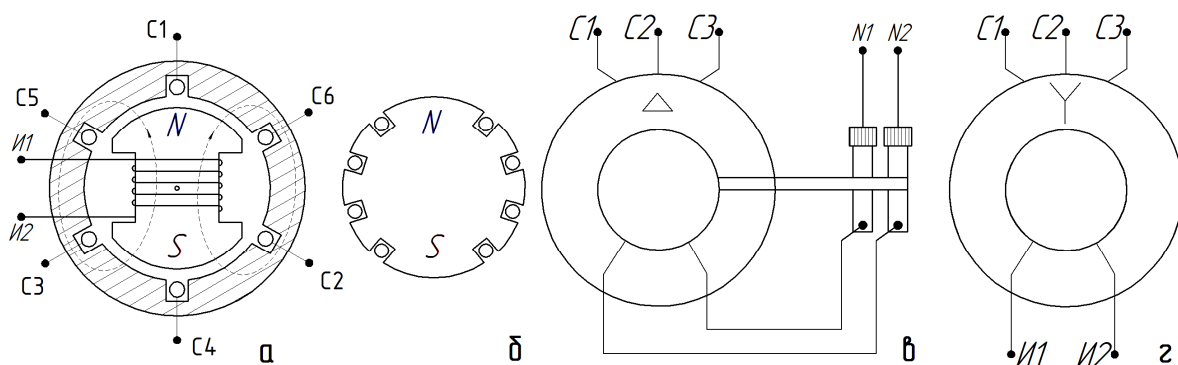


Рис. 10.1. Синхронная машина:

*а* – основные конструктивные элементы и обмотки; *б* – неявнополюсный ротор; *в* – схема подключения обмотки возбуждения; *г* – условное графическое обозначение

## 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 т.к. обмотки статора смещены в пространстве на  $120^\circ$ , 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 (рис. 10.2, б).

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.

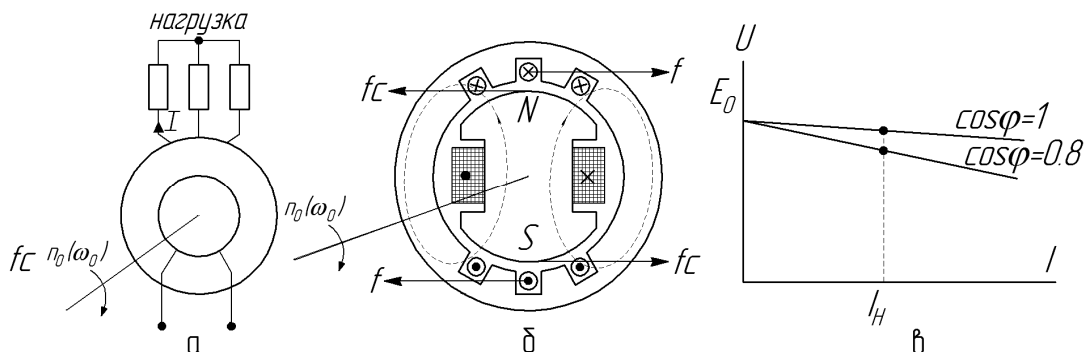


Рис. 10.2. Режим генератора синхронной машины:  
 а – схема включения; б – направление тока и электромагнитных сил;  
 в – внешняя характеристика

Внешняя характеристика синхронного генератора (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  $\omega_0$ .

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 (рис. 10.3, а). В этом случае электромагнитный момент, действующий на ротор, будет отсутствовать, т.к. плечо между этими силами равно нулю.

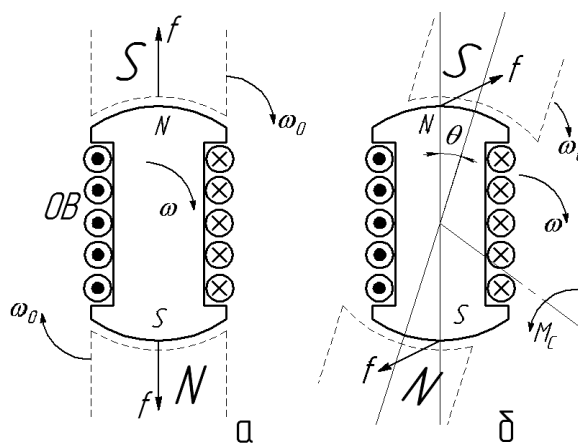


Рис. 10.3. Режим двигателя СМ:  
а – холостой ход; б – под нагрузкой

Под нагрузкой в результате действия тормозного момента сопротивления  $M_c$  ротор приотстанет от поля статора на угол  $\theta$  (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  $\theta$ , тем больший создается вращающий момент. Можно показать, что электромагнитный вращающий момент пропорционален синусу угла  $\theta$  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.

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 – приемник, 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  $90^\circ$ . Падение напряжения на реактивном сопротивлении  $\Delta U_x$  должно опережать ток на  $90^\circ$ , т.е. должно быть направлено вдоль вектора  $\bar{U}$ . Но поскольку 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  $\bar{E}_0 = \Delta \bar{U}_x + \bar{U}$  (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  $90^\circ$ , а между напряжением сети и током угол  $\varphi_c$  – тупой. Это означает, что сеть является не источником, а приемником электроэнергии (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  $\theta$ , при котором вращающий момент первичного двигателя уравновесит тормозной момент, создаваемый током нагрузки.

В режиме двигателя СМ является приемником электроэнергии и угол  $\varphi_c$  между напряжением сети и током должен быть острым (рис. 10.4, з). 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  $\Delta U_{x0}$ , а т.к. ток должен отставать от напряжения  $\Delta U_x$  на  $90^\circ$ , 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.

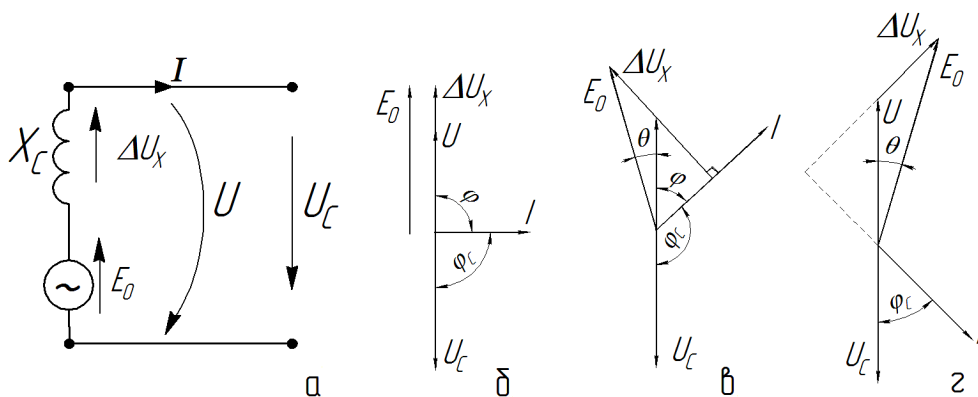


Рис. 10.4. Работа СМ параллельно с сетью:  
 а – схема; б – режим холостого хода; в – режим генератора; з – режим двигателя



## 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  $\omega_0$ .

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.

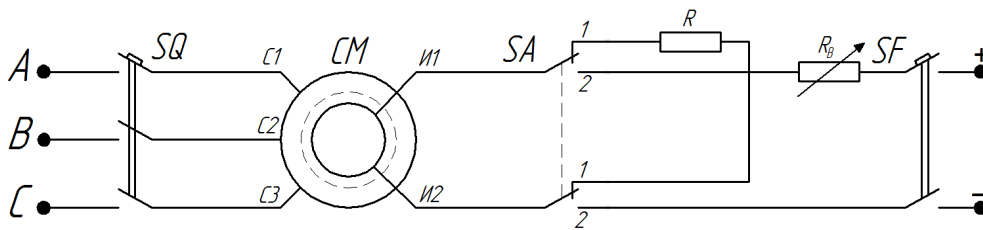


Рис. 10.5. Асинхронный пуск синхронного двигателя

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. Дополни-

тельный 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 ( $\cos \varphi$  и  $\eta$ ). 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.

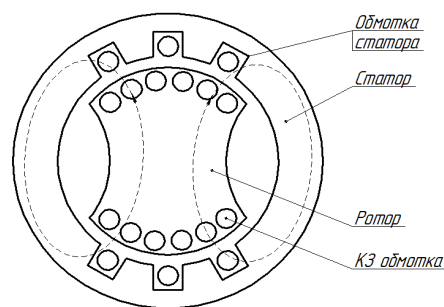


Рис. 10.6. Синхронный реактивный двигатель

### 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.

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  $\alpha$ , 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 ( $I_{п} / I_{н} = 1,3 \dots 1,4$ ). К недостаткам СГД следует отнести низкий  $\cos \varphi$  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.

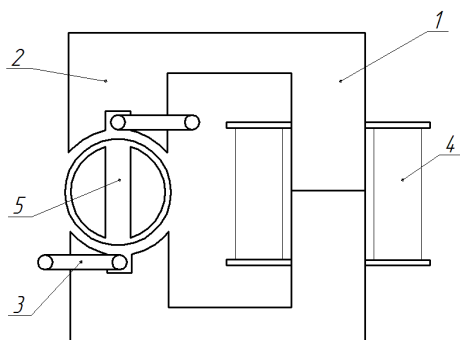


Рис. 10.7. Синхронный реактивно-гистерезисный двигатель:  
1 – статор; 2 – полюс; 3 – короткозамкнутый виток; 4 – обмотка статора; 5 – ротор

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 явно полюсному 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  $\cos \varphi$ ). 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).

### 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  $\alpha_1$  и будет проходить через второй выступ, ближайший к нему зубец 2 ротора установится соосно со вторым зубцом статора, т.е. повернется по часовой стрелке на угол  $\alpha_1 - \alpha_2$ . Скорость вращения поля  $\omega_0$  и скорость вращения ротора  $\omega$  будут пропорциональны их угловому перемещению, соответственно  $\alpha_1$  и  $\alpha_1 - \alpha_2$ .

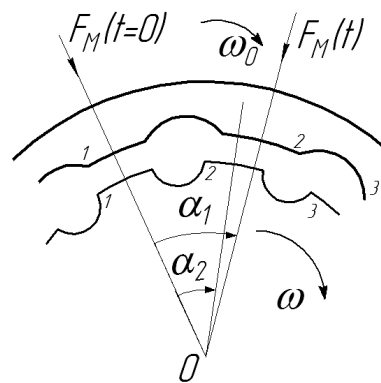


Рис. 10.8. Схема устройства синхронного двигателя с электромагнитной редукцией скорости

$$\frac{\omega_0}{\omega} = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_2} = \frac{\frac{360}{z_1}}{\frac{360}{z_1} - \frac{360}{z_2}}$$

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  $\alpha_1$  и радиус ротора  $O'_2A_2$  повернулся на угол  $\alpha_2$ .

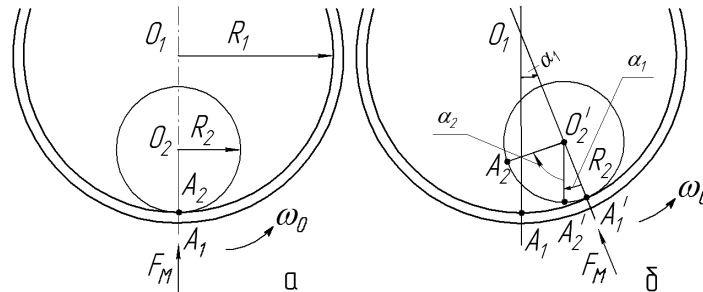


Рис. 10.9. Расположение ротора и статора ДКР:  
 а – в момент времени  $t = 0$ ; б – в момент времени  $t$

Очевидно, отношение скоростей ротора и поля статора пропорционально отношению углов  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$ , на которые они повернулись за одно и то же время  $t$ :

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{\angle A_2O'_2A'_1 - \angle A'_2O'_2A'_1}{\angle A_1O_1A'_1} = \frac{\overset{\cup}{A_2A'_1} / R_2 - \alpha_1}{\overset{\cup}{A_1A'_1} / R_1}.$$

Заменим в числителе  $\alpha_1$  на отношение дуги к радиусу  $\overset{\cup}{A_1A'_1} / R_1$ . Если ротор перекачивается без скольжения, то  $\overset{\cup}{A_2A'_1} = \overset{\cup}{A_1A'_1}$  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).

При вращении поля статора со скоростью  $\omega_0$  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 ро-

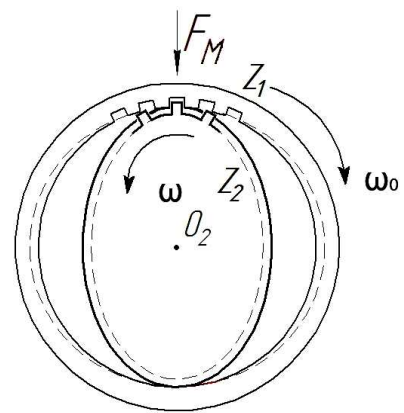


Рис. 10.10. Волновой двигатель

тор 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.

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  $60^\circ$ .

Таким образом, если подавать поочередно импульсы тока на фазные

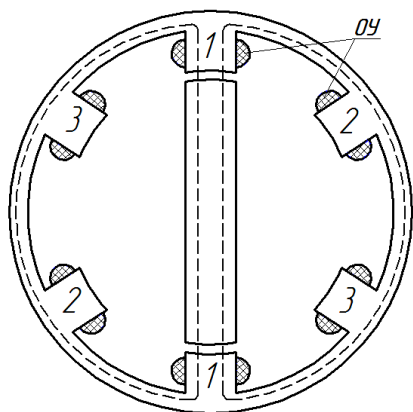


Рис. 10.11. Шаговый двигатель с явно полюсным ротором

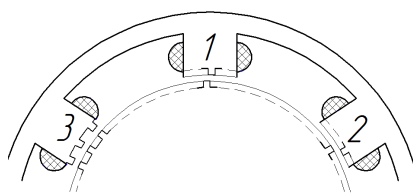


Рис. 10.12. ШД с зубцовым рядом

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.

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 порядка 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



Таким образом, каждый импульс поворачивает ротор на угол  $\alpha = \frac{360}{3z}$ , 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  $3^\circ$ .

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.

### Контрольные вопросы и задачи

1. Какие вращающие моменты возникают в реактивно-гистерезисном двигателе во время и после его разгона до установившейся скорости? Объяснить с помощью рисунка конструкции ротора.

2. В чем сходство и различие поворотного трансформатора и обычного традиционного: а) по назначению, б) конструктивно? Ответ пояснить рисунком.

3. В чем сходство и различие синхронного тахогенератора и тахогенератора постоянного тока? Ответ пояснить рисунком.

4. Объяснить назначение, устройство и принцип действия двигателя с катящимся ротором. Его преимущества и недостатки.

5. В чем сходство принципа действия волнового двигателя и двигателя с катящимся ротором. Их конструктивные особенности.

6. В чем сходство и различие трехфазного синхронного двигателя и синхронного реактивного двигателя и синхронного реактивного двигателя с редукцией скорости: а) по схеме включения обмоток статора, б) по конструкции статора и ротора? Пояснить с помощью рисунков.

7. Синхронный реактивный двигатель с явно полюсным ротором имеет 4 пары полюсов на статоре, на обмотки которых поочередно пода-

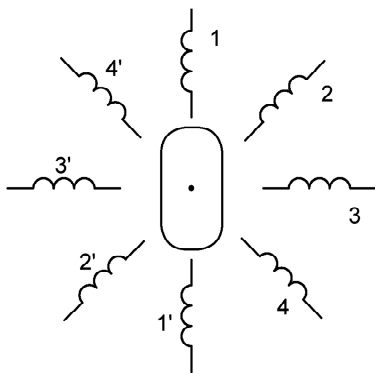
ются импульсы тока. Сколько импульсов необходимо подать, чтобы ротор повернулся на два оборота. Сделать рисунок.

**8.** Синхронный реактивный шаговый двигатель имеет 4 пары полюсов на статоре.

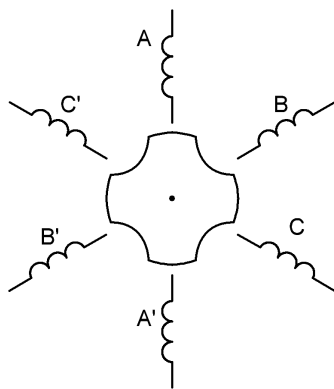
Сколько оборотов совершит явно полюсный ротор, если подать 80 импульсов тока поочередно на каждую пару обмоток статора в последовательности: 1-2-3-4-1-2...?

**9.** Синхронный реактивный двигатель с электромагнитной редуцией скорости имеет 15 пар явно выраженных полюсов на роторе и 36 зубцов на внутренней поверхности статора.

На какой угол, и в каком направлении повернется ротор, если магнитное поле статора повернется по часовой стрелке на угол  $10^\circ$ ? Ответ пояснить рисунком.

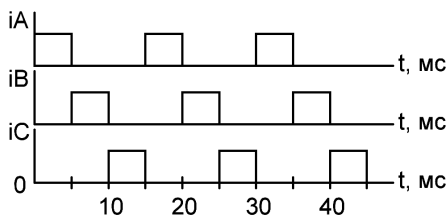


**10.** Синхронный реактивный шаговый двигатель с явнополюсным ротором имеет 4 пары полюсов на статоре, на обмотки которых поочередно подаются импульсы тока. На какой угол повернется ротор, если подать 20 импульсов? Сделать рисунок.



**11.** Синхронный шаговый двигатель имеет 3 пары полюсов на статоре и 2 пары полюсов на роторе.

С какой частотой (об/мин) и в каком направлении будет вращаться шаговый двигатель, если на его обмотки подавать импульсы тока в соответствии с временной диаграммой?



# МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО ЭЛЕКТРОТЕХНИКЕ

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

### 1. Введение

Лабораторные работы способствуют закреплению на практике теоретических сведений, полученных на лекциях, позволяют экспериментально подтвердить и обосновать лекционный материал, показать их практическую значимость.

В процессе выполнения работ студенты приобретают определенные практические навыки и учатся разрешать некоторые вопросы исследовательского характера.

Чтобы успешно выполнить задания, предусмотренные программой каждой лабораторной работы, и сделать обобщающие выводы на основании данных проведенного эксперимента, необходима предварительная подготовка к выполнению каждой лабораторной работы. Только овладев теоретическими знаниями, изучив по учебникам и рекомендованным пособиям соответствующий материал, осмыслив его, уяснив цель и сущность предполагаемого эксперимента, а также познакомившись с принципом действия используемого электрооборудования, можно успешно и эффективно выполнить лабораторную работу.

Перед сборкой схемы следует убедиться, что стенд обесточен и аппарат, подающий напряжение к стенду, находится в положении «отключено».

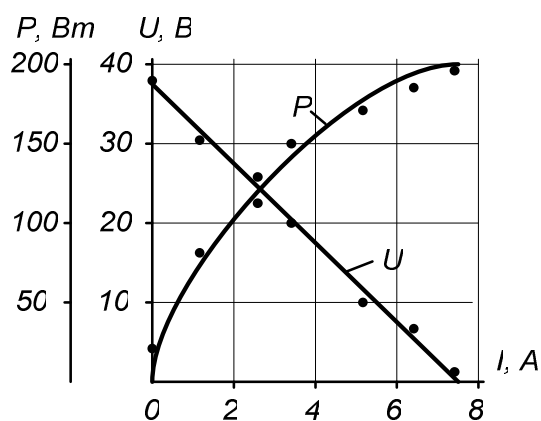
Включение стенда производится только с разрешения преподавателя. Помните, что прикосновение к токоведущим частям схемы **опасно для жизни**.

После завершения лабораторной работы необходимо отключить стенд, а опытные данные показать преподавателю. По разрешению преподавателя разобрать схему и убрать рабочее место.

Если опытные данные не были предоставлены, то работа считается невыполненной.

### 2. Оформление отчета

Отчет по работе оформляется каждым студентом и должен включать в себя рабочие схемы, рисунки, графики, диаграммы, требуемые расчеты и практические выводы по работе.



Графический материал должен быть выполнен с помощью чертежных инструментов. При построении графиков выбирается масштаб, и равномерно по всей длине оси наносится масштабная сетка. На миллиметровой бумаге эта сетка уже нанесена. Необходимо, чтобы первая масштабная клетка соответствовала цифрам 1, 2 или  $5 \cdot 10^n$ , где  $n$  – целое положительное

или отрицательное число.

Экспериментальные точки на графике обозначают различными знаками: жирной точкой, крестиком, квадратиком или другими знаками.

Для нанесения экспериментальной точки пунктирные линии не строят и никаких дополнительных надписей на осях координат не делают. В конце оси координат обозначают единицы измерения. График не должен выходить за пределы масштабной сетки. По точкам строят плавную линию, оставляя количество точек над и под кривыми приблизительно равными. Если известна теоретическая кривая (прямая линия, парабола, экспонента), то ее и показывают на графике. Если в одних осях строят несколько параметров, то для этих величин также указывается масштаб на одной и той же масштабной сетке, а экспериментальные точки обозначают различными знаками.

Для векторных диаграмм масштабную сетку не чертят но указывают масштаб, например, 0,2 А/мм или 5 Вт/мм.

В отчете должны быть представлены все необходимые расчеты с пояснением, но если расчеты повторяются, то в отчете должен быть представлен пример расчета для одного характерного независимого параметра, а данные аналогичных расчетов сводят в таблицу.

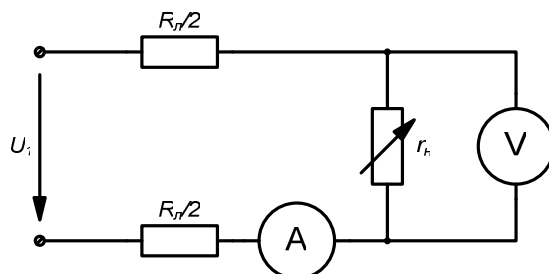
### 3. Как собрать электрическую схему

В качестве примера составим схему питания нагрузки (ламп накаливания) от источника через двухпроводную линию. При этом для измерения тока и напряжения нагрузки включены соответственно амперметр и вольтметр (лабораторная работа № 1). Принципиальная схема изображена на рис. 1, а.

Ознакомившись с конкретным электрооборудованием, необходимым для выполнения работы, и лицевой панелью стенда, конкретизируем прин-

ципиальную схему. В качестве нагрузки будем использовать 9 ламп накаливания (три группы по три лампы в каждой группе), рассчитанных на 40 Вт и 36 В. Следовательно, каждая лампа, если она будет включена на номинальное напряжение, будет потреблять ток  $I_1 = P_1 / U = 40 / 36 = 1,11$  А.

*а*



*б*

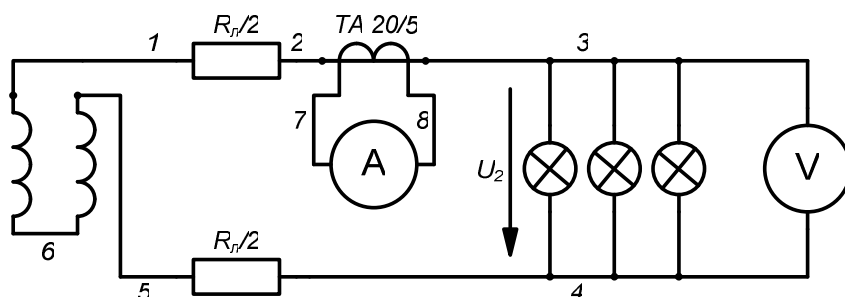


Рис. 1. Передача энергии от источника к потребителю:  
*а* – принципиальная схема; *б* – принципиальная реальная схема

Для расширения пределов измерения амперметра, рассчитанного на ток 1 А, необходимо использовать трансформатор тока, который позволяет уменьшить ток в 4 раза (ТА 20/5) или в 10 раз (ТА 50/5). Таким образом, предельное отклонение стрелки одноамперного прибора будет соответствовать току 4 А или 10 А. При изменении нагрузки не допускать зашкаливания амперметра и вовремя переключить пределы измерения первичного тока.

Источником питания является вторичная обмотка трехфазного трансформатора с номинальным напряжением  $U_\phi = 21$  В. Чтобы получить требуемое напряжение 36 В, необходимо соединить две обмотки последовательно и встречно (соединить концы или начала обмоток). В этом случае напряжение последовательного соединения, как будет показано в гл. 4 «Трехфазные цепи», увеличится в  $\sqrt{3}$  раз:

$$U_1 = \sqrt{3}U_\phi = \sqrt{3} \cdot 21 = 36 \text{ В}.$$

Таким образом, принципиальная схема примет вид (рис. 1, *б*).

#### 4. Составление схемы соединений

Для составления схемы соединений нумеруют участки на принципиальной схеме. В пределах каждого участка не должно быть никаких электрических элементов, кроме соединительных проводов. В данной схеме таких участков 8.

Для выполнения лабораторных работ достаточно нарисовать полумонтажную схему, на которой электрические элементы располагают так же, как и на принципиальной схеме, но обязательно показывают клеммы оборудования. (На стенде используются вместо клеммы два электрически соединенные гнезда.) Клеммы (гнезда) показаны жирными точками (рис. 2).

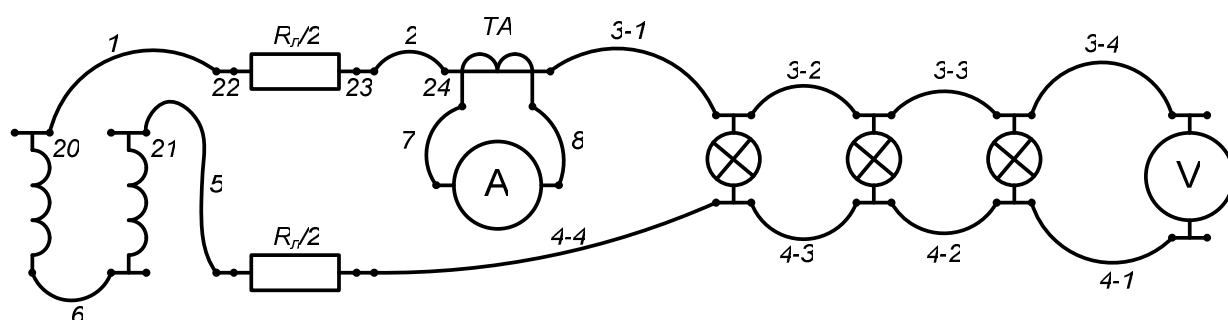


Рис. 2. Полумонтажная схема

Например, чтобы соединить все 5 клемм электрических элементов третьего участка, необходимо 4 провода, которые также нумеруются, например, 3-2 – второй провод третьего участка. Не рекомендуется к одной клемме подключать более двух проводов. С помощью полумонтажной схемы легко собрать схемы для выполнения лабораторной работы.

#### 5. Как определить обрыв в цепи

Для определения места разрыва цепи вначале включают вольтметр к клеммам источника питания и убеждаются в наличии напряжения. Затем отсоединяют одну из клемм вольтметра и последовательным подключением отсоединенного провода к различным клеммам по пути прохождения тока определяют место обрыва. Например, если вольтметр показал напряжение между клеммами 21-20, 21-22, 21-23, а между клеммами 21-24 показал ноль, то очевидно, оборван провод 2 или нет контакта между присоединенным проводом и клеммой 24.

#### 6. Описание стенда

Универсальный стенд позволяет провести 12 лабораторных работ по различным разделам электротехники.

Он включает в себя следующее электрооборудование.

1) автоматический воздушный выключатель (трехфазный) подает питание на первичную обмотку трансформатора и к клеммам пакетного выключателя;

2) трехфазный трансформатор основной, рассчитанный на номинальное напряжение первичной обмотки 220/380 В и вторичной 21/36В, используется для питания схем большинства лабораторных работ;

3) трехфазный трансформатор вспомогательный, рассчитанный на напряжение первичной обмотки 220/380 В, вторичной 40/70 В, которые соединены звездой. Служит для включения асинхронного короткозамкнутого двигателя с номинальным напряжением 220/380 В;

4) пакетный переключатель включает первичную обмотку вспомогательного трехфазного трансформатора напряжением 220/380 В, которая на лицевой панели стенда не показана. Фазное напряжение вторичной обмотки – 10 В и 40 В;

5) предохранители включены во вторичную цепь основного трансформатора с номинальным фазным напряжением 21 В;

б) сигнальные лампочки контролируют целостность цепи вторичных обмоток основного трансформатора;

7) миллиамперметр рассчитан на ток 100 мА, а при нажатой над ней кнопкой – 10 мА;

8) амперметр рассчитан на ток 1 А;

9) вольтметр с предельным отклонением стрелки 50 и 150 В. Все приборы включаются через диодные мосты и могут работать в цепи постоянного и переменного тока;

10) два контактора, реле тока, тепловое реле и реле времени расположены на правой стороне лицевой панели. Все клеммы элементов этих аппаратов (обмотки и контакты) выведены на лицевую панель и подсоединены к гнездам, иногда спаренным;

11) четырехпроводная линия передач, сопротивление каждой линии которой имитируется расположенными внутри стенда четырьмя резисторами;

12) три кнопки с самовозвратом используются для включения и выключения различных схем;

13) асинхронный двигатель с редуктором. Он расположен сверху стенда а обмотки статора через разъем выведены на лицевую панель и присоединении к спаренным гнездам;

14) машина постоянного тока типа СЛ 369 также расположена сверху стенда. Обмотки якоря и возбуждения выведены через разъем на лицевую панель стенда;

15) девять ламп накаливания (три группы по 3 лампы в каждой группе мощностью 40 Вт, напряжением 36 В). Служат в качестве нагрузки для большинства лабораторных работ;

16) батарея конденсаторов используется в работе для повышения коэффициента мощности асинхронного электродвигателя и его включения в однофазную цепь;

17) три сигнальные лампочки (в нижней части стенда) служат нагрузкой для модели асинхронного двигателя;

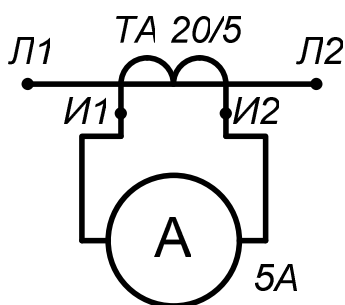
18) трансформатор тока необходим для расширения пределов измерения амперметра от одного до десяти ампер;

19) шесть диодов используются для выпрямления переменного тока. Составляя различные схемы однофазного и трехфазного выпрямления можно получить источник постоянного тока на любое напряжение до 70 В и более.

## 7. Как расширить пределы измерения амперметра

Если в цепях постоянного тока для расширения предела измерения амперметра применяют шунты, то в цепях переменного тока используют трансформаторы тока, поскольку шунты создают большую погрешность при измерении.

Трансформатор тока состоит из двух обмоток, которые охватывают железный сердечник. Первичная обмотка с небольшим числом витков (иногда одним) включается последовательно в силовую часть цепи клеммы Л1-Л2, а вторичная обмотка с большим числом витков – к амперметру. Условное графическое и буквенное обозначение трансформатора тока показано на рисунке.



Например, трансформатором тока ТА20/5 можно измерять токи до 20 А амперметром, рассчитанным на 5 А. Коэффициент

трансформации трансформатора тока  $K_A = 20/5 = 4$ :

$$K_A = I_{1H} / I_{2H} = 20 / 5 = 4 .$$

Этот трансформатор снижает измеряемый ток в 4 раза.

Если, например, амперметр показал 1,5 А, то реальный ток в первичной цепи  $I_1 = K_A \cdot I_2 = 4 \cdot 1,5 = 6$  А.

Вторичная обмотка трансформатора тока, как правило, рассчитана на 5А, А ток первичной обмотки выбирают в зависимости от требуемого коэффициента трансформации. Если необходимо измерять токи до 8 А с по-



мощью амперметра, рассчитанного на 1 А, то необходим трансформатор тока с коэффициентом трансформации не менее 8. Тогда первичная обмотка должна быть рассчитана на ток не менее чем на  $5 \cdot 8 = 40$  А (можно 50 А).

Можно, конечно, выбрать трансформатор тока на значительно больший ток, например, 200/5, но тогда показание амперметра будет небольшим, а относительная погрешность измерения будет высокой.

## Лабораторная работа № 1

### ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ: ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ – ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧИ – НАГРУЗКА

**Цель работы:** исследовать режимы работы различных электротехнических устройств: генератора (источника электроэнергии), нагрузки (т.е. потребителя, приемника) и линии электропередачи при передаче энергии от источника к потребителю.

#### Основные теоретические положения

Исследование электрической цепи источник-нагрузка является одним из основных вопросов практической электротехники и проводится для различных целей: определение изменения напряжения на зажимах приемника, тока короткого замыкания и выбор защитной аппаратуры, расчет сечения проводов линии электропередачи, определение мощности потерь и др.

Рассмотрим простую электрическую цепь, состоящую из источника энергии (генератора), имеющего ЭДС  $E$  и пренебрежительно малое внутреннее сопротивление, линии электропередачи с сопротивлением  $r_L$  и нагрузки, сопротивление которой изменяется от  $r_H$  до  $r_H = 0$  (короткое замыкание).

На рис. 1, а, б показана схема электрической цепи. Ток в цепи  $I = E / (r_H + r_L)$  определяется по 2-му закону Кирхгофа и изменяется в пределах от тока холостого хода  $I_{xx} = 0 (r_H \rightarrow \infty)$  до тока короткого замыкания  $I_{KЗ} = E / r_L (r_H = 0)$ .

Падение напряжения в линии передачи  $\Delta U_L = E - U_2 = r_L I$  растет пропорционально нагрузке. При этом в падение напряжения в линии будет включено и падение напряжения внутри источника, а в сопротивление линии – внутреннее сопротивление источника питания. Мощность, отдаваемая генератором  $P_1 = EI$ , также изменяется по линейному закону. Мощ-

ность, потребляемую приемником, можно определить по формуле  $P_2 = U_2 I$ , а потери мощности в линии  $\Delta P_{\text{л}} = r_{\text{л}} I^2 = \Delta U_{\text{л}} I$  зависят от квадрата тока и изменяются по параболическому закону.

Коэффициент полезного действия линии передач (с учетом потерь в генераторе)  $\eta = P_2 / P_1 = U_2 I / EI = U_2 / E$  повторяет график напряжения на нагрузке. Пользуясь законом Ома, можно определить внутреннее сопротивление линии электропередачи  $r_{\text{л}}$ :

$$r_{\text{л}} = \Delta U_{\text{л}} / I.$$

На рис 1, в показан характер изменения указанных величин в зависимости от тока нагрузки. Номинальный ток реальных приемников не превышает 5 – 10 % от тока короткого замыкания.

## 1. Рабочее задание

1.1. Составить принципиальную и схему соединений для передачи электроэнергии от генератора через двухпроводную линию на нагрузку, состоящую из девяти ламп накаливания, которые следует включить параллельно. Для измерения тока нагрузки и генератора, а также напряжения на нагрузке включить соответственно амперметр и вольтметр. Амперметр включить через трансформатор тока. Собрать схему и показать для проверки преподавателю.

1.2. Последовательным включением ламп накаливания изменять нагрузку от холостого хода (все лампы отключены) до максимальной (включены 9 ламп) и снять показания приборов. Экспериментальные данные внести в таблицу.

№	Измерено		Вычислено						
	$I$	$U_2$	$\Delta U$	$\Delta P$	$P_1$	$P_2$	$\eta$	$r_{\text{л}}$	$r_{\text{г}}$
	А	В	В	Вт	Вт	Вт	–	Ом	Ом

## 2. Обработка результатов измерения

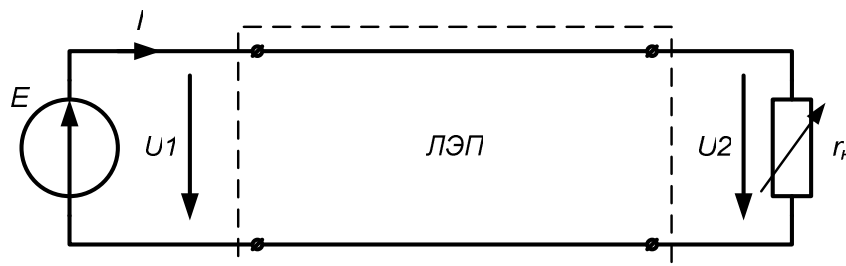
2.1. Определить ЭДС источника и для каждого опыта вычислить падение напряжения в линии, мощность, отдаваемую генератором, мощность, потребляемую приемником, потери мощности в линии и КПД линии электропередачи.

2.2. Построить в одних осях графики  $U_2, \Delta U, P_1, P_2, \Delta P_1, \eta = f(I)$  в масштабе  $m_U = 0,5$  В/мм,  $m_I = 0,1$  А/мм,  $m_P = 4$  Вт/мм,  $m_{\eta} = 1$  % / мм.

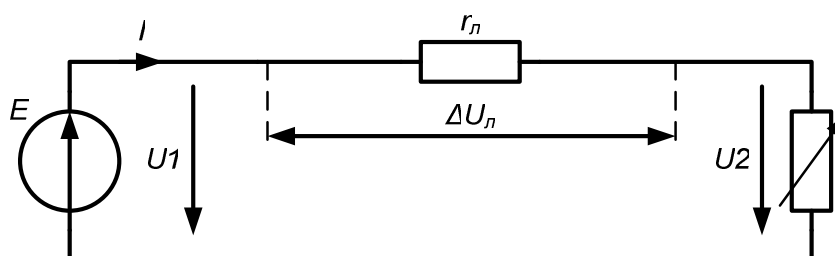
2.3. Вычислить сопротивления  $r_{\text{л}}$  и  $r_{\text{г}}$ .

**Примечание:** в отчете должен быть дан пример вычисления всех величин для какого-либо одного характерного значения тока нагрузки (исключая режим холостого хода и короткого замыкания). Все буквенные обозначения должны иметь словесное пояснение. Например, мощность, отдаваемая источником,  $P_1 = EI = 38 * 1,8 = 68,4$  Вт.

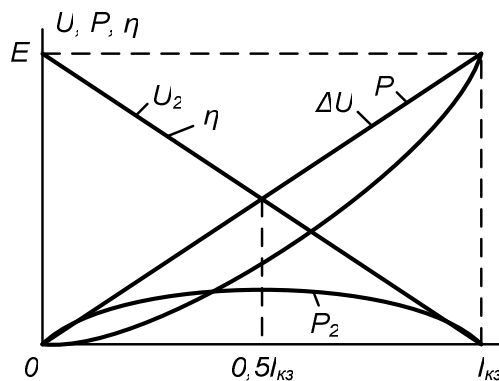
а



б



в



### Литература

Авдейко, В.П. Электростатика, электрические машины и аппараты: учеб.-метод. комплекс / В.П. Авдейко. – Новополюк: ПГУ, 2009. – С. 26 – 29.

### 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  $A$ , току  $I_B$  в режиме  $B$  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 ( $R = 0$ );  $\Delta P$  – потери мощности внутри источника;  $P_1$  – мощность источника;  $P_2$  – мощность нагрузки;  $\eta$  – кпд источника. Определить режим работы источника, если его номинальное напряжение  $U_H = 0,9U_A$ . Показать на внешней характеристике в выбранном масштабе точку номинального режима и рабочую точку (при токе нагрузки 1 А).

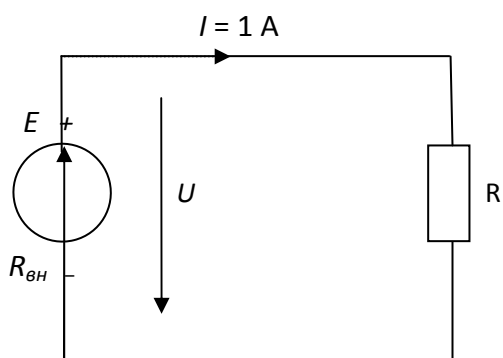


Рис. 1. Цепь питания нагрузки

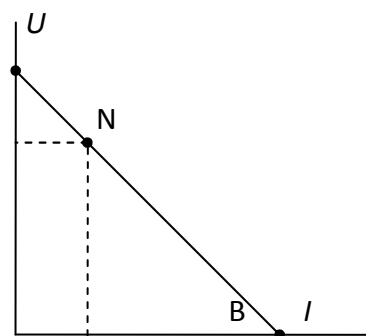


Рис. 2. Внешняя характеристика

Таблица 1

Расчетная таблица

$E$	$I_{КЗ}$	$U$	$R_{вн}$	$R$	$P_1$	$P_2$	$\Delta P$	$\eta$	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

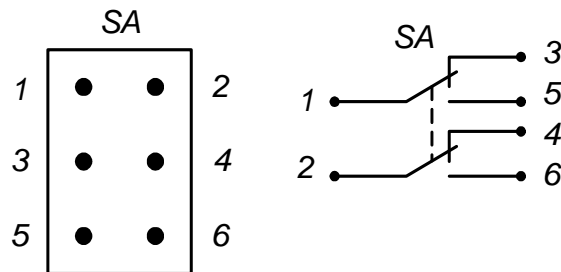
#### 1. Порядок проведения работы

1.1. Определить электрическую схему коммутационных аппаратов: тумблера, кнопки, путевого и пакетного переключателя.

Для этого при двух положениях аппарата (выключено и включено) «прозвонить» попарно все клеммы или выводы этих аппаратов, предварительно пронумеровав эти выводы (если они не пронумерованы).

В отчете должны быть представлены монтажный рисунок аппаратов, графическое и буквенное обозначение их с цифровым обозначением клемм (выводов).

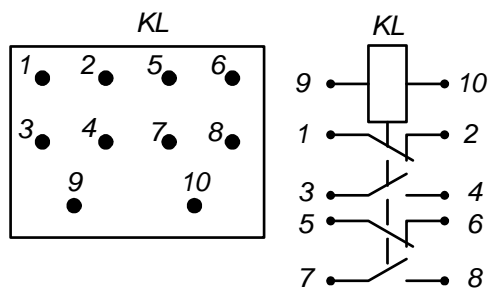
В качестве примера показана конфигурация тумблера с шестью выводами и электрическая схема тумблера SA с двумя переключающими контактами. В исходном положении замкнуты клеммы 1-3 и 2-4, а во включенном состоянии эти клеммы размыкаются, но замыкаются клеммы 1-5 и 2-6.



1.2. Изучить конструкцию аппаратов автоматического управления: промежуточного реле, контактора, реле времени, реле тока и теплового реле. Определить визуально или «прозвонить» попарно клеммы (или выводы) обмоток и всех контактов.

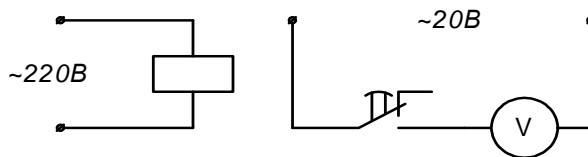
В отчете должны быть представлены монтажный рисунок аппаратов, графическое и буквенное обозначение их с цифровым обозначением выводов обмоток и контактов.

В качестве примера показан монтажный рисунок промежуточного реле КЛ и его графического обозначения. Все выводы аппарата пронумерованы. Реле имеет два размыкающих контакта с выводами 1-2 и 5-6 и два замыкающих контакта с выводами 3-4 и 7-8. Выводы обмотки – 9-10.



1.3. Включить катушки контактора в сеть  $\sim 36$  В и измерить ток, потребляемый этой обмоткой. Определить допустимый ток контактов контактора. Сравнить эти токи.

1.4. Собрать схему для испытания реле времени. Замыкающий контакт реле времени с выдержкой времени на замыкание включить в сеть с напряжением 20 В последовательно с вольтметром. Включить обмотку реле времени и проверить установленное на реле время срабатывания контакта по моменту включения вольтметра. Аналогично проверить время срабатывания других контактов реле времени.



Испытание теплового реле и реле тока проводят при выполнении лабораторной работы «Максимальная токовая защита электрических цепей».

## 2. Обработка результатов испытаний

В отчете представить кроме указанных в пункте 1.1 и 1.2 монтажный рисунок, графическое и буквенные обозначения всех изучаемых аппаратов, также условные графические и буквенные обозначения катушек и контактов электромагнитных реле, контакторов, реле времени, реле тока, теплового реле и контактов различных выключателей в силовых и слабых цепях.

## Литература

Авдейко, В.П. Электростатика, электрические машины и аппараты: учеб.-метод. комплекс / В.П. Авдейко. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С. 72 – 79, 258 – 260.

## 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.

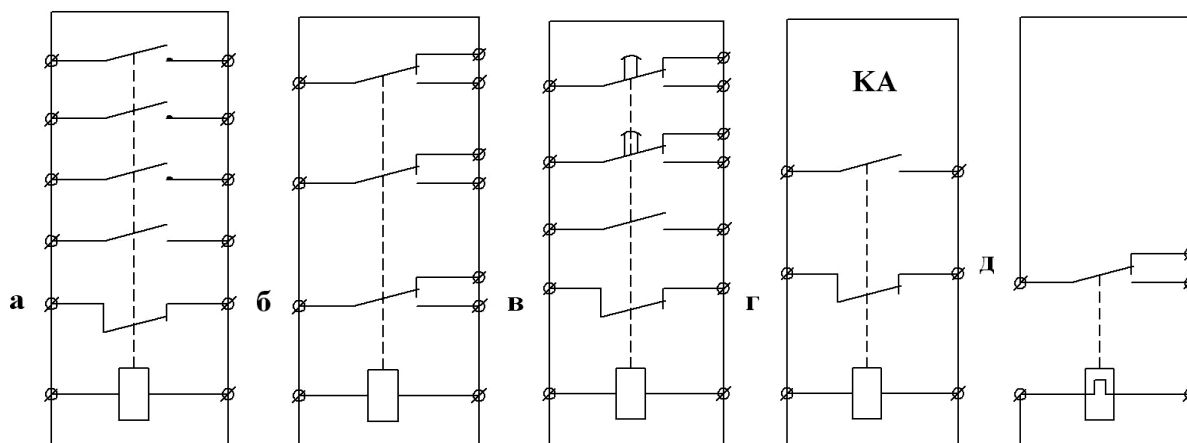


Рис. 3. Схемы аппаратов

14. Пояснить, как будут коммутировать во времени сигнальные лампы:

- а) при включении тумблера SA;
- б) при выключении тумблера SA (рис. 4).

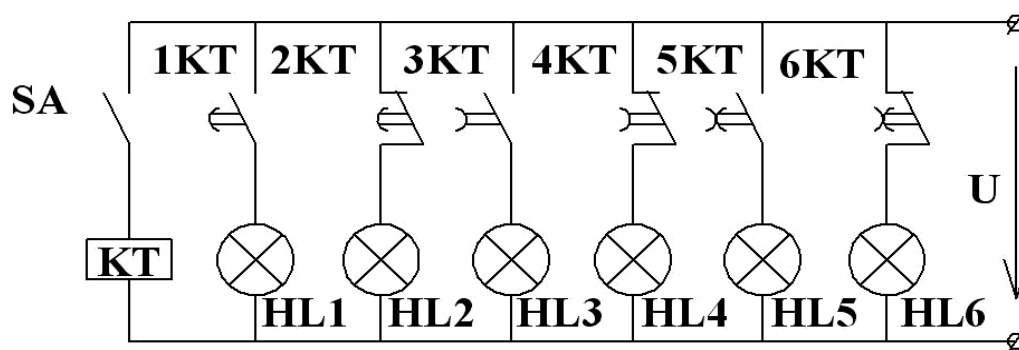


Рис. 4. Схема включения сигнальных ламп

### Лабораторная работа № 3

## ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

**Цель работы:** ознакомиться с конструкцией электромагнитных реле, контакторов и тепловых реле, определить клеммные выводы их обмоток и контактов, запомнить графическое и буквенное обозначение этих аппаратов. Исследовать работу различных схем тепловой защиты.

#### 1. Рабочее задание

1.1. Составить, собрать и опробовать в работе простейшую схему тепловой защиты электрической маломощной цепи, в которой ток нагрузки не превышает номинальный, допустимый ток контакта теплового реле. Ток нагрузки контролировать амперметром с использованием трансформатора тока. В качестве нагрузки включить лампы накаливания.

1.2. Составить, собрать и опробовать схему тепловой защиты мощной электрической цепи, в которой отключение силовой цепи осуществляется контактом контактора, а тепловое реле имеет один размыкающий контакт.

1.3. Составить, собрать и опробовать схему тепловой защиты мощной электрической цепи, в которой включение нагрузки (ламп накаливания) осуществляется кнопкой «Пуск».



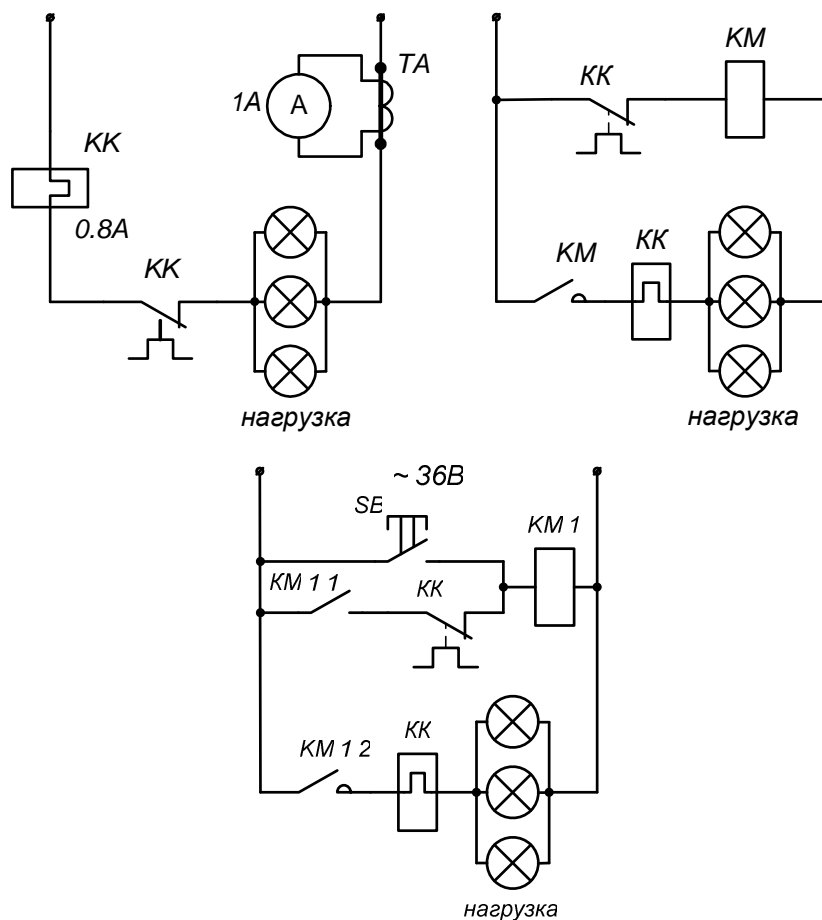
## 2. Обработка результатов эксперимента

В отчете должны быть представлены все три схемы тепловой защиты электрической цепи с подробным описанием работы схемы в нормальном режиме и при перегрузке.

Необходимо описывать, по какому пути течет ток и в каком порядке срабатывают электрические контакты.

Кроме того, письменно указать на положительные и отрицательные моменты инерционности тепловой защиты.

## 3. Схемы тепловой защиты электрических цепей



.Литература

Авдейко, В.П. Электростатика, электрические машины и аппараты: учеб.-метод. комплекс / В.П. Авдейко. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С. 80 – 84, 199 – 200.

## Контрольное задание

Объяснить работу заданной электрической схемы в нормальном режиме и при перегрузке (рис. 5). Обеспечивает ли схема нулевую защиту?

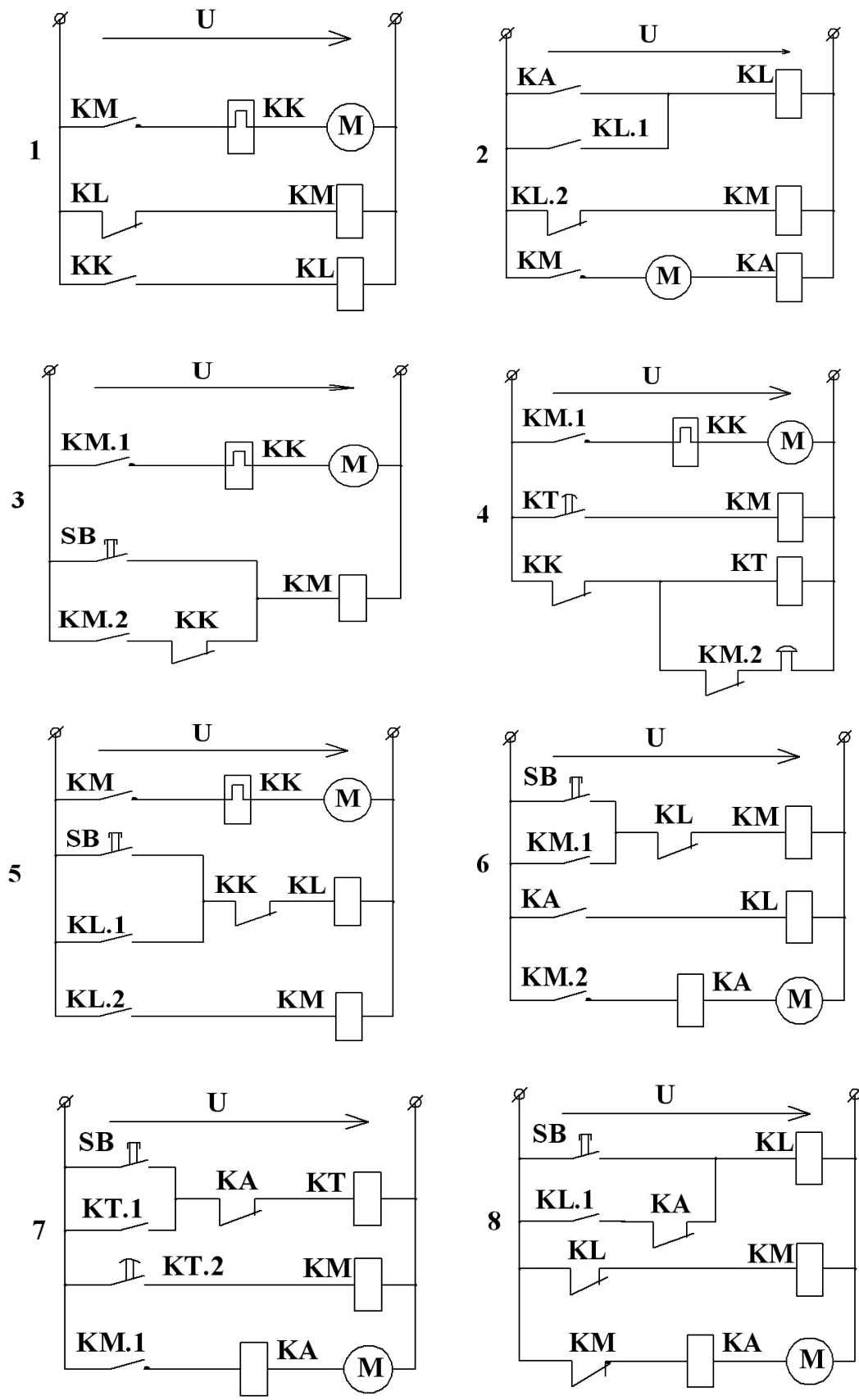


Рис. 5. Электрические схемы (см. также стр. 227)

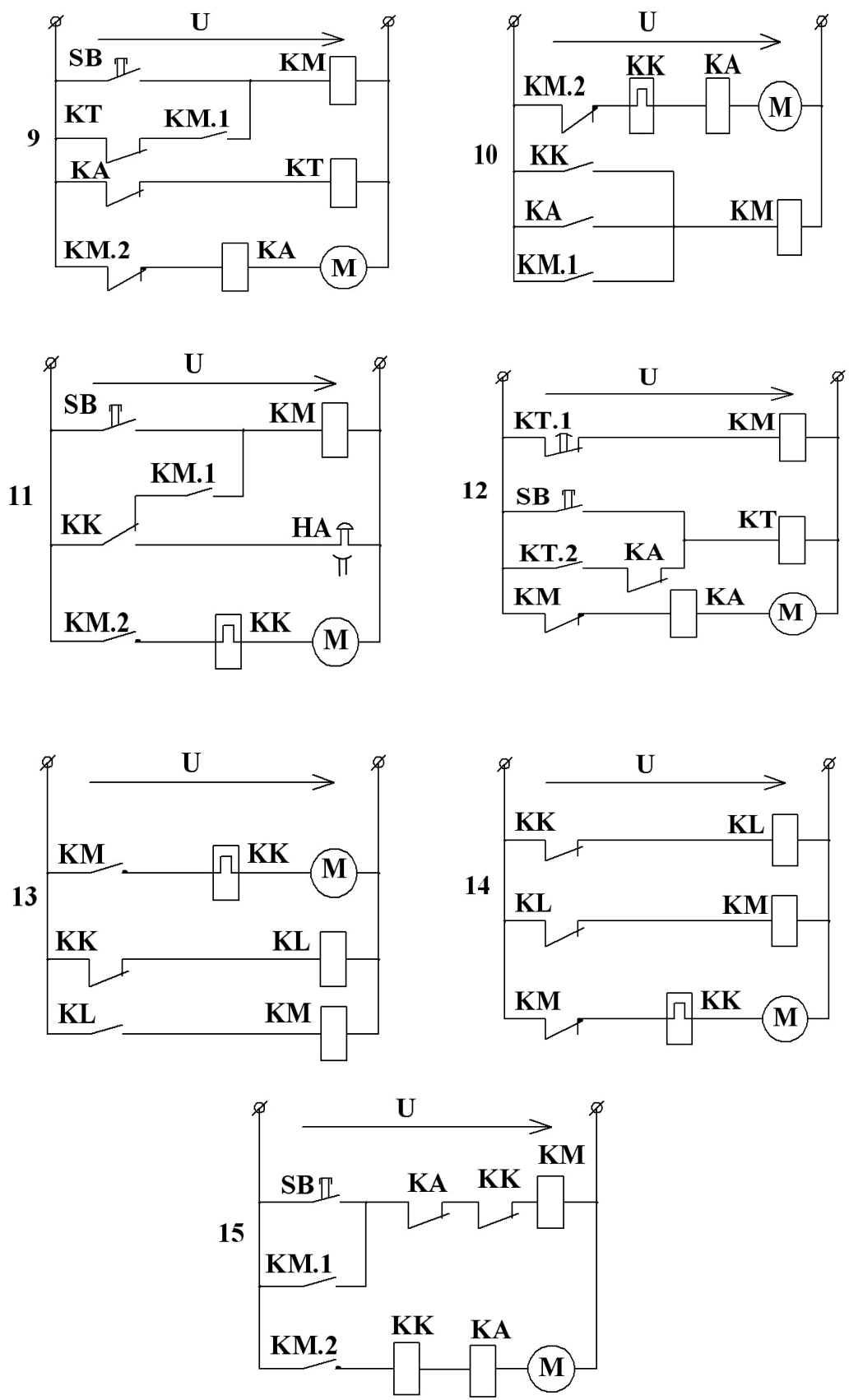


Рис. 5. Электрические схемы (окончание)

## Лабораторная работа № 4

### МАКСИМАЛЬНАЯ ТОКОВАЯ ЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

**Цель работы:** ознакомиться с конструкцией реле тока, реле времени, определить клеммные выводы их обмоток и контактов, запомнить графическое и буквенное обозначение этих аппаратов, исследовать работу различных схем максимальной токовой защиты.

#### 1. Рабочее задание

1.1. Составить, собрать и опробовать схему максимальной токовой защиты с реле тока, которая бы обеспечила мгновенное отключение нагрузки при ее перегрузки. В качестве нагрузки включить лампы накаливания, а отключение нагрузки должно осуществляться контактом контактора.

1.2. Составить, собрать и опробовать схему максимальной токовой защиты, которая бы обеспечила аварийное отключение нагрузки с некоторой выдержкой времени. Такая выдержка времени нужна, если перегрузка случайная, кратковременная и не успевает вызвать перегрев и повреждение элементов рабочей цепи

1.3. Составить, собрать и опробовать схему максимальной токовой защиты, которая бы обеспечила отключение нагрузки и при сравнительно небольшой перегрузке (с помощью теплового реле) и при значительной, например, 10-кратной перегрузке (с помощью реле тока).

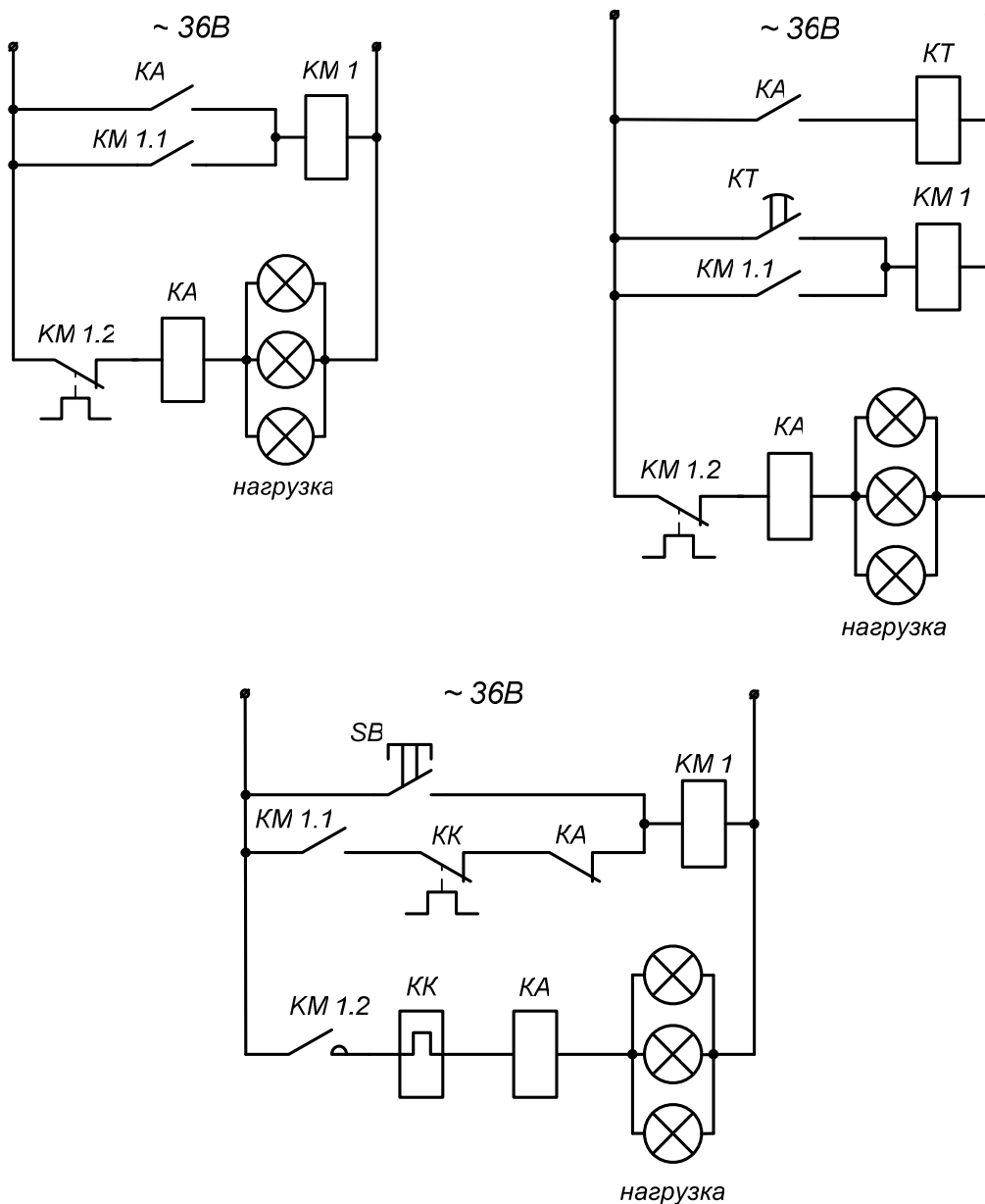
#### 2. Обработка результатов эксперимента

В отчете должны быть представлены все три схемы максимальной токовой защиты электрической цепи с подробным описанием работы схемы в нормальном режиме и при перегрузке.

Необходимо описывать, по какому пути течет ток и в каком порядке срабатывают электрические контакты.

Письменно объяснить, в чем сходство и различие максимальной токовой защиты с помощью теплового реле и реле тока.

#### 4. Схемы максимальной токовой защиты электрических цепей



.Литература

Авдейко, В.П. Электростатика, электрические машины и аппараты: учеб.-метод. комплекс / В.П. Авдейко. – Новополюк: ПГУ, 2009. – С. 80 – 84, 201 – 207.

#### 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;

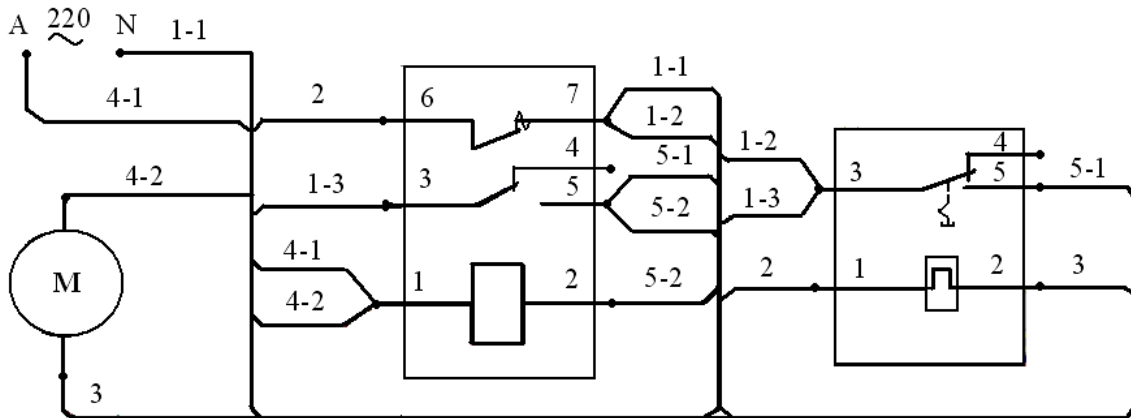


Схема 1

в схеме 2 провод 1-2 подсоединить не к 4-й, а к 3-й клемме КК;

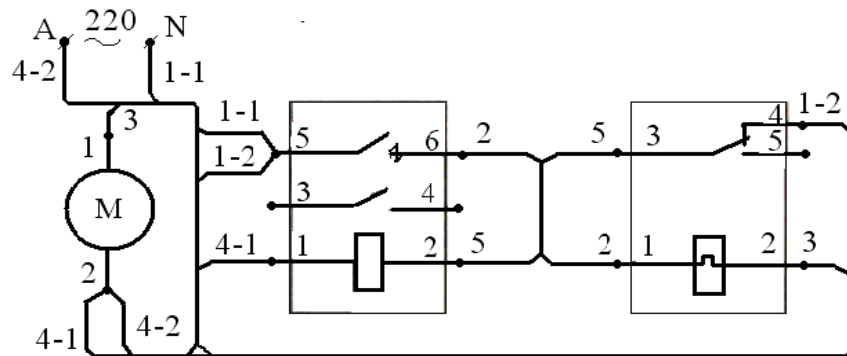


Схема 2

в схеме 3 провод 2 подсоединить не ко 2-й, а к 1-й клемме КК;

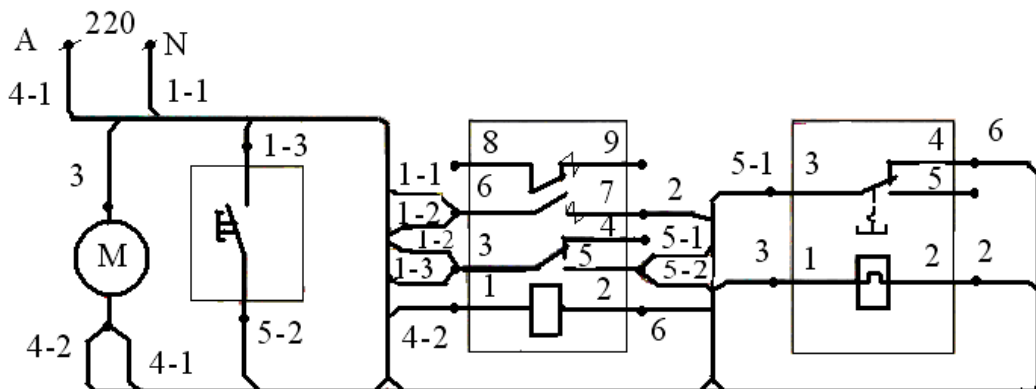


Схема 3

в схеме 4 провод 5-2 подсоединить не к 5-й, а к 4-й клемме КМ;

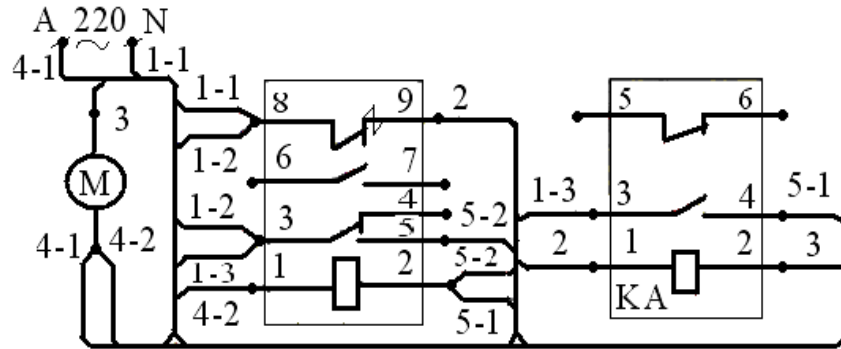


Схема 4

в схеме 5 провод 1-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме М;

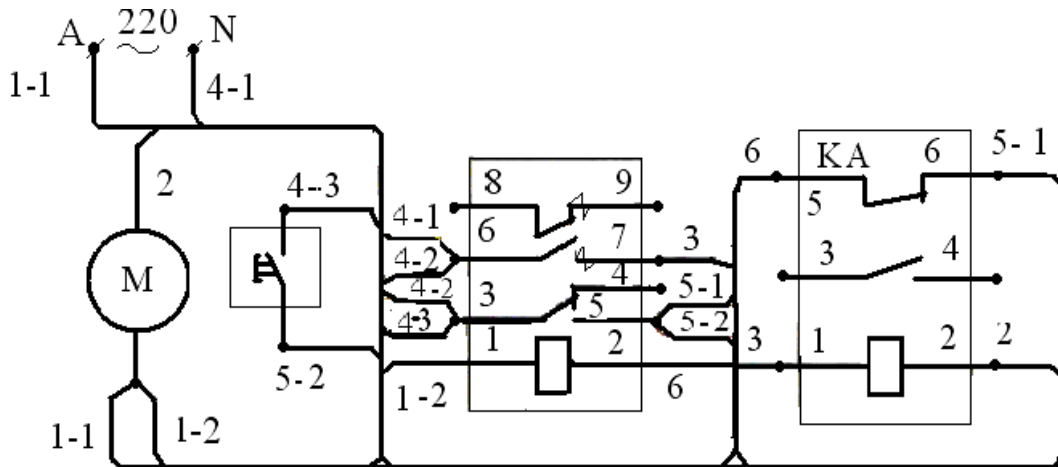


Схема 5

в схеме 6 провод 4-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме КК;

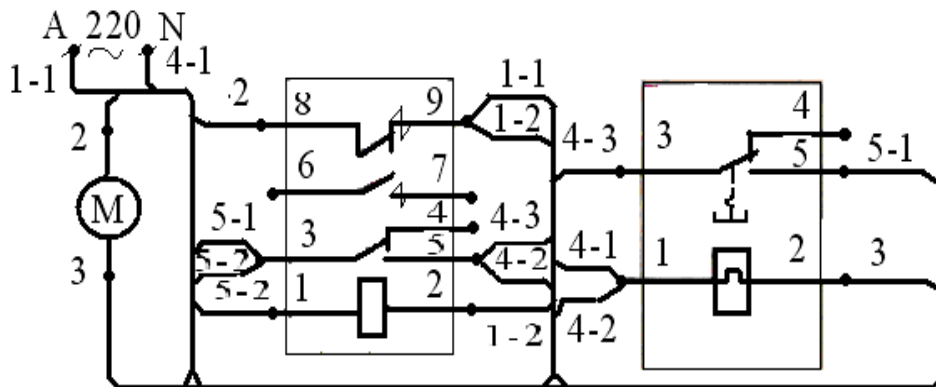


Схема 6

в схеме 7 провод 1-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме КК;

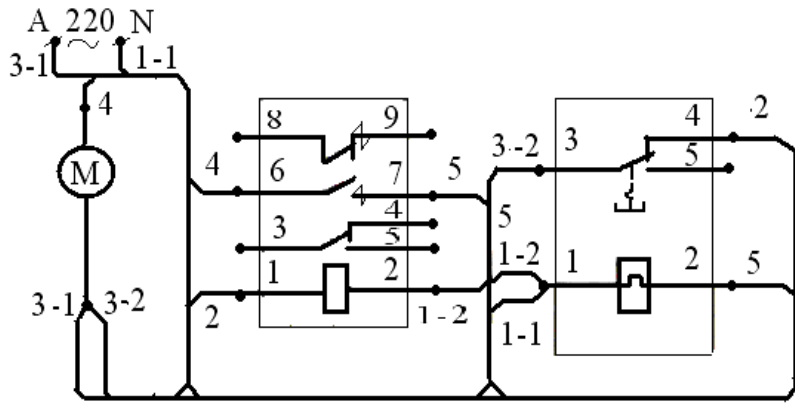


Схема 7

в схеме 8 провод 4-3 подсоединить не к 3-й, а к 5-й клемме КМ;

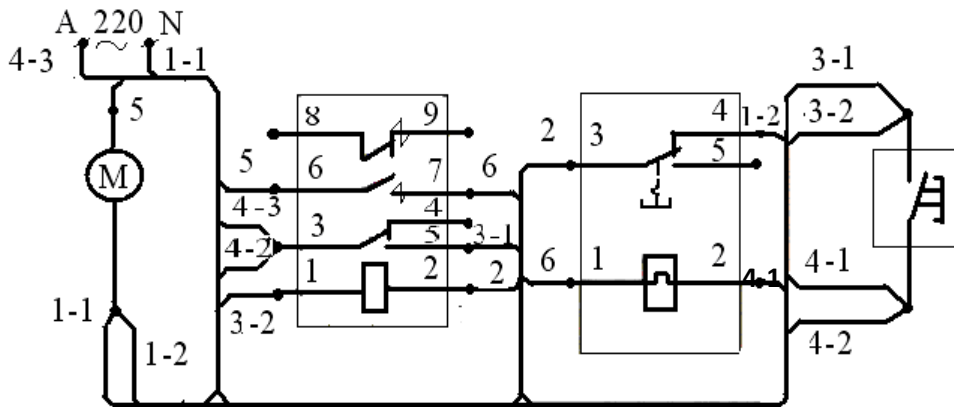


Схема 8

в схеме 9 провод 1-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме М;

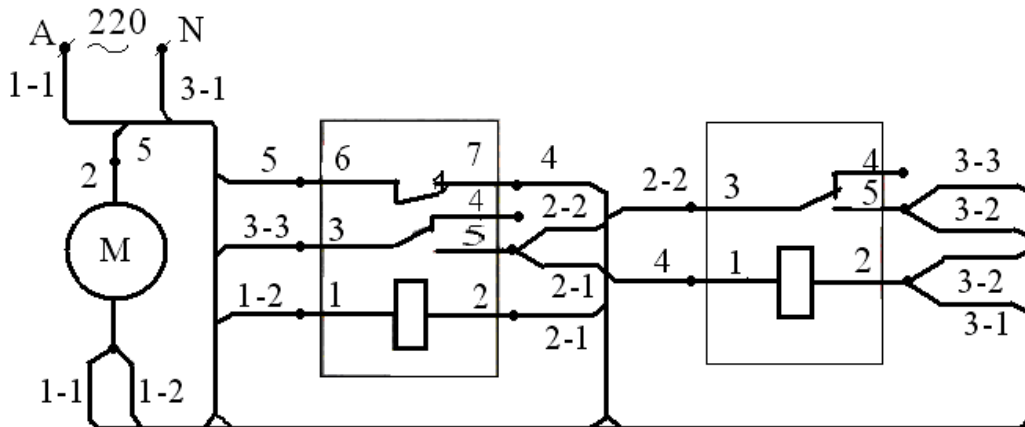


Схема 9





в схеме 13 провод 2-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме КК;

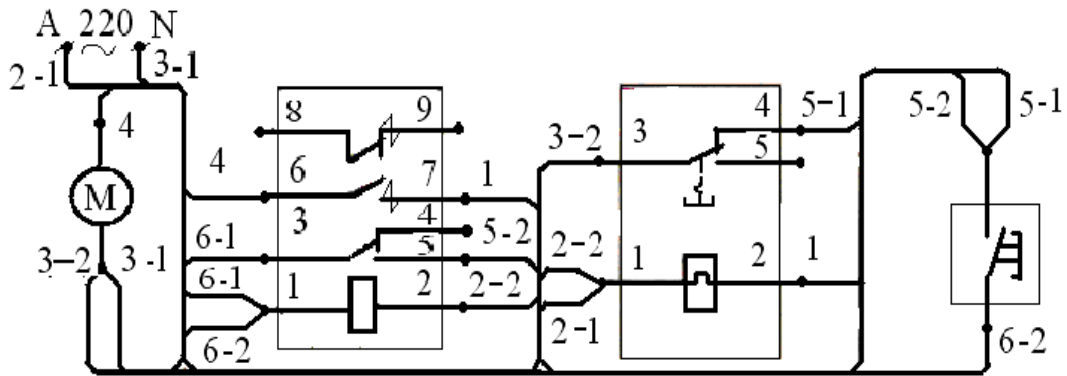


Схема 13

в схеме 14 провод 4-3 подсоединить не к 3-й, а к 9-й клемме КМ;

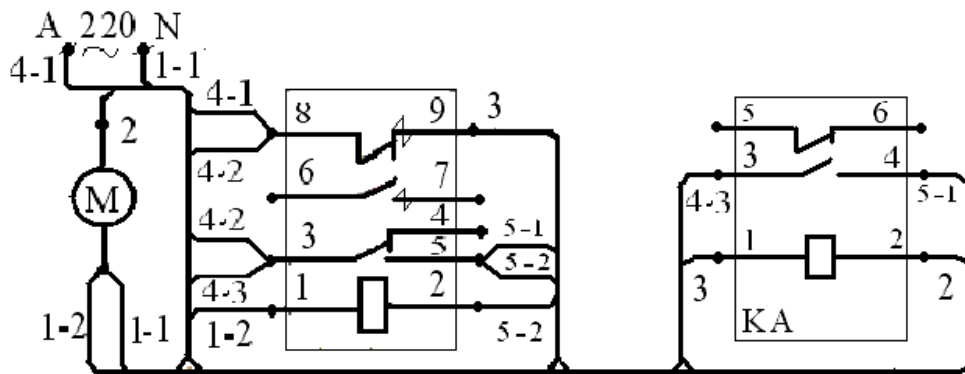


Схема 14

в схеме 15 оборван провод 4-1;

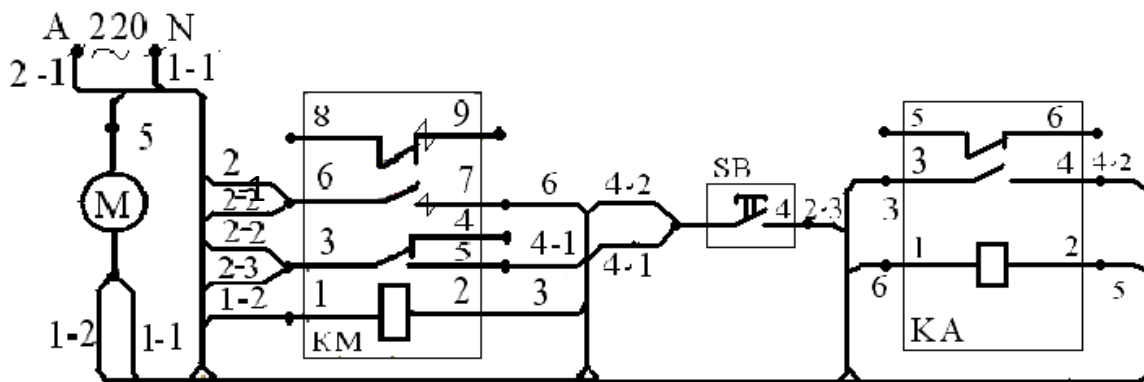


Схема 15

в схеме 16 оборван провод 2-2;

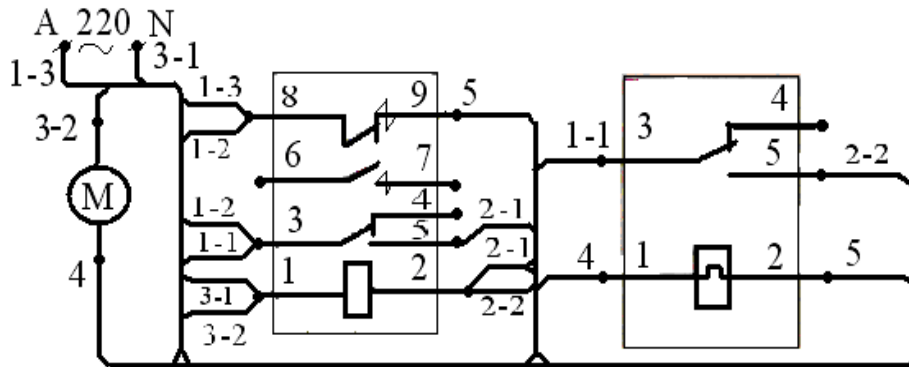


Схема 16

в схеме 17 соединить перемычкой 4-ю и 2-ю клеммы КМ;

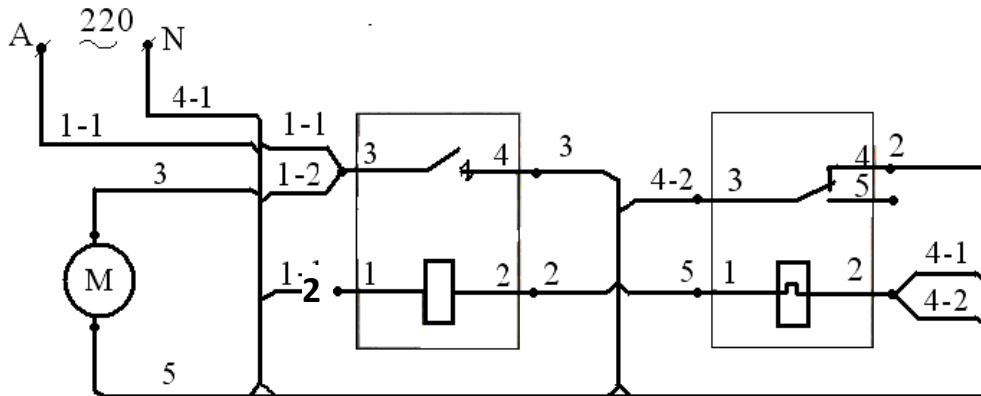


Схема 17

в схеме 18 провод 4-2 подсоединить не к 1-й, а ко 2-й клемме КМ;

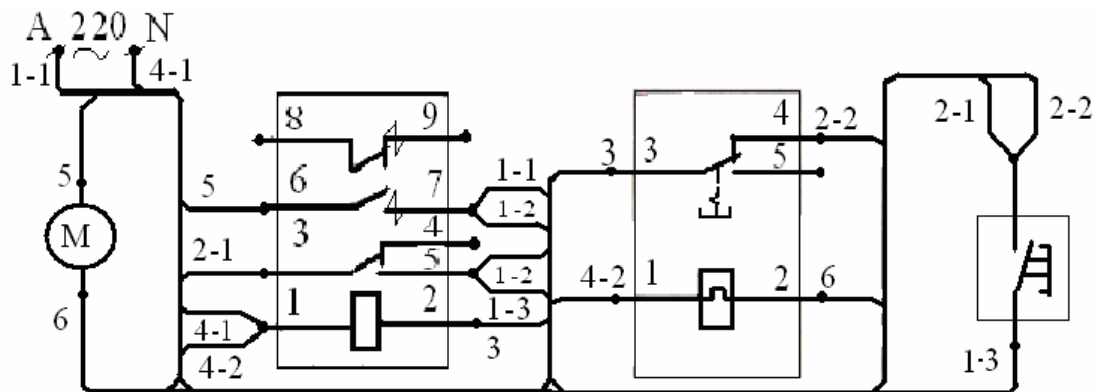


Схема 18

в схеме 19 провод 3-2 подсоединить не ко 2-й, а к 1-й клемме КА;

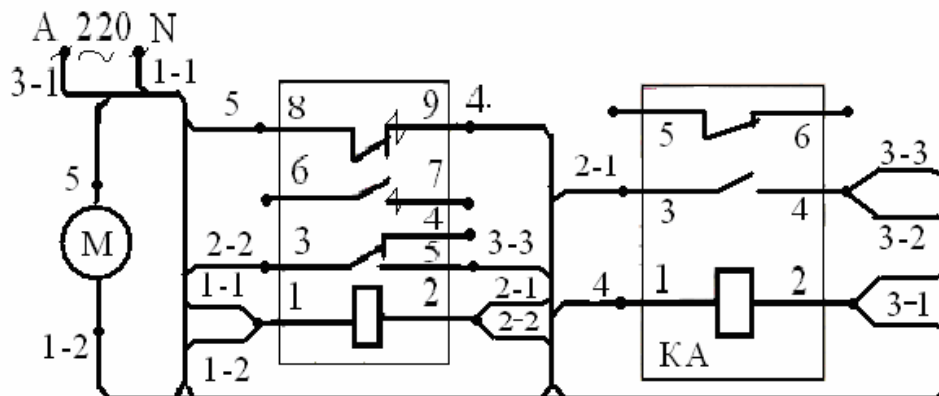


Схема 19

в схеме 20 провод 2-2 подсоединить не ко 2-й, а к 1-й клемме КА.

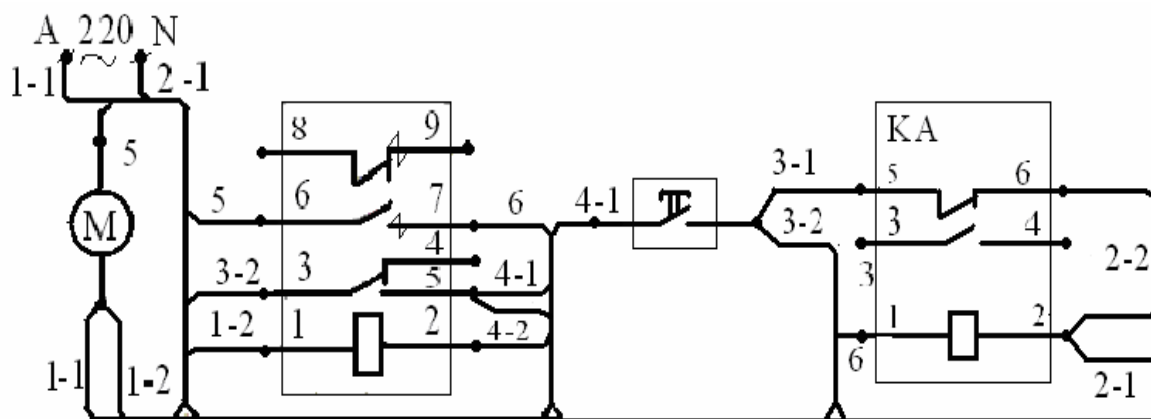


Схема 20

## Лабораторная работа № 5

### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ ПРИЕМНИКОВ

**Цель работы:** научиться практически определять фазовые сдвиги напряжения относительно тока в различных приемниках и токи при их параллельном соединении.

#### 1. Порядок проведения работы

1.1. Собрать схему параллельного соединения лампы накаливания (активное сопротивление), катушки индуктивности (активно-индуктивная нагрузка) и конденсатора (емкостная нагрузка) (рис. 1).

В качестве активного сопротивления включить последовательно две лампы накаливания, в качестве активно-индуктивной нагрузки – последовательно две вторичные обмотки вспомогательного трехфазного трансформатора (при этом первичные обмотки должны быть отключены от сети, т.е. ручка пакетного выключателя должна находиться в горизонтальном положении), в качестве емкостной нагрузки включить параллельно три конденсатора.

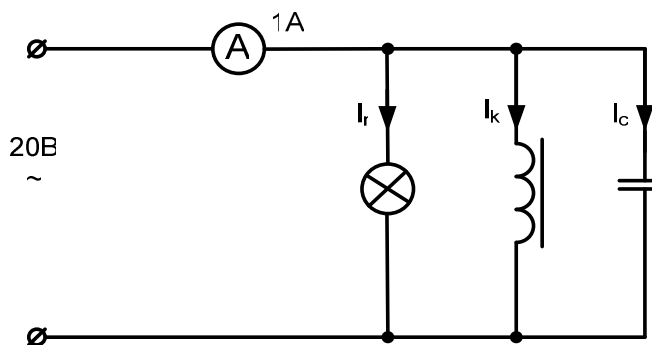


Рис. 1. Принципиальная схема

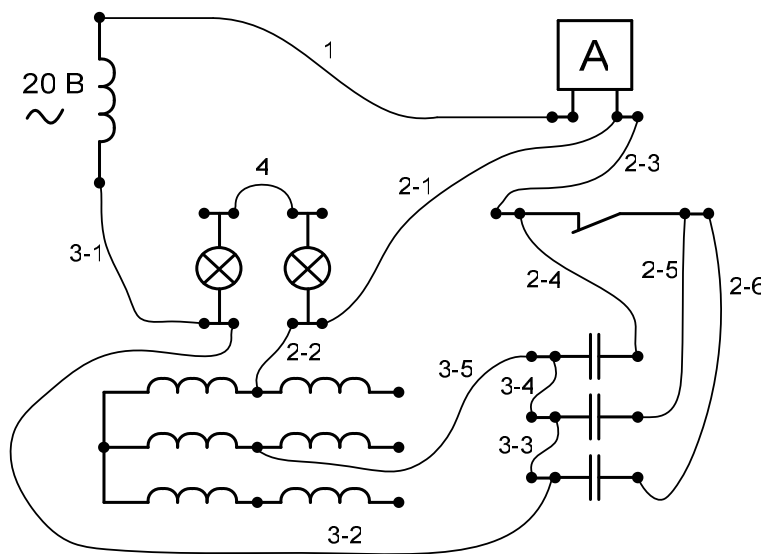


Рис. 2. Схема соединений (монтажная схема)

Монтажную схему собрать в точном соответствии с рис. 2, чтобы в процессе эксперимента не ошибиться при сборке схем различных вариантов соединений.

1.2. Определить токи, потребляемые каждой нагрузкой в отдельности и при их параллельном соединении. Экспериментальные данные внести в таблицу.

Чтобы определить ток в лампах накаливания  $I_r$ , необходимо отсоединить провод 3-2, снять показания и восстановить схему. Ток в катушке индуктивности  $I_k$  покажет амперметр, если выключить одну из ламп и отсоединить провод 2-3. Восстанавливать схему необходимо после каждого измерения. Ток в цепи конденсатора  $I_c$  можно определить, если выключена одна из ламп и отсоединен провод 3-5. Ток параллельного соединения ламп и катушки  $I_{rk}$  определяется при отсоединении провода 2-3. Чтобы определить ток параллельного соединения ламп и конденсатора  $I_{rc}$ , необходимо отсоединить провод 2-2. Ток параллельного соединения катушки и конденсатора  $I_{kc}$  можно определить, выключив одну из ламп. В исходном состоянии определяется общий ток параллельного соединения ламп, катушки и конденсатора  $I_{rkc}$ .

Лампы накаливания	Катушка индуктивности	Конденсатор	Лампы и катушка	Лампы и конденсатор	Катушка и конденсатор	Лампы, катушка и конденсатор
$I_r =$	$I_k =$	$I_c =$	$I_{rk} =$	$I_{rc} =$	$I_{kc} =$	$I_{rkc} =$

## 2. Обработка результатов измерений

Построить векторную диаграмму всех измеренных токов относительно напряжения питания.

2.1. В произвольном масштабе и в произвольном направлении (вертикально вверх) отложить вектор напряжения питания.

2.2. Вектор тока  $I_r$  направить вдоль вектора напряжения в масштабе  $m_I = 10$  мА/мм (ток в лампе совпадает по фазе с напряжением).

2.3. Из конца вектора  $I_r$  провести дугу радиусом, равным длине вектора  $I_k$ , а из начала вектора – дугу радиусом вектора  $I_{rk}$ . Пересечение этих дуг определит направление векторов  $I_k$  и  $I_{rk}$  в соответствии с первым законом Кирхгофа  $I_{rk} = I_r + I_k$ . При этом определяются и фазные сдвиги  $\varphi_k$  и  $\varphi_{rk}$ .

2.4. Аналогично определить фазы векторов  $I_c$  и  $I_{rc}$  ( $I_{rc} = I_r + I_c$ ).

2.5. Перенести вектор  $I_c$ , совместив его начало с концом вектора  $I_k$ , в результате чего определяется длина и фаза вектора  $I_{rkc} = I_r + I_k + I_c$  и  $I_{kc} = I_k + I_c$ .

2.6. Измерить длину векторов  $I_{rkc}$  и  $I_{kc}$ , по масштабу определить величину этих векторов и сравнить с экспериментальными данными.

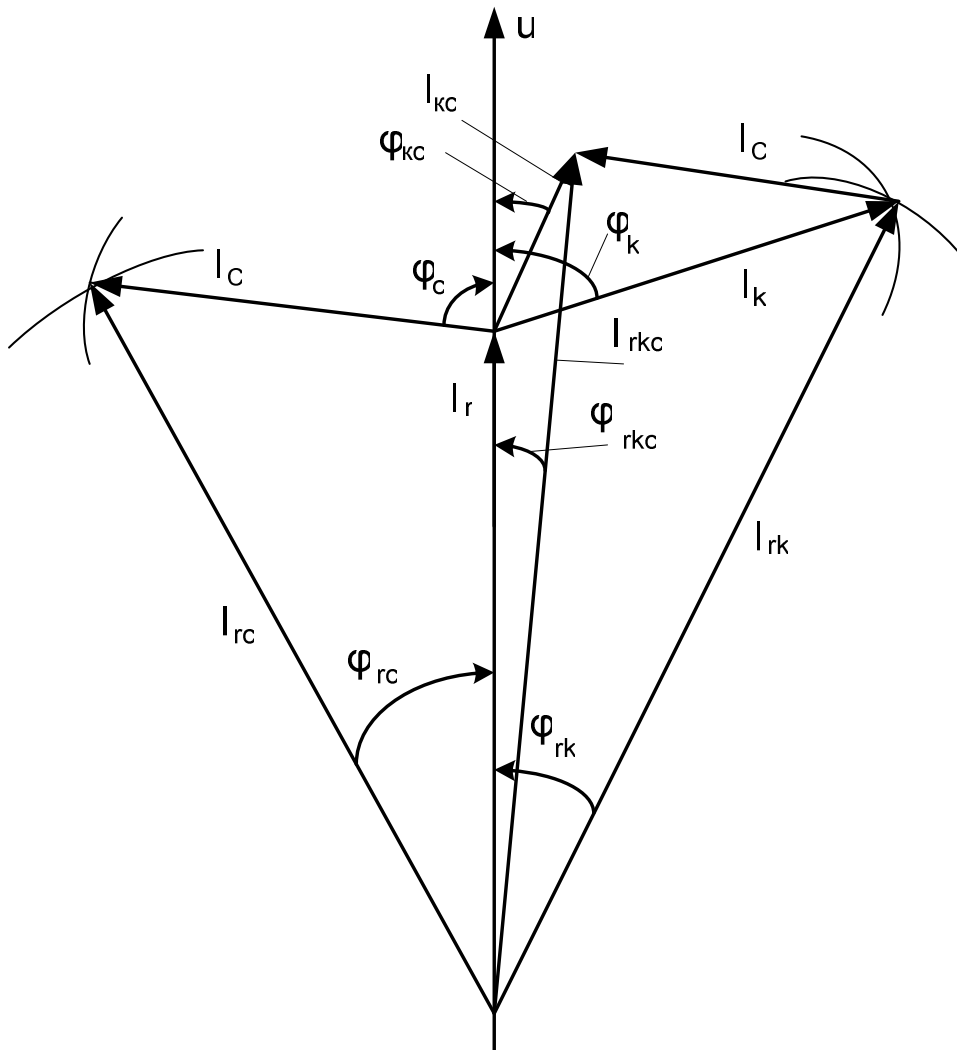


Рис. 3. Векторная диаграмма токов различных приемников и их параллельного соединения в различных сочетаниях

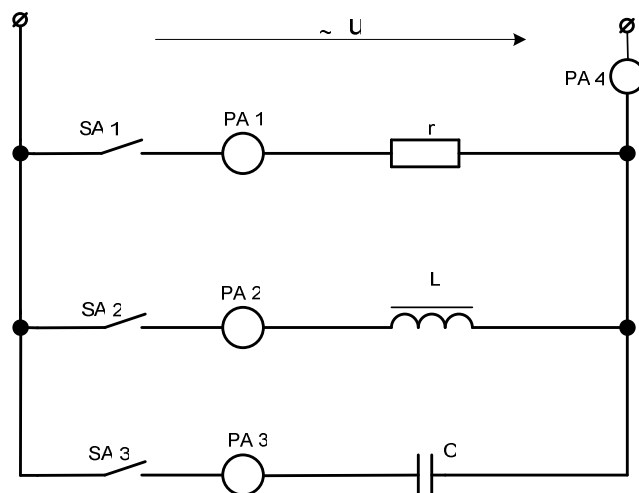


Рис. 4. Схема контрольного задания

## Литература

Авдейко, В.П. Электростатика, электрические машины и аппараты: учеб.-метод. комплекс / В.П. Авдейко. – Новополоцк: ПГУ, 2009. – С. 41 – 50.

### Контрольная задача

Определить показание одного из амперметров по известным показаниям остальных приборов.

Вариант	Включены все тумблеры				Выключен тумблер SA1			Выключен тумблер SA2			Выключен тумблер SA3		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
РА1 (А)	0,8	0,9		0,6	0	0	0		1,2	1	0,3	0,8	
РА2 (А)	1		1	1,5	1,2	0,5		0	0	0	0,4		0,3
РА3 (А)	0,4	0,3	0,2		0,8		1,5	0,8		1	0	0	0
РА4 (А)		1,3	1	1		0,7	0,5	1	1,5			1	0,5

### Лабораторная работа № 6

#### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

**Цель работы:** исследовать различные схемы соединений генератора и приемника в трехфазных цепях при различных режимах работы и определить область применения той или иной схемы.

##### 1. Порядок проведения работы

1.1. Измерить фазные напряжения генератора (вторичных обмоток трехфазного трансформатора), соединить две обмотки последовательно в начале согласно (конец первой с началом второй), а затем встречно (соединить концы обмоток) и измерить общее напряжение последовательного соединения в обоих случаях. Построить векторную диаграмму и убедиться в том, что векторы фазных напряжений сдвинуты на  $120^\circ$ , т.е. фазы этих напряжений сдвинуты на одну треть периода.

1.2. Соединить концы (или начала) фаз и вторичных обмоток трансформатора и нагрузки (ламп накаливания), соединить нейтральные точки нулевым проводом, тремя линейными проводами соединить генератор с нагрузкой. Включить схему и измерить линейные напряжения.



1.3. Установить равномерную нагрузку, измерить фазные напряжения нагрузки  $U'_A, U'_B, U'_C$ , напряжение между нейтральными точками (смещение нейтрали)  $U'_{NN'}$  и ток в нейтральном проводе  $I_N$ . Данные эксперимента занести в таблицу (п. 1).

№	Схема соединений		Характер нагрузки	Напряжение на нагрузке			$U'_{NN'}$ , В	$I_N$ , А
	генератор	нагрузка						
				$U'_A, В$	$U'_B, В$	$U'_C, В$		
1	Y с нейтралью	Y с нейтралью	равномерная					
2	Y с нейтралью	Y с нейтралью	неравномерная					
3	Y	Y	равномерная					-
4	Y	Y	неравномерная	расчет				-
				опыт				-
5	Y	Y	КЗ фазы				-	-
6	Δ	Δ	равномерная				-	-
7	Δ	Δ	неравномерная				-	-
8	Y	Δ	равномерная				-	-
9	Δ	Y	равномерная				-	-

1.4. Изменить нагрузку (количество ламп) в одной фазе и убедиться в том, что это не влияет на накал ламп в других фазах. Заполнить таблицу для какой-либо неравномерной нагрузки, используя неравномерное количество ламп в фазах (№ 2).

1.5. Восстановить равномерную нагрузку, включить схему и отсоединить нейтральный провод. Убедиться в том, что при симметричной на-

грузке нулевой провод не нужен. Данные измерений занести в таблицу (№ 3).

1.6. По заданной преподавателем равномерной нагрузке с помощью векторной диаграммы, построенной в масштабе 0,5 В/мм, определить графически смещение нейтрали и фазные напряжения нагрузки.

1.7. Установить заданную нагрузку и проверить расчет. Заполнить таблицу (№ 4).

1.8. При отсутствии нейтрального провода и любой нагрузке коротить одну из фаз, произвести измерения и заполнить № 5 таблицы.

1.9. Соединить вторичные обмотки трансформатора и нагрузку треугольником (конец первой фазы с началом второй, конец второй с началом третьей, конец третьей с началом первой) и связать генератор и приемник тремя линейными проводами. Измерить фазные напряжения  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  при равномерной и неравномерной нагрузке (№ 6 и № 7). Сделать вывод о независимости работы фаз.

1.10. Собрать схему, в которой нагрузка остается соединенной треугольником, а генератор соединен звездой. Измерить напряжения на нагрузке. Заполнить № 8.

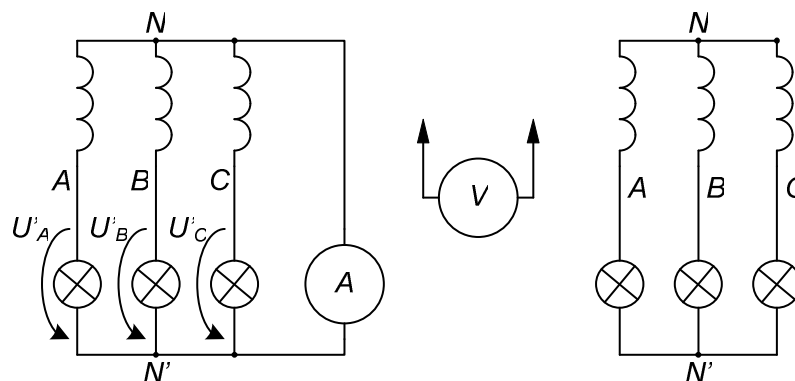
1.11. Собрать схему, в которой генератор соединен треугольником, а нагрузка звездой. Заполнить № 9 таблицы.

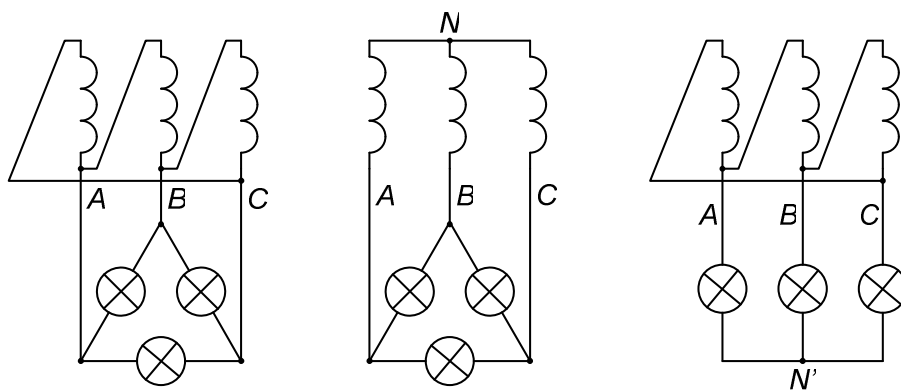
## 2. Выводы

По результатам измерений письменно объяснить:

- какие схемы соединений обеспечивают независимую работу фаз;
- в каких случаях используется та или иная схема;
- какова роль нулевого провода;
- какая схема соединения генератора является предпочтительной с экономической точки зрения?

## 3. Схемы соединения





### Литература

Авдейко, В.П. Электростатика, электрические машины и аппараты: учеб.-метод. комплекс / В.П. Авдейко. – Новополюк: ПГУ, 2009. – С. 64 – 69.

### 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.

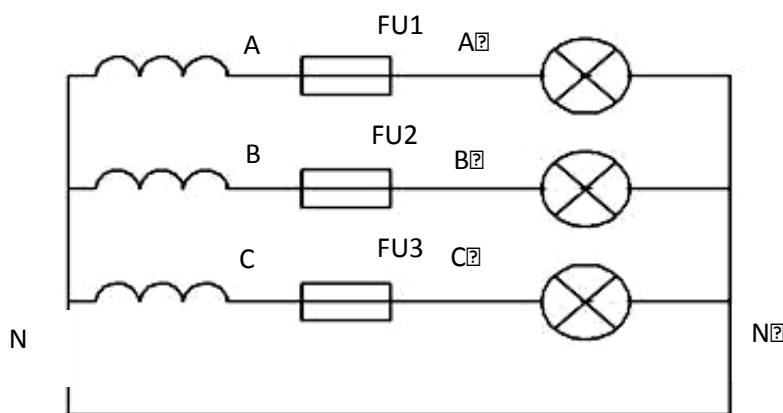


Рис. 6. Схема питания нагрузки

Таблица вариантов

Схема	Сгорел предохранитель линии			Определить					
	AA'	BB'	CC'	$U_{A'B'}$	$U_{B'C'}$	$U_{C'A'}$	$U_{A'N'}$	$U_{B'N'}$	$U_{C'N'}$
Y – Y <sub>N</sub>	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 № 7

#### МАРКИРОВКА ВЫВОДОВ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА И АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы:** определить начала и концы вторичных обмоток трехфазного трансформатора и обмоток статора асинхронного электродвигателя.

#### 1. Предварительные сведения

В систематичной трехфазной системе фазные напряжения источника питания (в данном случае вторичных обмоток трансформатора) сдвинуты во времени на  $1/3$  периода (рис. 1, а, б).

#### Маркировка вторичных обмоток трехфазного трансформатора

Начало  $a$  и конец  $x$  одной из обмоток можно промаркировать произвольно. Если соединить эту обмотку последовательно со второй и измерить общее напряжение этого соединения, то при согласном включении (конец  $x$  первой обмотки соединен с началом второй обмотки) общее напряжение  $\overline{U_{2a}} + \overline{U_{2b}}$  между выводами  $a$  и  $y$  будет равно напряжению на этих фазах, т.к. три вектора образуют равносторонний треугольник (рис. 1, в).

Если соединить эти обмотки последовательно и встречно (конец первой обмотки  $x$  соединить с концом второй обмотки  $y$ ), то общее напряжение между клеммами  $a$  и  $b$  будет в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного напряжения (рис. 1, г).

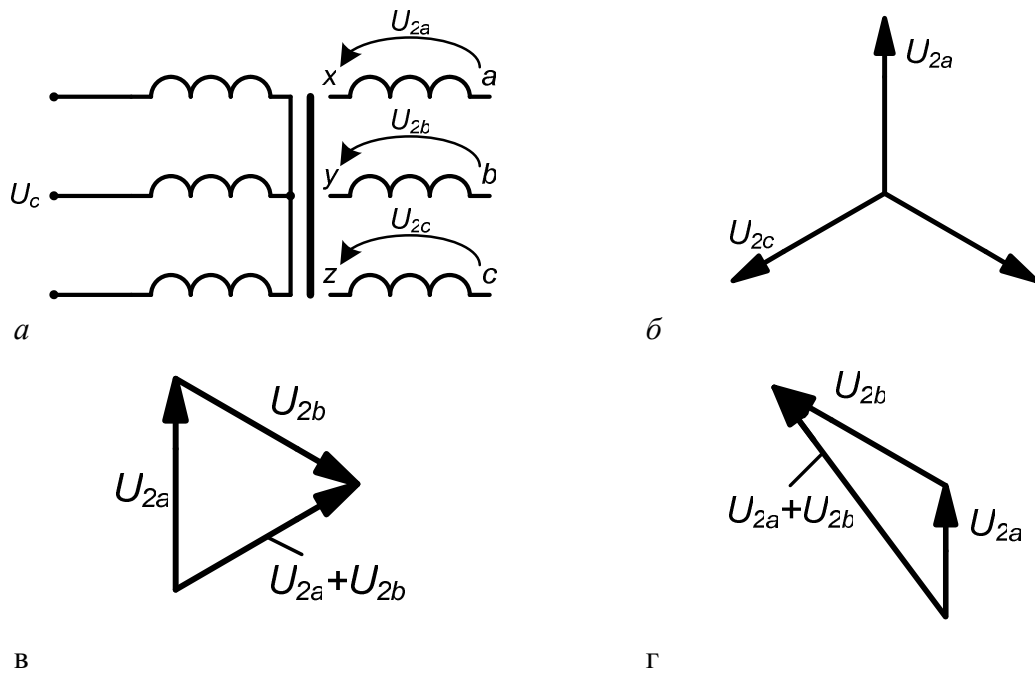


Рис. 1. Трехфазный трансформатор:  
*a* – схема; *б* – векторная диаграмма напряжений вторичных обмоток;  
*в* – ВД последовательного согласного; *г* – последовательного встречного соединения обмоток

Таким образом можно определить начало и конец третьей обмотки, соединяя ее последовательно с промаркированной. Если вольтметр показывает фазное напряжение, то соединены концы обмоток, если вольтметр показывает напряжение в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного, то соединены начало и конец обмоток.

Легко объяснить с помощью векторной диаграммы, если соединить последовательно и согласно три обмотки, то общее напряжение будет равно нулю, а если соединить две обмотки последовательно согласно, а третью встречно, то общее напряжение будет равно двойному фазному напряжению.

### Маркировка обмоток статора асинхронного двигателя

Трехфазная обмотка статора асинхронного двигателя укладывается в пазах вдоль его внутренней поверхности. Оси трех обмоток смещены в пространстве под углом 120 электрических градусов. Начала и концы этих обмоток обозначаются так: С1-С4, С2-С5, С3-С6.

В зависимости от номинального напряжения электродвигателя и напряжения сети обмотки могут быть включены или звездой, или треугольником. В первом случае замыкают между собой концы фаз С4, С5 и С6, а начала обмоток С1, С2 и С3 подключают к сети. При соединении тре-

угольником все три фазы соединяют последовательно и согласно (конец предыдущей фазы с началом последующей) и каждое из этих соединений подключают к трехфазной сети. При таком включении создается круговое вращающееся магнитное поле.

Если начало и конец какой-либо фазы поменять местами, то при включении обмоток статора в трехфазную сеть картина магнитного поля резко искажается. В результате нарушается нормальная работа электродвигателя, сопровождающаяся значительно большим потреблением тока и, как следствие, перегревом его.

Таким образом, если маркировка выводов обмоток статора отсутствует, то следует произвести их разметку.

## **2. Порядок проведения работы**

### **Маркировка вторичных обмоток трехфазного трансформатора**

2.1. Включить в сеть первичную обмотку трехфазного трансформатора и измерить фазные напряжения вторичных обмоток.

2.2. С помощью вольтметра определить три пары выводов вторичных обмоток.

2.3. Произвольно промаркировать одну из обмоток.

2.4. Соединить промаркированную обмотку последовательно с другой и по показанию вольтметра определить начало и конец второй обмотки.

2.5. Промаркировать 3-ю обмотку.

### **Маркировка обмоток асинхронного двигателя**

2.6. С помощью вольтметра и источника переменного тока пониженного напряжения, например, 36 В, определить три пары выводов, относящихся к обмоткам фаз статора.

2.7. Одну из обмоток промаркировать произвольно, обозначив их выводы С1 и С4.

2.8. Промаркированную обмотку соединить последовательно с другой обмоткой и включить это соединение в сеть переменного тока пониженного напряжения. Выводы третьей обмотки подсоединять к вольтметру. Если вольтметр показывает какое-либо напряжение, ТОО вторая обмотка включена согласно с первой, т.е. конец первой обмотки С4 соединен с началом второй С2 (рис. 2, а). Если вольтметр показывает ноль, то эти обмотки соединены встречно, т.е. конец первой обмотки С4 соединен с концом второй С5 (см. рис. 2, б).

2.9. Поменять местами клеммы второй обмотки и убедиться в правильности маркировки второй обмотки. Действительно, если две обмотки соединены последовательно и согласно, то магнитные потоки от токов 1-й и 2-й обмоток, пронизывающие третью обмотку, будут складываться, вольтметр покажет наведенную ЭДС взаимной индукции. Если поменять зажимы второй обмотки, то эти потоки будут направлены в противоположную сторону, суммарный поток будет равен нулю и, следовательно, ЭДС в этой обмотке наводиться не будет.

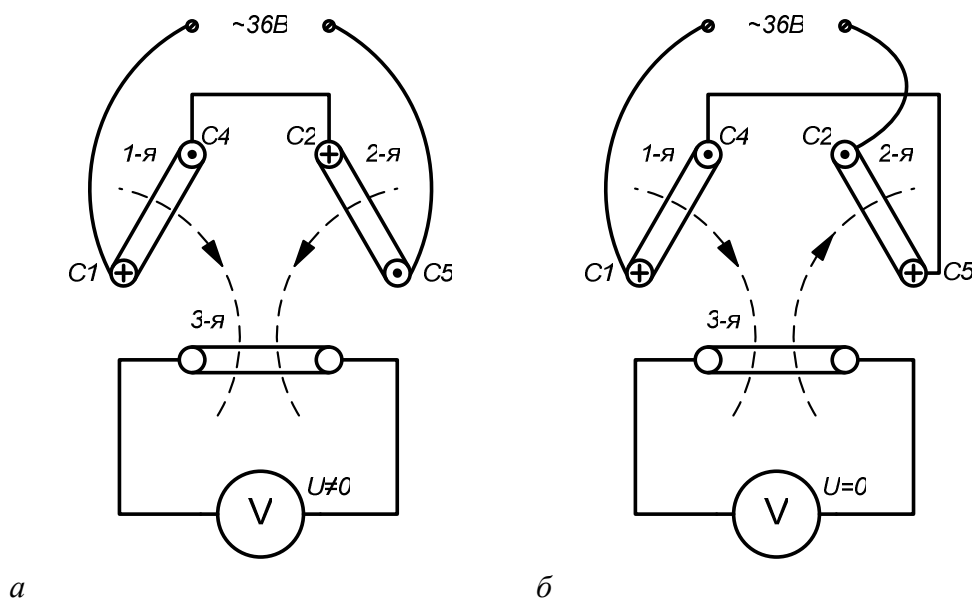


Рис. 2. Схема маркировки выводов трехфазной обмотки:  
*а* – согласное включение; *б* – встречное включение

2.10. Промаркировать третью обмотку, соединив ее последовательно с любой из промаркированных обмоток, а оставшуюся обмотку подключить к вольтметру.

2.11. Соединить обмотки трехфазного двигателя треугольником и включить в трехфазную сеть с линейным напряжением 36 В (вторичные обмотки трехфазного трансформатора соединить звездой). Измерить линейный ток, потребляемый двигателем.

2.12. Поменять местами зажимы одной из обмоток и снова измерить ток двигателя.

### 3. Оформление отчета

Отчет должен содержать:

- Электрические схемы маркировки выводов вторичных обмоток трехфазного трансформатора и обмоток статора трехфазного асинхронного электродвигателя.

- Описание принципа маркировки этих выводов с поясняющими схемами и векторными диаграммами.
- Схему питания асинхронного двигателя от вторичных обмоток трансформатора при правильном включении обмоток статора треугольником и схему питания, в которой поменяли начало и конец в одной из обмоток. При этом на схемах показать маркировку выводов обмоток, трансформатора и асинхронного двигателя.
- Объяснить разницу в показаниях амперметра в обеих схемах.

### Контрольное задание

Выводы трехфазной обмотки статора АД произвольно подключили к клеммой колодке с шестью пронумерованными клеммами. Для определения начала и конца каждой из трех обмоток провели два опыта. Вначале соединили две обмотки последовательно, включили это соединение в сеть переменного тока напряжением 36 В и измерили индуцированное напряжение на третьей свободной обмотке. Затем третью обмотку соединили последовательно с одной из первых двух, включили в сеть 36 В и измерили напряжение на оставшейся свободной обмотке.

Определить, какие выводы обмоток статора С1-С6 подсоединены к той или иной клемме (подписать у клеммной колодке, приняв за начало С1 вывод обмотки, подключенной к первой клемме). Подключить этот двигатель (нарисовать монтажную схему) звездой для нечетных вариантов или треугольником для четных к сети напряжением 380 В.

### Пример задания

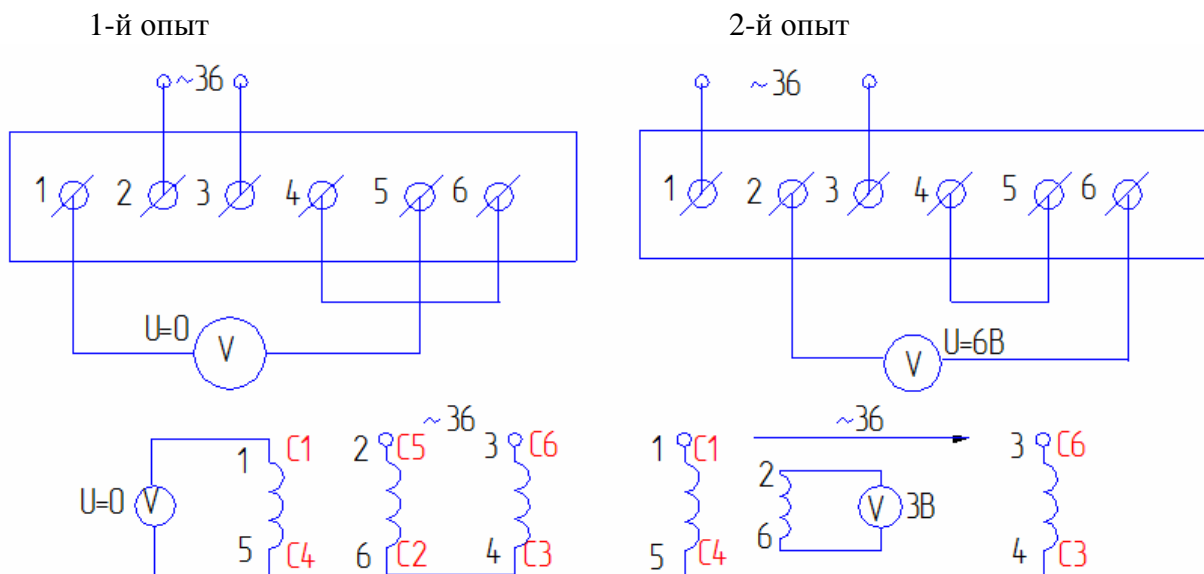




Таблица 1

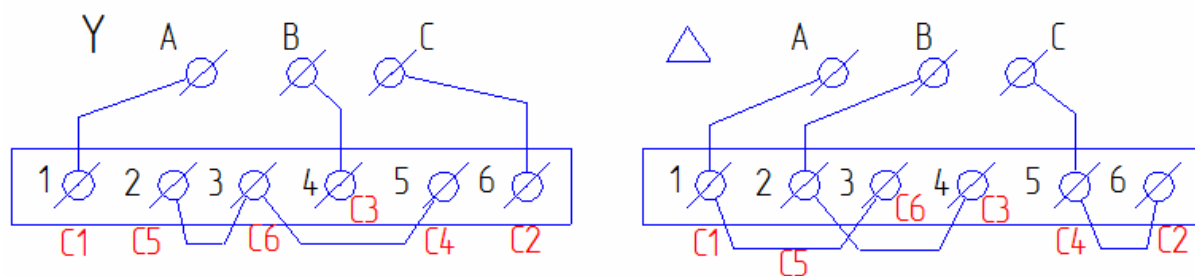
Таблица вариантов

№ варианта	Первый опыт			Второй опыт				
	Сеть □ 36 В подключена к клеммам	Закорочены клеммы	Вольтметр подключен к клеммам	Показание вольтметра	Сеть □ 36 В подключена к клеммам	Закорочены клеммы	Вольтметр подключен к клеммам	Показание вольтметра
1	1-6	3-2	4-5	3	2-5	6-4	3-1	0
2	5-4	3-6	1-2	0	1-3	2-5	4-6	3
3	1-2	4-5	3-6	3	4-6	2-3	1-5	0
4	6-3	5-2	4-1	0	1-5	4-6	2-3	3
5	1-4	3-6	5-2	3	3-2	4-5	6-1	0
6	4-6	2-3	1-5	0	1-3	5-4	6-2	3
7	5-1	6-4	2-3	3	6-2	3-5	1-4	0
8	2-3	4-5	1-6	0	4-1	6-2	3-5	3
9	6-1	2-3	5-4	3	3-5	6-4	2-1	0
10	5-4	2-6	3-1	0	2-1	3-5	6-4	3
11	3-1	5-6	4-2	3	4-5	3-2	1-6	0
12	4-2	6-3	1-5	0	6-1	4-5	2-3	3
13	1-5	2-4	6-3	3	2-3	5-6	4-1	0
14	3-6	4-5	2-1	0	1-4	2-3	5-6	3
15	2-1	6-3	5-4	3	6-5	2-4	3-1	0
16	6-4	5-3	1-2	0	1-5	4-2	6-3	3
17	1-2	6-4	3-5	3	6-3	2-5	1-4	0
18	3-5	4-2	1-5	0	4-1	3-6	5-2	3
19	6-1	3-5	2-4	3	2-5	6-4	3-1	0
20	2-4	6-3	1-5	0	1-3	5-2	6-4	3
21	1-2	4-6	5-3	3	6-5	2-3	4-1	0
22	5-3	2-4	6-1	0	4-1	5-6	3-2	3
23	1-6	5-3	2-4	3	3-2	6-4	5-1	0
24	4-2	6-5	1-3	0	1-5	2-3	6-4	3
25	3-1	2-4	5-6	3	4-6	3-5	2-1	0

Решение:

Выводы обмоток легко определить по тем клеммам, к которым подключены вольтметры. Очевидно, три обмотки статора подключены к клеммам 1-5, 2-6 и к двум оставшимся. Анализ следует начинать с опыта, в котором обмотка, один из выводов которой подсоединен к 1-й клемме, подключена к источнику напряжением 36 В. (В нашем примере 2-й опыт.)

По условию С1 подсоединен к 1-й клемме, следовательно, С4 – к пятой. Так как вольтметр показал какое-то напряжение (6 В), то обмотки соединены согласно, т.е. конец первой обмотки С4 (клемма 5) подсоединен к началу третьей обмотки С3 (клемма 4), а конец этой обмотки С6 подсоединён к 3-й клемме. В первом опыте промаркированная третья обмотка соединена со 2-й обмоткой встречно (вольтметр показывает нуль), следовательно, начало этой обмотки С3 (клемма 4) соединена с началом второй обмотки С2 (клемма 6), а конец С5 – с клеммой 2. Промаркированные выводы обмоток статора АД легко подключить или звездой или треугольником.



## Лабораторная работа № 8 ПУСК В ХОД АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО ПУСКАТЕЛЯ

**Цель работы:** изучить схемы пуска в ход асинхронного двигателя АД с помощью автоматического воздушного выключателя (автомата) и магнитного пускателя и получить практический опыт разработки и сборки монтажной схемы.

### 1. Порядок проведения работы

Ознакомьтесь с конструкцией автомата, определить его входные и выходные клеммы, подключить асинхронный двигатель к трехфазной сети с помощью автомата и опробовать работу схемы.

1.2. Изучить работу схемы пуска в ход АД с помощью магнитного пускателя, в комплект которого входит контактор КМ, кнопочная станция, трехфазное тепловое реле КК и однофазное реле тока КА.

1.3. Составить принципиальную схему пуска в ход АД по заданию преподавателя для различных бригад:

- без тепловой и токовой защиты;
- с тепловой защитой;
- с токовой защитой;
- с тепловой, и токовой защитой.

1.4. Промаркировать участки силовой цепи и цепи управления заданной схемы и на отдельном листе нарисовать схему соединений (монтажную схему).

1.5. Собрать заданную схему, проверить запуск и выключение двигателя, а также работу защиты (если она задана).

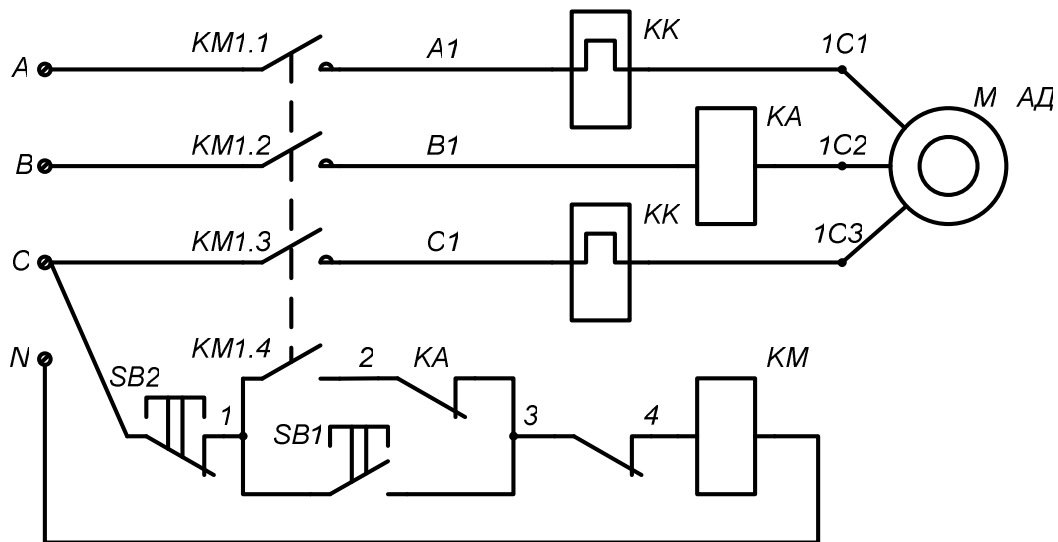


Рис. Схема включения асинхронного двигателя с помощью магнитного пускателя, снабженного тепловой токовой защитой

## 2. Оформление отчета

2.1. Отчет должен содержать принципиальную схему включения и выключения АД с помощью магнитного пускателя с маркировкой всех участков цепи.

2.2. Подробно описать работу электрических аппаратов при включении и выключении двигателя, а также при аварийных режимах.

2.3. Монтажная схема должна быть представлена на отдельном листе.

### Литература

Авдейко, В.П. Электростатика, электрические машины и аппараты: учеб.-метод. комплекс / В.П. Авдейко. – Новополюк: ПГУ, 2009. – С. 84 – 85, 250 – 252.

## 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.

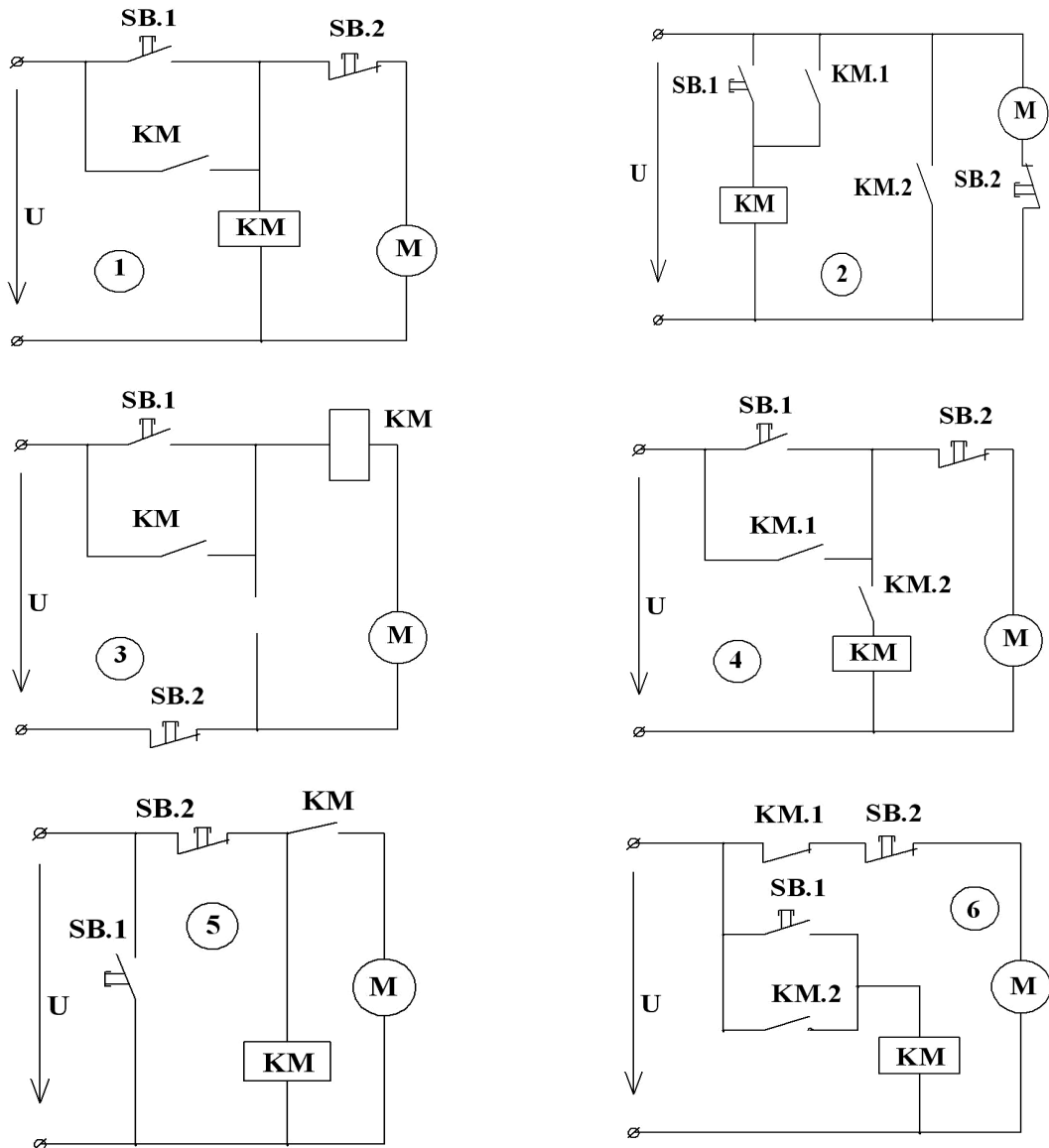


Рис. 8. Схемы для выполнения задания (см. также с. 253, 254)

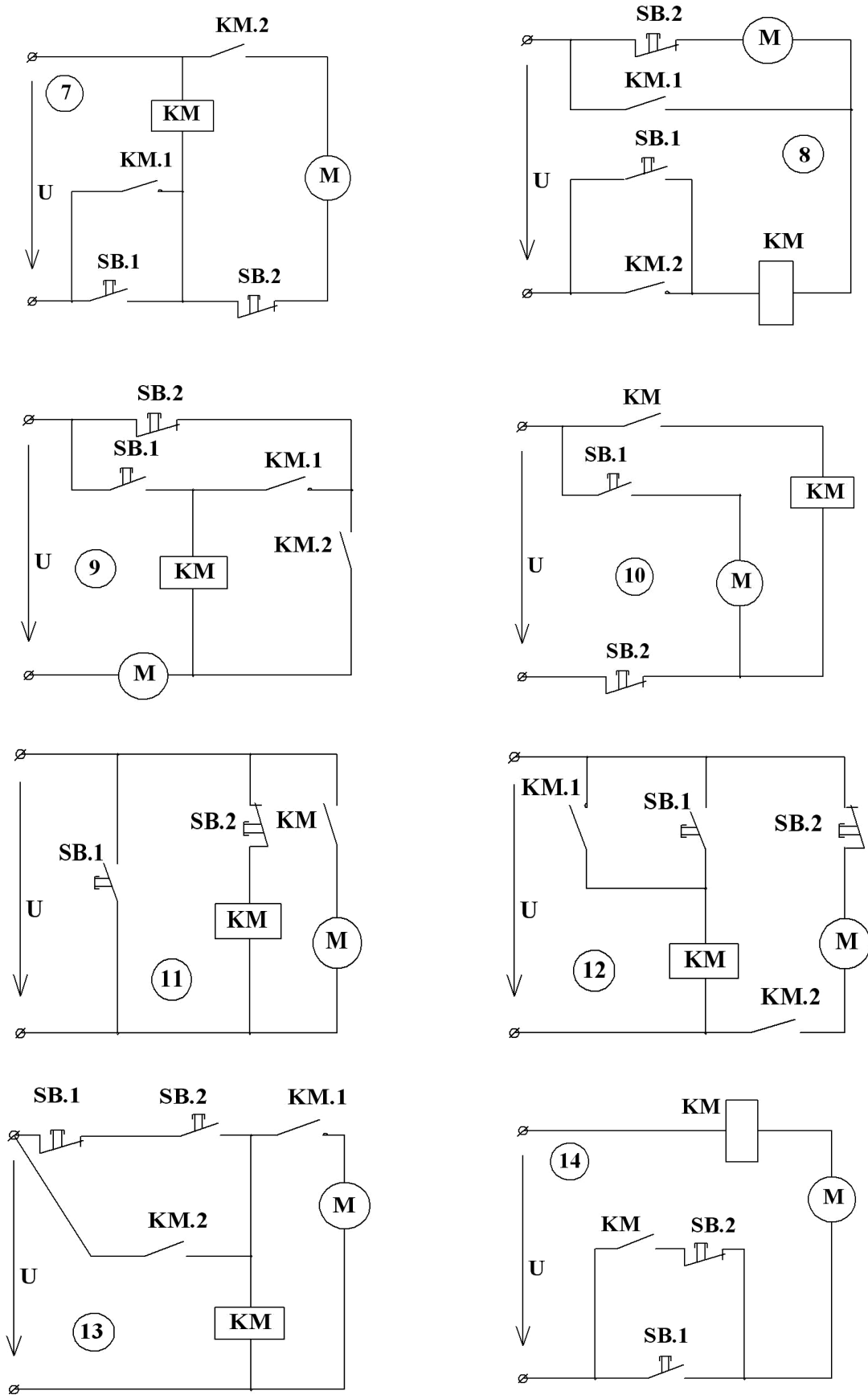


Рис. 8. Схемы для выполнения задания (продолжение)

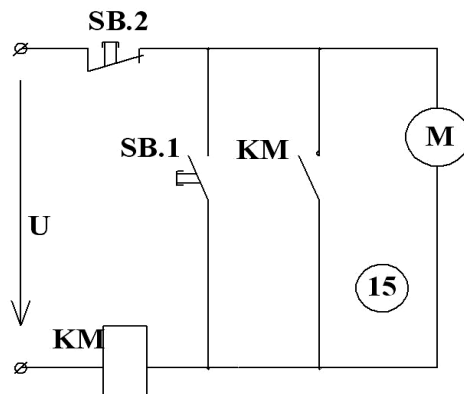


Рис. 8. Схемы для выполнения задания (окончание)

## Лабораторная работа № 9

### РЕВЕРСИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТРЕХФАЗНЫМ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ

**Цель работы:** изучить схему реверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором, получить практический опыт составления монтажной электрической схемы и ее сборки.

#### 1. Порядок проведения работы

- 1.1. Изучить схему реверсивного управления асинхронным двигателем.
- 1.2. Определить на стенде все аппараты, которые используются в данной работе.
- 1.3. Составить монтажную схему силовой части цепи и цепи управления.
- 1.4. Собрать монтажную схему и показать ее для проверки преподавателю.
- 1.5. Включить схему и проверить ее работоспособность.

#### 2. Оформление отчета

В отчете должны быть представлены:

- принципиальная схема управления трехфазным асинхронным двигателем;
- монтажная электрическая схема;
- подробное описание назначения схемы, работу электрической схемы при пуске, реверсе, остановки и аварийных режимах электродвигателя.

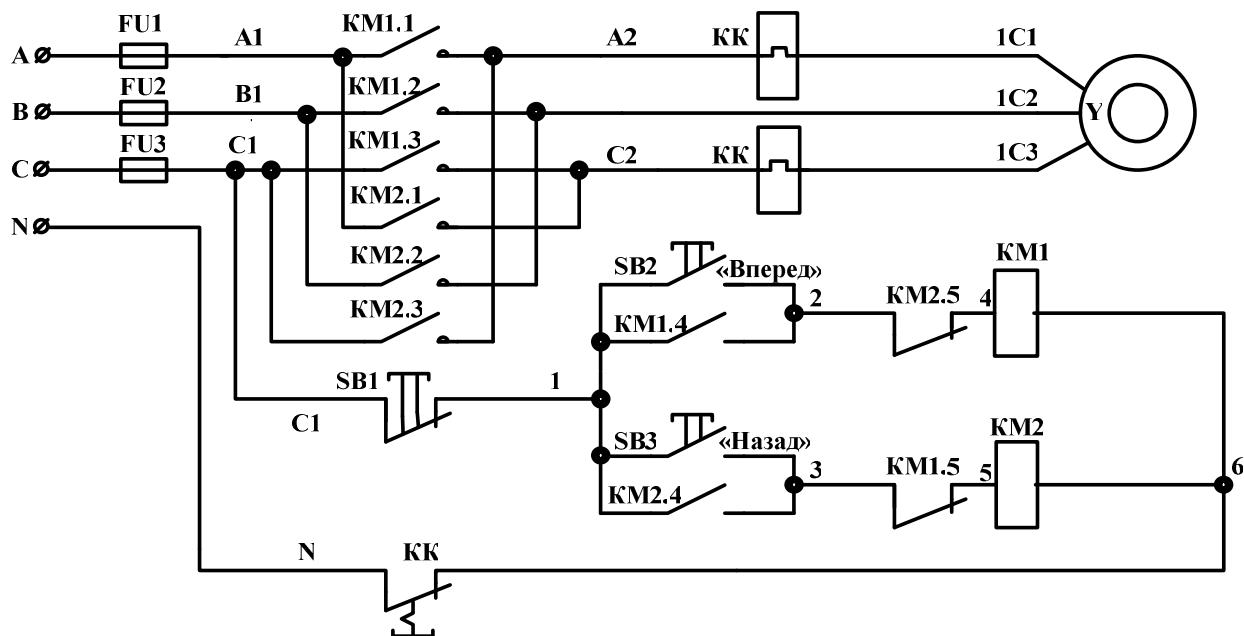


Рис. 1. Схема реверсивного управления трехфазным асинхронным двигателем

#### Литература

Иванов, А.А. Справочник по электротехнике / А.А. Иванов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Киев: Вища шк. Головное издательство, 1979. – С. 349.

### Контрольные вопросы

1. Каким способом можно изменить направление вращения двигателя?
2. Какую роль играют контакты КМ 1.4 и КМ 2.4 и как будет работать схема при их отсутствии?
3. Какую роль играют размыкающие контакты КМ 1.5 и КМ 2.5 и какой аварийный режим возможен при их отсутствии?
4. Что произойдет, если нажать на кнопку для осуществления реверса, если сохраняется еще предыдущее вращение?
5. Какими аппаратами осуществляется защита электродвигателя от перегрузки и короткого замыкания в данной схеме?

### Контрольное задание

Определить направление вращения асинхронного двигателя с помощью двух картинок магнитного поля, образованного токами в обмотках статора в заданный момент времени  $t_0 = TN/12$ , где  $N$  – номер варианта, и

через 1/12 часть периода  $T$  при прямом и обратном чередовании фаз. Данные варианта заданы таблицей.

Поменяли местами фазы	Угол, соответствующий заданному моменту времени											
	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
А и В	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
В и С	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
С и А	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36

### Пример выполнения задания

Для варианта  $N = 29$   $\alpha_0 = 150^0$  и  $\alpha_1 = 150^0 + 30^0 = 180^0$ .

На рис. 2 показана волновая диаграмма токов в обмотках статора электродвигателя. В обмотке с выводами С1-С4 течет ток  $i_a$ , С2-С5 –  $i_b$ , С3-С6 –  $i_c$ .

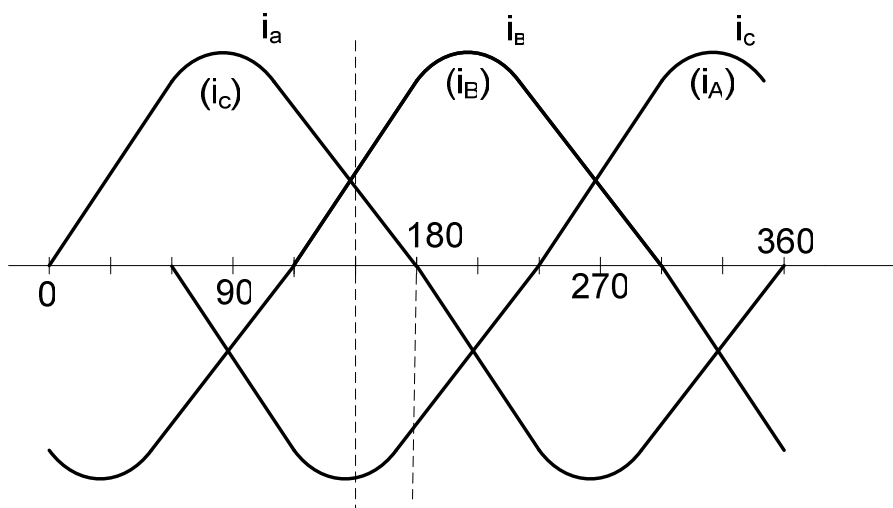


Рис. 2. Волновая диаграмма токов в обмотках статора электродвигателя

Условимся положительный ток считать входящим в начало обмотки (обозначить крестиком), а отрицательный ток выходит из начало обмотки (точкой). Покажем токораспределение в обмотках статора (рис. 3) в мо-



мент времени  $t_0$  и  $t_1$  при прямом чередовании фаз (А-В-С) и обратном (С-В-А), когда фазы А и С и соответственно токи  $i_a$  и  $i_c$  меняются местами (обозначены в скобках).

В момент времени, соответствующий углу  $\alpha = 150^\circ$  (см. рис. 2),  $i_a > 0$  (С1-С4•),  $i_b > 0$  (С2-С5•) и  $i_c < 0$  (С3•-С6). При таком токораспределении картина магнитного поля показана на рис. 3, а (направление магнитного потока на 11 ч).

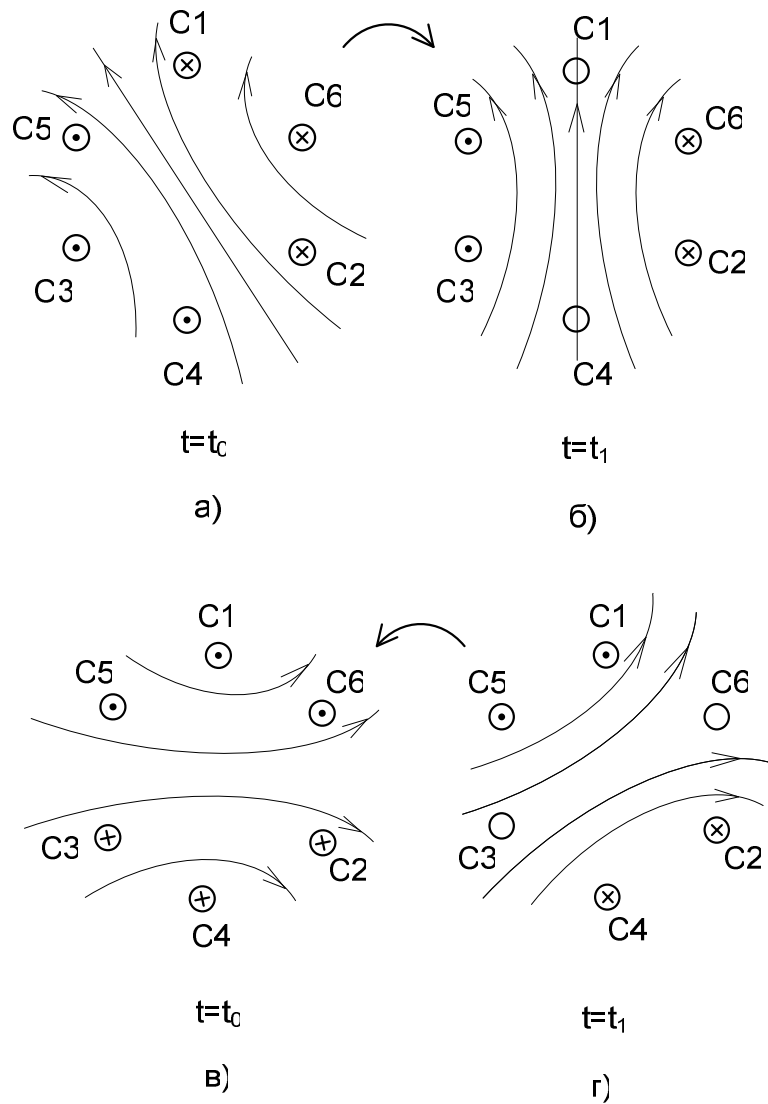


Рис. 3. Токораспределение в обмотках статора в различные моменты времени

В момент времени, соответствующий углу  $\alpha_1 = 180^\circ$ , ток  $i_a = 0$ ,  $i_b > 0$  (С2-С5•),  $i_c < 0$  (С3•-С5) (см. рис. 3, б). Магнитный поток направлен на 12 ч, т.е. поле вращается по часовой стрелке. Если поменять фазы С и А, то ток  $i_a$  станет током  $i_c$ , а ток  $i_c$  – током  $i_a$ .

Аналогичным образом рисуем картину магнитного поля для моментов времени  $t_0$  и  $t_1$  (углы  $\alpha_0$  и  $\alpha_1$ ) для обратного чередования фаз (см. рис. 3, в, г). При этом поле поворачивается против часовой стрелки.

Таким образом, на конкретном примере показано, что для изменения направления вращения асинхронного двигателя достаточно поменять местами любые две фазы питающего напряжения.

## Лабораторная работа № 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

**Цель работы:** исследовать зависимости частоты вращения, потребляемой мощности, КПД и коэффициента мощности от механической нагрузки асинхронного двигателя (АД).

#### 1. Порядок проведения работы

1.1. Собрать схему, изображенную на рис. 1. При этом и обмотки статора модели АД, и источник питания (вторичную обмотку трансформатора с фазным напряжением 21 В) соединить звездой. К этому же источнику питания с линейным напряжением 36 В (уточнить вольтметром) подсоединить треугольником три конденсатора емкостью по 20 мкФ. Амперметр должен измерять суммарный линейный ток и АД, и батареи конденсаторов.

Для создания механической нагрузки асинхронному двигателю вал АД жестко связан с валом модели синхронного генератора (СГ), обмотки статора которого, соединенные звездой, питают три лампочки, соединенные треугольником. Показания вольтметра, включенного на линейное напряжение СГ, пропорционально скорости вращения электрических машин.

1.2. Включить электродвигатель и после его разгона до скорости, соответствующей показанию вольтметра 12 В, измерить скорость ручным тахометром. Определить коэффициент  $K = n/U$ ,  $\frac{\text{об}}{\text{мин}}/\text{В}$ . Ориентировочно

$$K = 105 \frac{\text{об}}{\text{мин}}/\text{В}.$$

При определении коэффициента  $K$  учесть, что для маломощной модели двигателя тахометр будет представлять механическую нагрузку, в результате чего скорость и напряжение в конце измерения уменьшаются. По-

этому необходимо брать среднее значение напряжения до и после измерения. Оно будет несколько менее 12 В. Для более точного определения коэффициента  $K$  измерение выполнить 3 раза.

В дальнейшем скорость определять только по показанию вольтметра  $n = kU$ , об/мин.

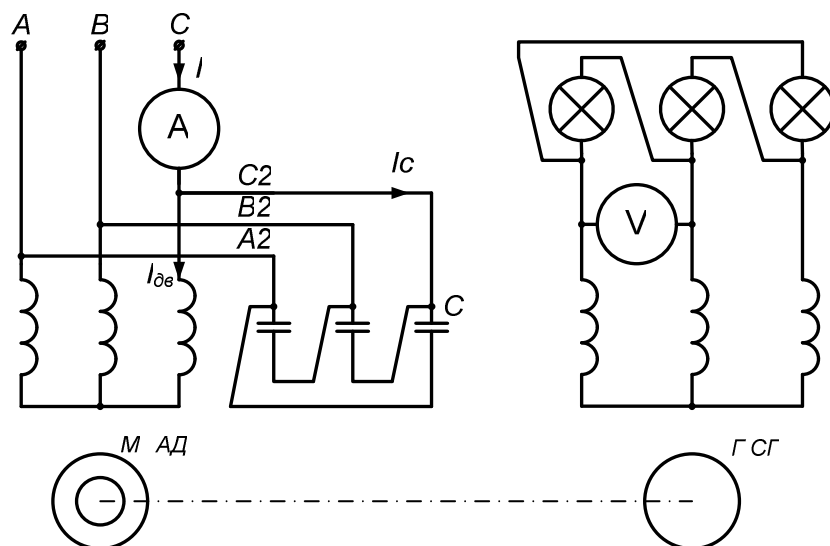


Рис. 1. Схема для исследования рабочих характеристик модели АД

1.3. Отключить электродвигатель и замерить линейный ток батареи конденсаторов. Сравнить его с расчетным значением

$$I_c = \sqrt{3} I_\phi = \sqrt{3} \frac{U_\phi}{X_c},$$

где  $U_\phi = U = 36$  В,  $X_c = \frac{1}{\omega c} = \frac{1}{314 \times 20 \times 10^{-6}} = 159$  Ом.

1.4. Изменяя электрическую нагрузку генератора и тем самым изменяя механическую нагрузку АД от холостого хода (все лампочки отключены) до максимального значения (все три лампочки включены), снять показания приборов и внести в таблицу.

В каждом из четырех опытов для определения тока только в асинхронном двигателе необходимо провод С2 пересоединить к другой клемме амперметра.

## 2. Обработка результатов измерений

2.1. Построить векторную диаграмму токов относительно фазного напряжения (рис. 2). Для этого отложить в произвольном направлении вектор фазного напряжения источника  $U_c$ . Вектор тока  $I_c$  будет опережать  $U_c$  на  $90^\circ$ . Общий ток  $\bar{I} \equiv \bar{I}_{\delta в} + \bar{I}_c$ .

$U = 37 \text{ В}$

Нагрузка	Измерено				Вычислено				
	$I$ , А	$I_{\text{дв}}$ , А	$I_c$ , А	$U$ , В	$\varphi_{\text{дв}}$ , град	$\cos \varphi_{\text{дв}}$	$P_{\text{эл}}$ , Вт	$n$ , об/мин	$S$ , %
Холостой ход									
Включена 1 лампа									
Включены 2 лампы									
Включены 3 лампы									

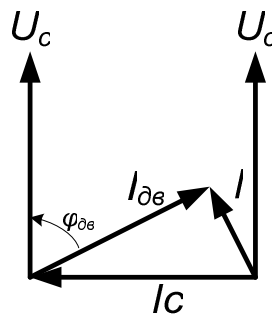


Рис. 2. Векторная диаграмма линейных потоков

Следовательно, для определения направления векторов  $I_{\text{дв}}$  и  $I$  необходимо от конца вектора  $I_c$  радиусом, равным длине вектора  $I_{\text{дв}}$ , провести дугу, а от начала вектора  $I_c$ , радиусом, равным длине вектора  $I$ , сделать засечку на этой дуге. Точка пересечения дуг определит концы векторов тока  $I_{\text{дв}}$  и  $I$ . По векторной диаграмме определяется  $\varphi_{\text{дв}}$  и коэффициент мощности  $\cos \varphi_{\text{дв}}$ . Векторную диаграмму токов построить в масштабе  $m_I = 5 \text{ мА/мм}$ .

2.2. Определить мощность  $P_{\text{эл}}$ , потребляемую АД из сети:

$$P_{\text{эл}} = \sqrt{3}UI_{\text{дв}} \cos \varphi_{\text{дв}}.$$

2.3. Определить скорость вращения двигателя при всех нагрузках, вероятную скорость вращения поля  $n_0$  и скольжение  $S$  в процентах.

2.4. Построить зависимости  $I_{\text{дв}}$ ,  $n$ ,  $P_{\text{эл}}$ ,  $\cos \varphi_{\text{дв}}$  и  $S$  в функции нагрузки. По оси абсцисс откладывать вместо мощности на валу двигателя количество включенных ламп (0, 1, 2, 3), что в первом приближении пропорционально нагрузке. В рабочем диапазоне изменения параметров выбрать следующие масштабы:  $m_I = 0,5 \text{ мА/мм}$ ;  $m_n = 20 \frac{\text{об/мин}}{\text{мм}}$ ;  $P = 50 \frac{\text{мВт}}{\text{мм}}$ ;

$$\cos \varphi = 0,001 \frac{1}{\text{мм}}; S = 1 \frac{\%}{\text{мм}}.$$

2.5. Проанализировать и письменно объяснить характер изменения рабочих характеристик электродвигателя.

#### Литература

Электротехника / под. ред. И.А. Федоровой. – Минск: Выш. шк., 1977. – С. 256 – 266.

### Контрольная задача

Асинхронный двигатель через редуктор поднимает груз весом  $Q$  со скоростью 0,2 м/с. Выбрать мощность двигателя из ряда: 1,1; 1,5; 1,9; 2,6; 3,3; 4,5 кВт Номинальные данные двигателя:  $n_n = 1400$  об/мин,  $\cos \varphi = 0,8$ ;  $M_{\max}/M_{\text{ном}} = 2$ ,  $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}} = 1,2$ . Зависимость КПД двигателя от мощности на валу определяется эмпирической формулой:  $\eta = \sqrt{0,57 \cdot P / P_H}$ . Коэффициент полезного действия редуктора – 0,85.

Определить линейный и фазный ток электродвигателя. Сможет ли двигатель поднять груз, больший в 1,5 раза? При этом считать, что при увеличении нагрузки скорость практически не уменьшается. Как изменится потребляемый ток и коэффициент мощности, если выбрать мощность двигателя на одну ступень выше расчетного значения?

Таблица данных по вариантам

Напряжение сети, В												Номинальное напряжение двигателя, В
127			220			380			660			
1	7	13	2	8	14							127/220
			3	9	15	4	10	16				220/380
						5	11	17	6	12	18	380/660
0,4	0,7	1	0,4	0,7	1	0,4	0,7	1	0,4	0,7	1	Вес $Q$ поднимаемого груза, т

### Лабораторная работа № 11

#### ПОВЫШЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ПРИ АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ НАГРУЗКЕ

**Цель работы:** ознакомиться со способами повышения коэффициента мощности в электроустановках с активно-индуктивной нагрузкой и научиться практически определять емкость конденсатора для этой цели.

## Теоретические сведения

Основным потребителем электроэнергии является асинхронный двигатель АД, который представляет активно-индуктивный характер нагрузки, когда фазный ток  $I_H$  АД отстает от своего фазного напряжения  $U_A$  на угол  $\varphi_H$  (рис. 1, б). Для трехфазного двигателя показана векторная диаграмма ВД одной фазы.

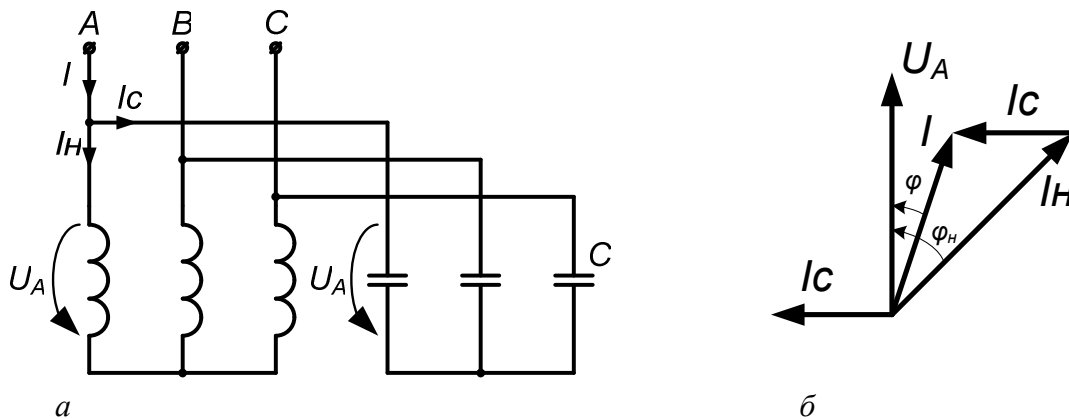


Рис. 1. Повышение  $\cos \varphi$  с помощью конденсатора:

а – схема включения асинхронного двигателя; б – векторная диаграмма токов

Если включить параллельно обмоткам статора конденсаторы, то ток  $I$  в линии не увеличивается, а уменьшается, т.к. ток  $I_C$  в конденсаторе опережает напряжение на  $90^\circ$ , а  $\bar{I} = \bar{I}_H + \bar{I}_C$ . При этом уменьшается и фазовый сдвиг между общим током  $I$  и напряжением  $U_A$ , повышается  $\cos \varphi$ .

Можно подобрать такой конденсатор, чтобы его ток был равен  $I_H \sin \varphi_H$ . При этом ток в линии будет минимальным, угол  $\varphi = 0$  и  $\cos \varphi = 1$ .

Так как ток с подключением конденсаторов в системе двигатель-конденсатор уменьшается, то уменьшаются потери в линии. Таким образом можно уменьшить сечение жилы кабеля, питающего эту нагрузку.

Поэтому коэффициент мощности  $\cos \varphi$  является важным энергетическим показателем для промышленных предприятий.

На практике кроме включения батареи конденсаторов для повышения  $\cos \varphi$  используют синхронный компенсатор – перевозбужденный синхронный двигатель в режиме холостого хода. Даже под нагрузкой перевозбужденный синхронный двигатель будет потреблять из сети опережающий ток и тем самым повышать  $\cos \varphi$ .

## 1. Порядок проведения работы

1.1. Собрать схему питания модели АД от трехфазного трансформатора и измерить ток, потребляемый двигателем. При этом и вторичные обмотки трансформатора, и статорные обмотки модели двигателя соединить звездой.

1.2. Отсоединить двигатель от сети, включить батарею конденсаторов, соединив ее вначале звездой, и измерить линейный ток  $I_c$ , а затем треугольником, и измерить также линейный ток  $I_c^\Delta$ .

1.3. Включить электродвигатель и конденсаторы совместно, измерить общий ток  $I$ , потребляемый установкой при соединении конденсаторов вначале звездой, а затем треугольником.

Данные измерений внести в таблицу. Измерения с включением двигателя производить после его полного разгона.

Нагрузка	Соединение конденсатора	Измерено			Вычислено									
					до компенсации					после компенсации				
		$I_n,$ А	$I_c,$ А	$I,$ А	$\Phi_n,$ град	$\cos \Phi_n$	$P_n,$ Вт	$Q_n,$ вар	$S_n,$ ВА	$\Phi_n,$ град	$\cos \Phi_n$	$P,$ Вт	$Q,$ вар	$S,$ ВА
Модель асинхронного двигателя	Y													
	$\Delta$													
Реальный асинхронный двигатель	Y													
	$\Delta$													

1.4. Повторить измерения по п. 1.1, 1.2 и 1.3 с включением реального двигателя.

## 2. Обработка результатов измерений

2.1. Построить четыре ВД токов относительно фазного напряжения: две для модели АД при соединении конденсаторов звездой и треугольником и две для реального асинхронного двигателя.

Определить графически сдвиг фаз напряжения относительно тока нагрузки  $\varphi_n$  и относительно общего тока  $\varphi$ ,  $\cos \varphi$ , активную, реактивную и полную мощности установки до и после компенсации реактивной мощности.

2.2. Определить емкость конденсатора для полной компенсации реактивной мощности, при которой  $\varphi = 0$  и  $\cos \varphi = 1$ , для модели АД и реального электродвигателя.

## 3. Методические указания

Для определения фазовых сдвигов  $\varphi_n$  и  $\varphi$  необходимо произвольно, например, вертикально, в масштабе отложить вектор напряжения и горизонтально влево вектор тока конденсатора. Из конца вектора  $I_c$  радиусом  $I$  сделать вторую засечку. Пересечение этих дуг определит фазовые сдвиги  $\varphi_n$  и  $\varphi$ . Действительно,  $\bar{I} = \bar{I}_n + \bar{I}_c$ . Мощность трехфазной цепи  $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$ , где  $U$  и  $I$  – линейные значения тока и напряжения  $Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$ ,  $S = \sqrt{3}UI$ .

В соответствии с ВД (рис. 1, б), чтобы  $\varphi = 0$  ( $\cos \varphi = 1$ ) необходимо, чтобы линейный ток батареи конденсаторов  $I_c$  был равен реактивной составляющей тока нагрузки  $I_n \sin \varphi_n$ . При этом сопротивление конденсатора

$X_c = \frac{U_\phi}{I_{c\phi}}$ , где  $I_{c\phi}$  – ток, проходящий через конденсатор.

(При соединении звездой  $U_\phi = U / \sqrt{3}$ , а  $I_{c\phi} = I_c$ .

При соединении треугольником  $U_\phi = U$ , а  $I_{c\phi} = I_c / \sqrt{3}$ .)

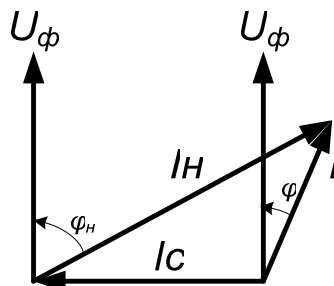


Рис. 2. Векторная диаграмма



Легко видеть, что при соединении треугольником сопротивление конденсатора должно быть в 3 раза больше, чем в батарее, соединенной звездой. Следовательно, емкость конденсатора  $C = 1/\omega X_c$  при соединении батареи треугольником будет в 3 раза меньше. Казалось бы, что всегда выгодно соединять конденсаторы треугольником. Но эти конденсаторы должны быть рассчитаны на амплитудное линейное напряжение  $\sqrt{2}U$ , в то время как конденсатор, соединенный звездой, должен быть рассчитан на амплитудное фазное напряжение, которое в  $\sqrt{3}$  раз меньше линейного. Естественно, увеличение допустимого пробивного напряжения связано с увеличением габаритов и стоимости конденсатора. Какую схему включения конденсаторов предпочесть, определяет технико-экономический расчет.

#### Литература

Авдейко, В.П. Электростатика, электрические машины и аппараты: учеб.-метод. комплекс / В.П. Авдейко. – Новополюк: ПГУ, 2009. – С.55 – 56.

#### Контрольная задача

Асинхронный электродвигатель, включенный в трехфазную сеть напряжением  $U$ , развивает мощность  $P = 0,2 \cdot (N + 15)$  кВт ( $N$  – номер варианта) при  $\cos \varphi = 0,8$  и  $\eta = 0,7$ . Нарисовать развернутую схему включения электродвигателя и включенной параллельно ему батареи конденсаторов для повышения коэффициента мощности до 1. Показать на схеме условные направления линейных и фазных токов, фазных напряжений электродвигателя и батареи конденсаторов и подписать на ней их числовые значения. Определить емкость батареи, на которую должны быть рассчитаны конденсаторы. Числовые данные 12-ти вариантов взять из таблицы.

Таблица вариантов

Напряжение сети	127	220		380		660
Конденсаторы включены Y (звездой)	1	3	5	7	9	11
Конденсаторы включены Δ (треугольником)	2	4	6	8	10	12
Напряжение электродвигателя	127/220		220/380		380/660	

#### Подсказка

Линейный ток, потребляемый двигателем, независимо от схемы соединения обмоток определяется по формуле  $P = \sqrt{3}UI \cos \varphi \cdot \eta$ , где  $P$  – ме-

ханическая мощность на валу,  $U$  и  $I$  – линейные значения напряжения сети и тока электродвигателя.

Линейный ток сдвинут относительно соответствующего фазного напряжения электродвигателя на угол  $\varphi$ .

Для повышения коэффициента мощности системы электродвигатель-конденсатор до единицы линейный ток батареи конденсаторов должен быть равен реактивной составляющей линейного тока электродвигателя  $I_p = I \sin \varphi$ .

Реактивное сопротивление одной фазы батареи  $X_c = U_\phi / I_\phi$ .

(При соединении конденсаторов звездой  $U_\phi = U / \sqrt{3}$ , а  $I_\phi = I_p$ .

При соединении конденсаторов треугольником  $U_\phi = U$ , а  $I_\phi = I_p / \sqrt{3}$ ).

Емкость одной фазы батареи конденсаторов определяется по формуле  $X_c = 1/\omega c$ , где  $\omega = 2\pi f$ . Частота тока сети  $f = 50$  Гц.

При выборе номинального напряжения конденсатора учесть, что оно выбирается не по действующему, а по амплитудному напряжению.

## Лабораторная работа № 12

### ВКЛЮЧЕНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ОДНОФАЗНУЮ СЕТЬ

**Цель работы:** изучить схемы включения двигателя в однофазную сеть, научиться подбирать конденсатор для той или иной схемы его подключения и проверять их работоспособность.

#### Теоретические сведения

Как известно, работа двигателей переменного тока основана на создании вращающегося магнитного ВМП, создаваемого токами обмоток статора. Для создания ВМП необходимо, чтобы обмотки статора были смещены в пространстве и по ним должен проходить ток, сдвинутый во времени. Круговое ВМП, т.е. поле, постоянное по величине и вращающееся с постоянной угловой скоростью, в двухфазной системе токов получается, если обмотки статора сдвинуты в пространстве на  $90^\circ$ , а по нему протекает одинаковый ток, но сдвинутый во времени на четверть периода. В трехфазной системе токов обмотки должны быть сдвинуты в пространстве на  $120^\circ$ , а токи во времени – на одну треть периода. Если эти условия не соблюдены, то и магнитный поток, и скорость вращения поля будут иметь сложную зависимость от времени, что связано с дополнительными потерями в двигателе и его перегревом.

Это приводит к тому, что необходимо заметно уменьшить механическую нагрузку двигателя, чтобы предотвратить его перегрев. Иначе говоря, номинальная мощность двигателя снижается на 40 – 50 %.

В трехфазных и двухфазных асинхронных двигателях первое условие создания ВМП соблюдено. Обмотки статора в двухфазных двигателях взаимно перпендикулярны, а в трехфазных двигателях они расположены под углом 120 электрических градусов.

Если эти двигатели питать от однофазной сети, то второе условие (смещение токов во времени на четверть периода в двухфазной системе токов и на треть периода в трехфазной системе токов) трудновыполнимо. Обычно сдвиг по фазе этих токов осуществляется включением конденсатора в ту или иную цепь, и реже – активного сопротивления. При этом стремятся использовать такую схему включения и подобрать такой конденсатор, чтобы в рабочем режиме вращающееся магнитное поле приближалось к круговому, а при пуске создавался наибольший пусковой момент.

Большинство двигателей рассчитаны на номинальное напряжение  $\Delta/Y$  220/380, которые в однофазном режиме включают на напряжение 220 В. Если асинхронный двигатель имеет три вывода и его обмотки, как правило, соединены звездой, то удовлетворительной схемы включения двигателя в однофазную сеть напряжением 220В нет.

Если для подключения трехфазного асинхронного двигателя располагают шестью выводами, то наибольшее распространение получили две схемы (рис. 1, а и б).

Наиболее благоприятный режим работы двигателя соответствует экспериментально установленной рабочей емкости для схемы (рис. 1, а)  $C = 4800 I_{\phi}/U_{\phi}$  мкФ, где  $I_{\phi}$  и  $U_{\phi}$  – фазный ток и напряжение двигателя трехфазного режима. Во второй схеме (рис. 1, б) емкости необходимо подбирать экспериментально.

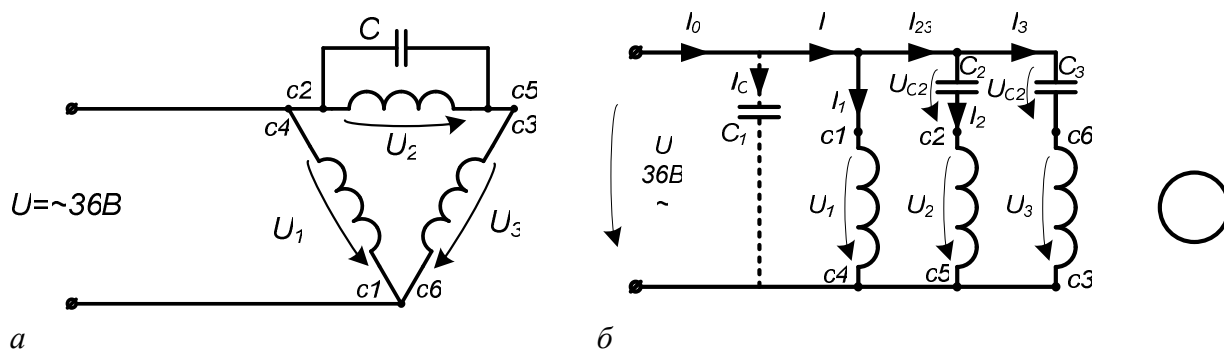


Рис. 1. Включение трехфазного асинхронного двигателя, рассчитанного на напряжение  $\Delta/Y$  220/380 в однофазную сеть 220 В

## 1. Порядок проведения работы

1.1. Собрать схему (рис. 1, б), для чего подключить к гнездам переходной колодки обмотки статора асинхронного двигателя и конденсатора по схеме соединений (рис. 2). Емкости конденсаторов  $C_1 = C_2 = C_3 = 20 \text{ мкФ}$ .

1.2. Включить модель асинхронного двигателя в сеть положением 38 В и измерить все токи и напряжения указанные в таблице. Для измерения тока  $I_0$  отсоединить провод 1-2 и в эти гнезда включить амперметр; для измерения тока  $I_c$  – провод 1-8,  $I$  – 1-3,  $I_1$  – 2-7,  $I_{2,3}$  – 1-5,  $I_2$  – 3-2,  $I_3$  – 4-2.

После каждого измерения отсоединяемый провод снова подсоединить к своим гнездам.

Для измерения напряжений достаточно проводами от вольтметра прикоснуться к оголенным частям штекеров, вставленных в соответствующие гнезда. Нагрузку АД создать синхронным генератором, в фазу которого подключить миниатюрную лампочку.

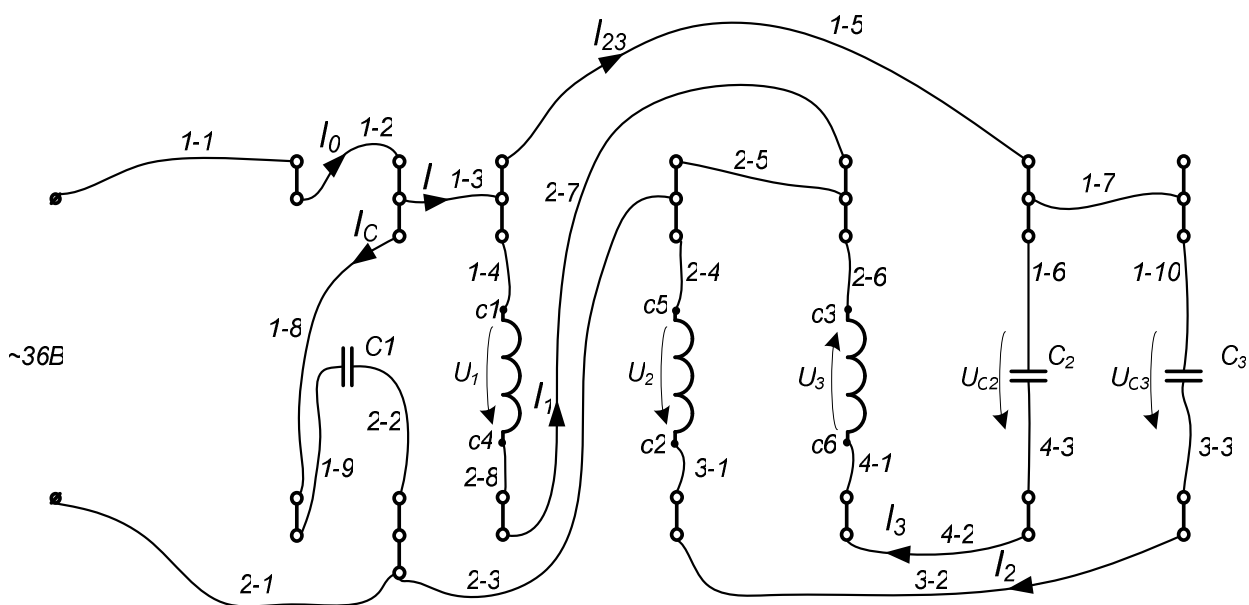


Рис. 2. Рабочая схема соединений.

Таблица

Режим работы	$I_0$ (А)	$I_c$ (А)	$I$ (А)	$I_{23}$ (А)	$I_1$ (А)	$I_2$ (А)	$I_3$ (А)	$U_1$ (В)	$U_2$ (В)	$U_3$ (В)	$U_{C2}$ (В)	$U_{C3}$ (В)
Нагрузочный												

## 2. Обработка результатов измерений

2.1. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

2.2. По форме звезды фазных токов в обмотках сделать вывод о качестве вращающегося магнитного поля.

### 3. Методические указания

При построении векторной диаграммы выбрать масштабы:

$$m_I = 0,01 \text{ А/мм}, m_U = 0,5 \text{ В/мм}.$$

Вначале откладываем вектор напряжения  $U = U_1 \sim 36 \text{ В}$  в произвольном направлении, например, вертикально вверх. Затем строим вектор тока вспомогательного конденсатора  $I_c$ , который опережает вектор напряжения  $U$  на  $90^\circ$ .

Для определения направления векторов  $\bar{I}_0$  и  $\bar{I}$  воспользуемся уравнением  $\bar{I}_0 = \bar{I}_c + \bar{I}$ . Из конца вектора  $\bar{I}_c$  радиусом, равным  $\bar{I}$ , проводим дугу, а из начала вектора  $\bar{I}_c$  радиусом  $\bar{I}_0$  делаем засечку на дуге. Точка пересечения определит начало вектора  $\bar{I}$  и конец вектора  $\bar{I}_0$ .

Аналогично определяется направление векторов  $\bar{I}_{23}$  и  $\bar{I}_1$ .  $\bar{I} = \bar{I}_{23} + \bar{I}_1$ . Из начала вектора  $\bar{I}$  проводим дугу радиусом  $\bar{I}_{23}$ , а из конца  $\bar{I}_1$ . Вектор  $\bar{I}_1$  должен отставать от вектора  $\bar{U}$  ориентировочно на  $70^\circ$ . По направлению вектора  $\bar{I}_{23}$  таким же образом определяется направление векторов  $\bar{I}_2$  и  $\bar{I}_3$  в соответствии с уравнением  $\bar{I}_{23} = \bar{I}_2 + \bar{I}_3$ .

Построением таких же треугольников определяются направление векторов  $\bar{U}_{c2}$ ,  $\bar{U}_2$ ,  $\bar{U}_{c3}$ ,  $\bar{U}_3$ , если воспользоваться уравнениями:  $\bar{U} = \bar{U}_{c2} + \bar{U}_2$  и  $\bar{U} = \bar{U}_{c3} + \bar{U}_3$ .

Правильность определения направления токов  $\bar{I}_2$  и  $\bar{I}_3$  можно проверить по направлению векторов  $\bar{U}_{c2}$  и  $\bar{U}_{c3}$ , которые должны отставать от соответствующих токов на  $90^\circ$ . Из-за погрешности измерений эти углы могут отличаться от  $90^\circ$ .

Чтобы построить звезду фазных токов  $\bar{I}_1$ ,  $\bar{I}_2$ ,  $\bar{I}_3$  необходимо изменить направление вектора  $\bar{I}_3$  на  $180^\circ$ , т.к. ток  $I_2$  входит не в начало обмотки С3, а в конец С6.

Направление токов  $I_1$ ,  $I_2$  следует сохранить, поскольку эти токи входят в начало обмоток С1 и С2.

О качестве вращающегося магнитного поля можно судить по форме звезды фазных токов, а следовательно, и магнитных потоков, создаваемых этими токами. Напомним, что идеальное, круговое ВМП создается равными токами, сдвинутыми в пространстве на  $120^\circ$ .

## Литература

Китунович, Ф.Г. Электротехника / Ф.Г. Китунович. – 3-е изд., перераб. и доп. – Минск: Выш. шк., 1991. – С. 263 – 269.

### Лабораторная работа № 13

## АВТОМАТИЧЕСКОЕ УПРАВЛЕНИЕ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В ФУНКЦИИ ПУТИ И ВРЕМЕНИ

**Цель работы:** ознакомиться с принципом автоматического управления асинхронным двигателем, где управляющими органами являются путевые переключатели и реле времени.

### 1. Описание установки

Установка состоит из силовой части и аппаратуры управления. Силовая часть установки включает в себя асинхронный электродвигатель, редуктор и длинный винт с гайкой, которая является управляющим рабочим органом РО. В зависимости от направления вращения двигателя РО перемещается или влево, или вправо.

Аппаратура управления смонтирована в стенде, на лицевую панель которой выведены все клеммы контактов и обмоток аппаратов управления, включая путевые переключатели, расположенные вдоль длинного винта. Аппаратура управления и силовая часть установки связана между собой контрольным кабелем.

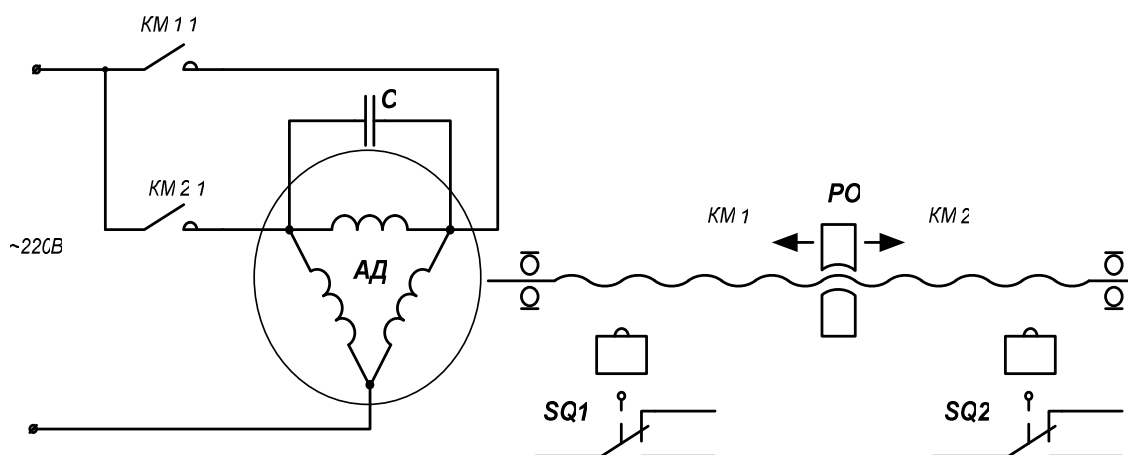


Рис. 1. Силовая часть установки

На рисунке показана силовая часть установки. Электрическая схема питания электродвигателя собрана. Трехфазный асинхронный двигатель АД работает от однофазной сети, при этом его обмотки соединены треугольником, а параллельно одной из обмоток включен конденсатор. При срабатывании контактора КМ1 и замыкании контакта КМ1.1 двигатель перемещает РО влево к путевому переключателю SQ1, а при включении КМ2 двигатель реверсируется и перемещает РО вправо к SQ2.

В исходном положении РО установлен посередине, между SQ1 и SQ2. Время перемещения РО от SQ1 к SQ2 (или обратно) равно 20 с. Реле времени создает выдержку времени, равную 5 с.

## 2. Рабочее задание

2.1. По заданной схеме управления движением РО описать работу электрической схемы от момента нажатия на кнопку «Пуск» до остановки двигателя.

2.2. Показать траекторию движения РО с обозначением времени движения на каждом участке. Временную остановку двигателя в течение 5 с обозначить на траектории кружком. Определить общее время цикла.

2.3. Составить временную диаграмму включения всех аппаратов за время цикла.

## 3. Пример выполнения задания

Заданная схема управления показана на рис. 2.

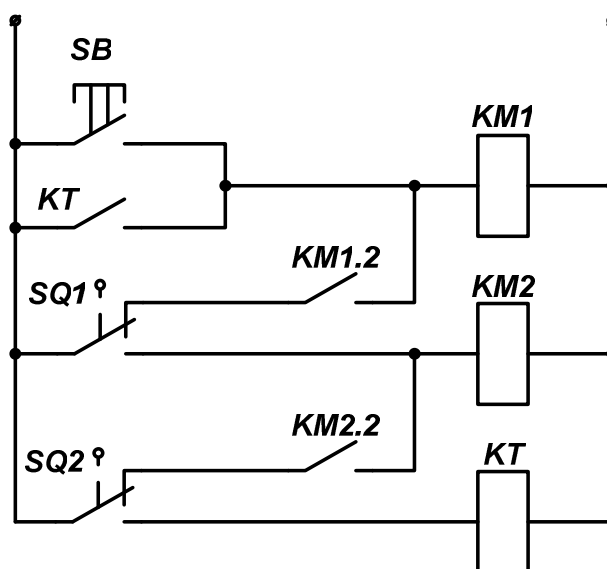


Рис. 2. Схема управления

При нажатии на кнопку SB «Пуск» получает питание катушка контактора КМ1. При срабатывании контактора замыкается контакт КМ1.1 в силовой цепи, и двигатель, вращая винт, перемещает РО влево. Вторым контактом КМ1.2 включают катушку КМ1 на самопитание. Таким образом, кнопку SB можно отпустить, т.к. катушка КМ1 будет питаться через замкнутый контакт SQ1 и замкнувшийся контакт КМ1.2.

Когда РО подойдет к путевому переключателю SQ1 (через 10 с), срабатывает SQ1, разрывая цепь питания обмотки КМ1 и включая обмотку контактора КМ2. При этом замыкается контакт КМ2.1 и размыкается (приходит в исходное положение) контакт КМ1.1. Двигатель реверсируется, и рабочий орган будет перемещаться вправо. Контакт КМ2.2 включает свою обмотку на самопитание через замкнутый контакт SQ2. Как только РО отойдет от SQ1, его контакт примет исходное положение, но это не вызовет срабатывание контактора КМ1, т.к. его контакт КМ1.2 находится в разомкнутом положении.

При достижении РО путевого переключателя SQ2, его контакт отключает обмотку КМ2 и включает обмотку реле времени КТ. Контакт КМ2.1 размыкается, двигатель останавливается. Через 5 с замыкается контакт КТ, который шунтирует кнопку SB «Пуск». При этом включается контактор КМ1, двигатель обрабатывает движение РО влево, и работа схемы повторяется.

На рис. 3 показана траектория движения РО.

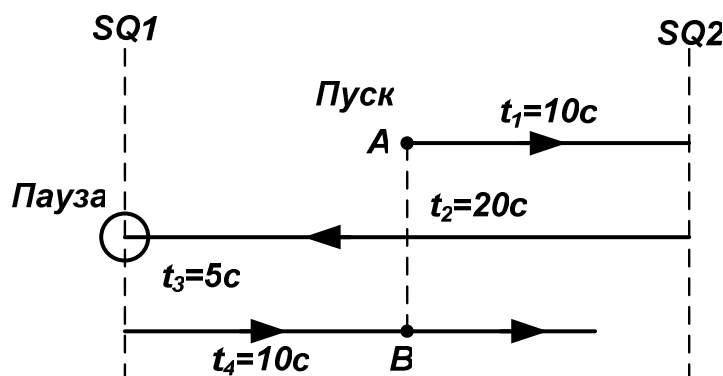


Рис. 3. Траектория движения рабочего органа

Время цикла  $T=t_1+t_2+t_3+t_4=10+20+5+10=45$  с.

**Примечание:**

Так как в данном примере двигатель не останавливается, то время цикла определяется от момента пуска (точка А) до точки В (положение РО, соответствующее моменту пуска).



На рис. 4 жирной линией показано время включенного состояния того или иного аппарата и двигателя.

В отчете должны быть представлены все четыре рисунка и подробное описание работы схемы управления.

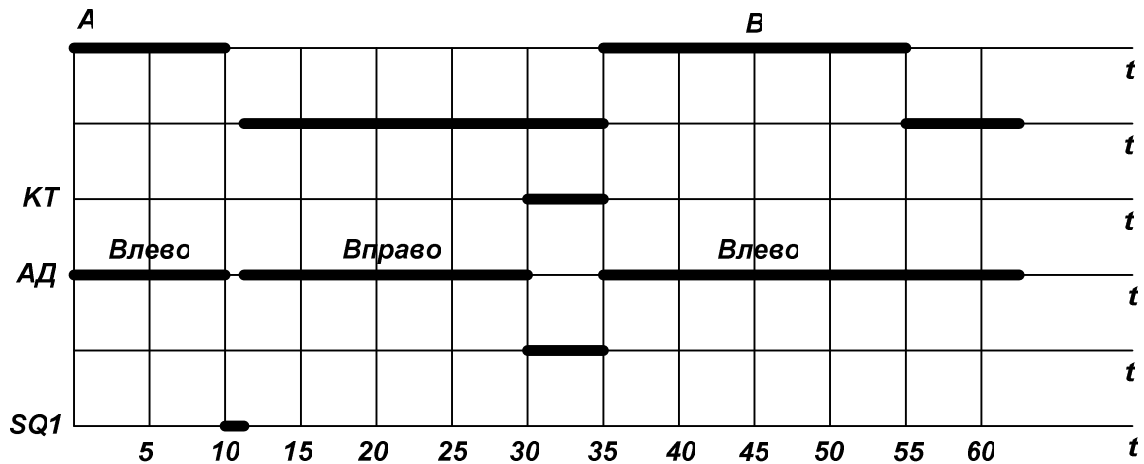


Рис. 4. Временная диаграмма срабатывания аппаратуры управления и асинхронного двигателя.

### Контрольное задание

Объяснить работу принципиальной схемы управления асинхронного электропривода, показать траекторию движения рабочего органа и определить время работы привода от момента пуска до остановки.

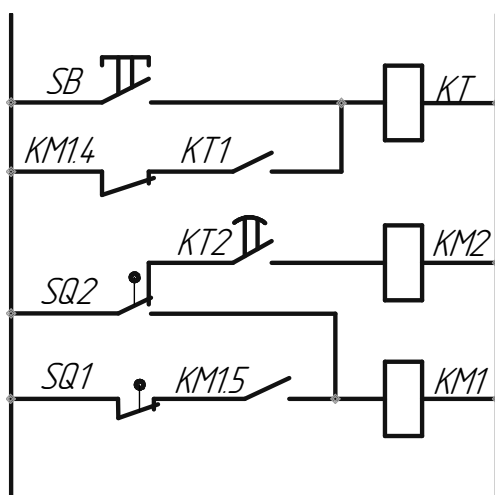


Схема 1

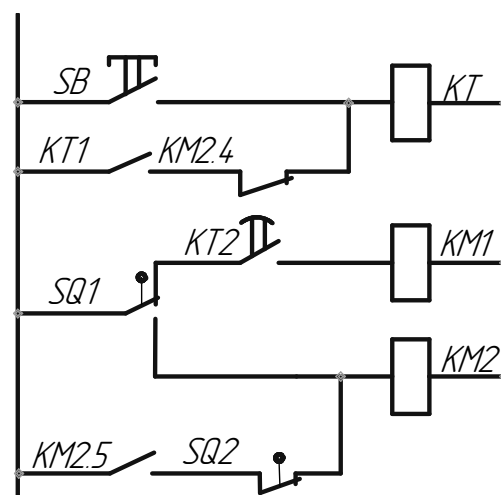


Схема 2

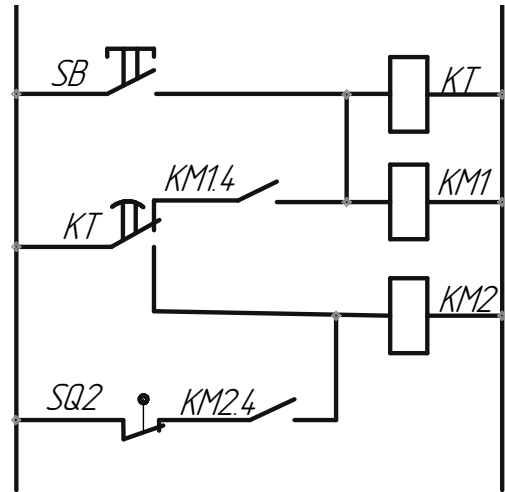
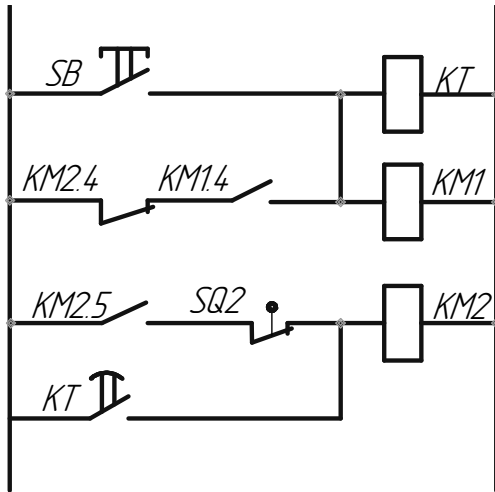


Схема 3

Схема 4

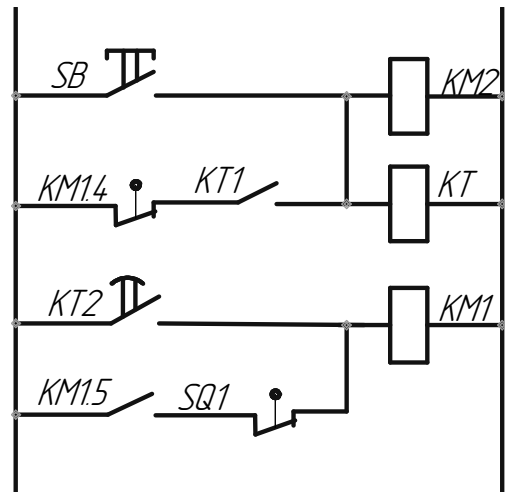
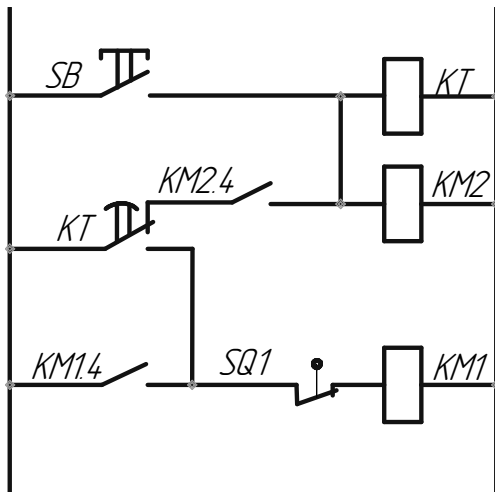


Схема 5

Схема 6

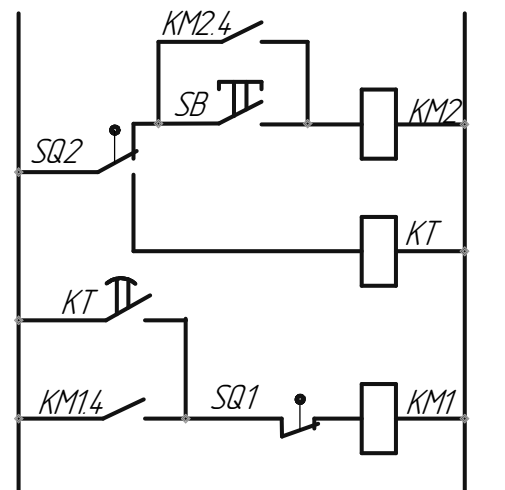
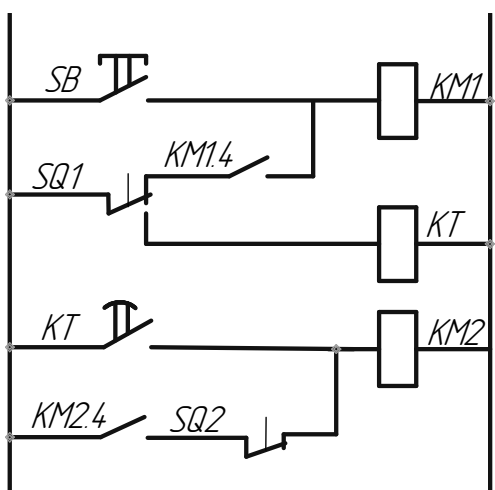


Схема 7

Схема 8

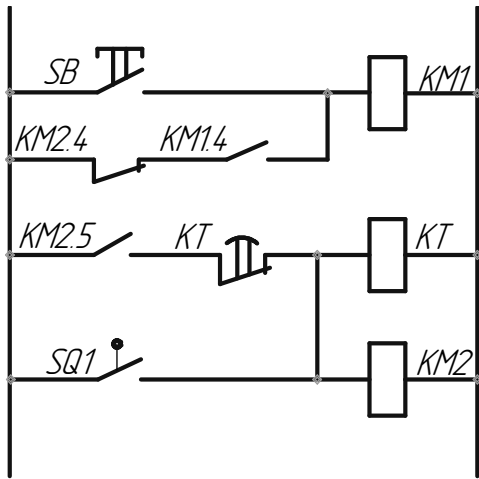


Схема 9

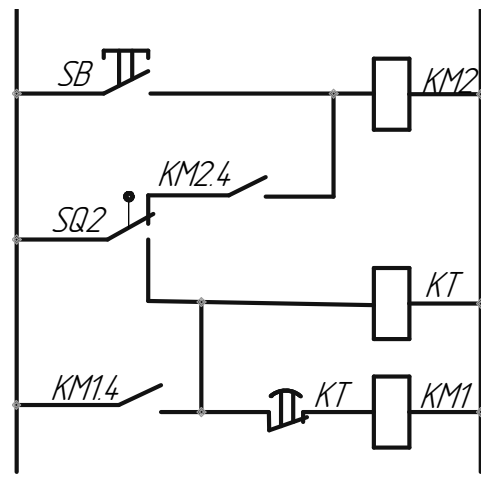


Схема 10

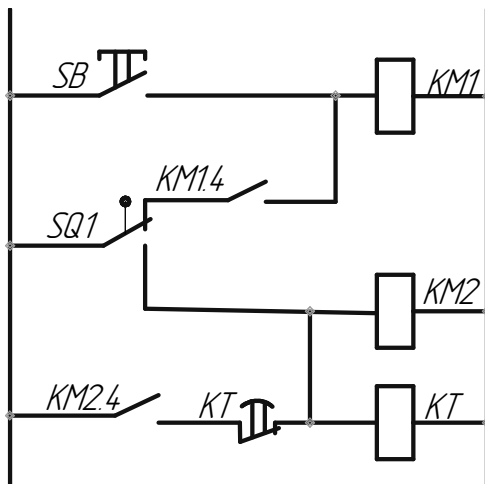


Схема 11

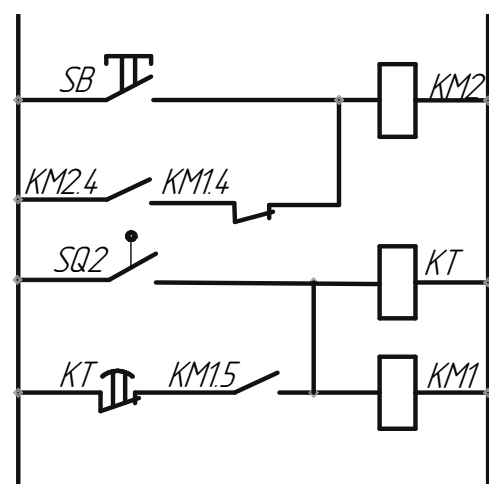


Схема 12

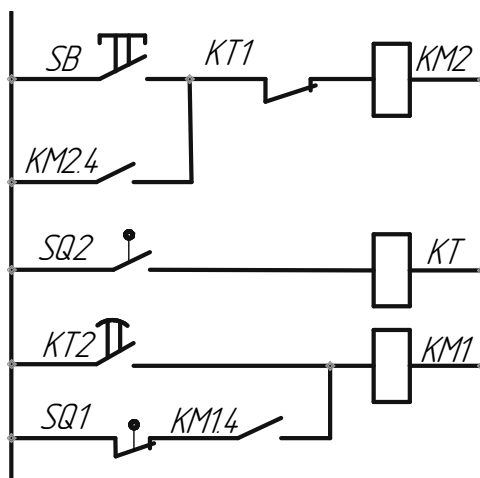


Схема 13

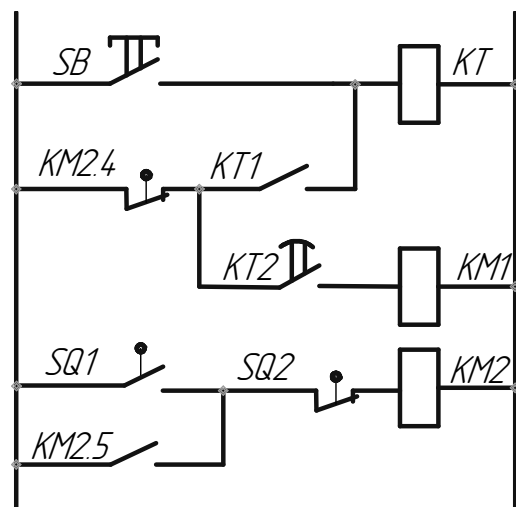


Схема 14

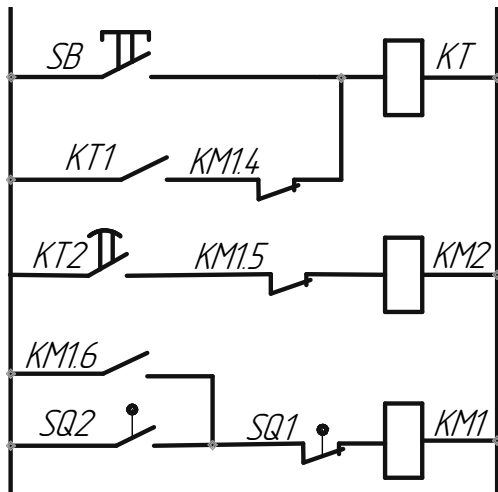


Схема 15

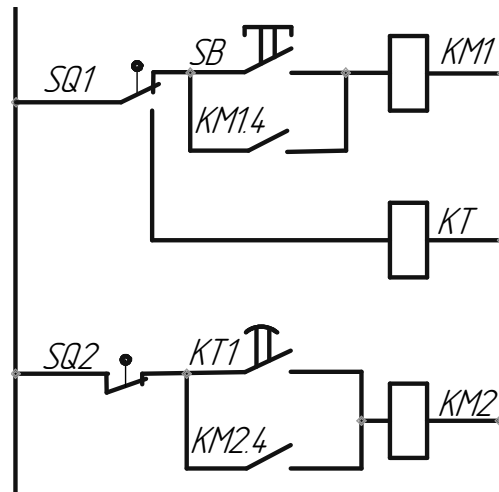


Схема 16

## Лабораторная работа № 14

### РАЗРАБОТКА СХЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ДВИГАТЕЛЕМ В ФУНКЦИИ ПУТИ И ВРЕМЕНИ

**Цель работы:** разработать электрическую схему управления асинхронным двигателем с использованием путевых переключателей и реле времени по заданной программе.

#### 1. Рабочее задание

1.1. По заданному варианту разработать электрическую схему управления асинхронного электропривода в соответствии с имеющейся на стенде и установке аппаратурой управления.

1.2. Разработать монтажную схему управления.

1.3. Собрать схему управления и убедиться в правильности разработанной схемы.

#### 2. Код программы и аппаратура управления

Код программы задается тремя знаками. Цифры 1 и 2 означают движение рабочего органа соответственно влево и вправо до путевых переключателей. Цифра 0 означает паузу или остановку движения на 5 с, 10 и 20 – движение РО соответственно влево и вправо в течение 5 с (а не до путевых переключателей).

Например, в четвертом варианте программа 10-2 означает, что после нажатия на кнопку «Пуск» рабочий орган должен перемещаться влево в

течение 5 с (цифра 10), затем двигатель реверсируется, РО перемещается вправо до путевого переключателя SQ2 (цифра 2) и, достигнув его, РО должен остановиться.

#### Варианты задания

1	2	3	4	5	6	7	8
0-1-2	1-0-2	1-20	10-2	0-2-1	2-0-1	2-10	20-1

В стенде смонтированы следующие аппараты: два контактора, реле времени, промежуточное реле и кнопка «Пуск». Все клеммы контактов и обмоток аппаратов выведены на лицевую панель в виде гнезд. Большинство клемм имеют по два гнезда.

Кроме того, на лицевую панель выведены контакты путевых переключателей, находящихся на силовой установке, через разъемы и контрольный кабель. Питание цепи управления осуществляется источником с напряжением постоянного тока 24 В. Контрольная лампочка служит для проверки правильности сборки схемы. С ее помощью можно определить наличие потенциала в той или иной точке схемы.

В отчете должны быть представлены принципиальная и монтажная схемы с подробным описанием работы электрической части.

#### Литература

Авдейко, В.П. Электростатика, электрические машины и аппараты: учеб.-метод. комплекс / В.П. Авдейко. – Новополоцк: ПГУ, 2009.

# 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.

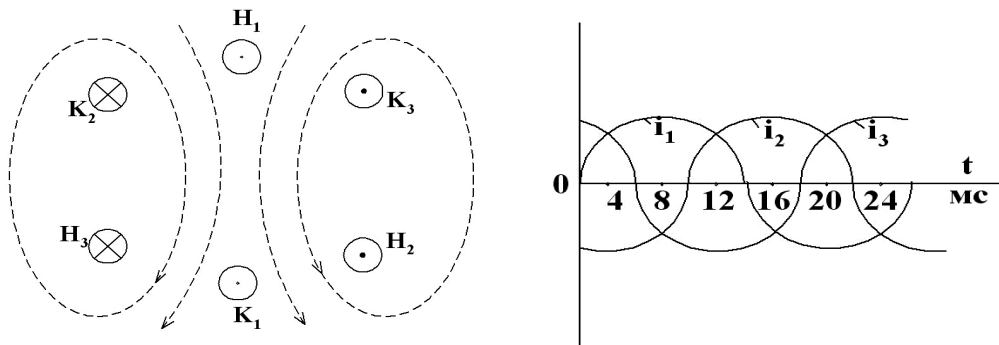


Рис. 1

*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

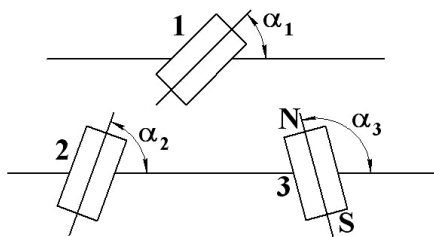


Рис. 2

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).

Вначале все бруски установили в положение, соответствующее заданным углам  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ , 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 вариантов

Постоянный магнит	$\alpha_1$					
	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  $\delta$  (рис. 3, табл. 2).

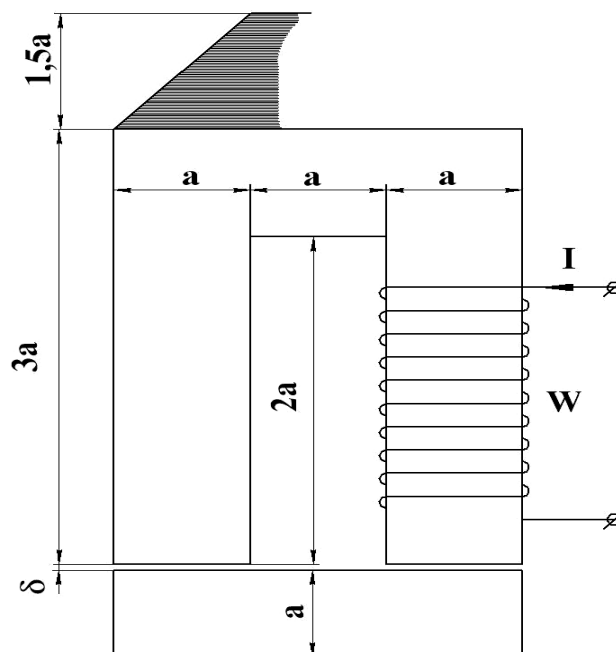


Рис. 3

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
$\delta$ , 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	Э42	Э310	Э12	Э31	Э42	Э310	Э12	Э31	Э42	Э310	Э12	Э31	Э42	Э310	Э12

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
$\delta$ , 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	Э31	Э42	Э310	Э12	Э31	Э42	Э310	Э12	Э31	Э42	Э310	Э12	Э31	Э42	Э310



### 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.

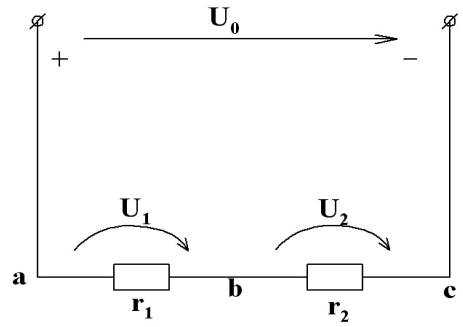


Рис. 4

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
Уменьшается $r_1$	7, 19	8, 20	9, 21
Уменьшается $r_2$	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	$I$	$U_1$	$U_2$	$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$
Изменение величины						

### Задача № 5

Три резистора сопротивлением по 1 кОм включены последовательно на напряжение источника  $U_0 = 12$  В (рис. 5).

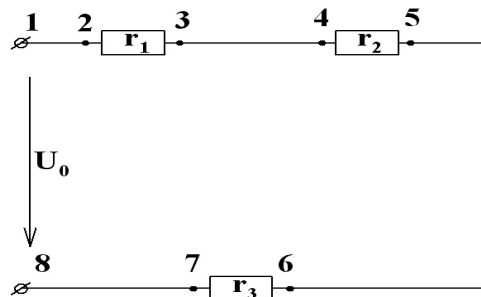


Рис. 5

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	под-	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
$r_2$	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.

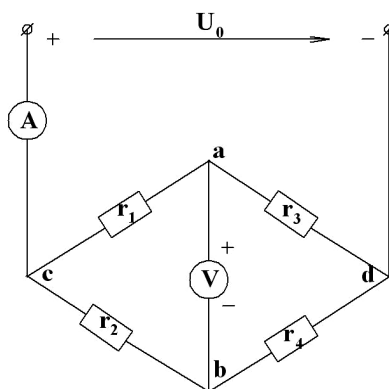


Рис. 6

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	$U_{ab}, \text{В}$	$I, \text{мА}$
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 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  $U_0 = 36 \text{ В}$ .

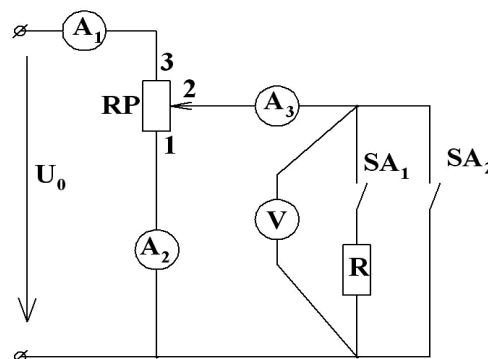


Рис. 7

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

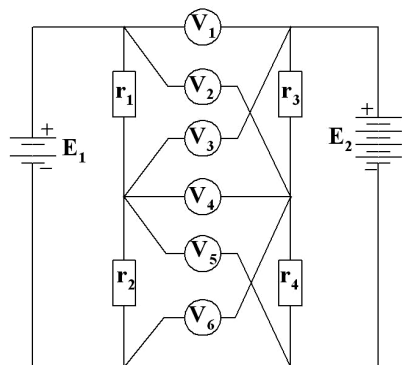


Рис. 8

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

$$E_1 = 6 \text{ В}, E_2 = 8 \text{ В}, r_1 = r_2 = r_3 = r_4.$$

### 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  $U = 6N \text{ В}$ , 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 –  $\infty$  и 0.

Данные расчета внести в табл. 12.

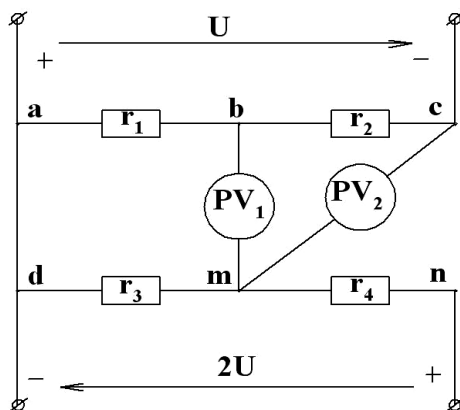


Рис. 9

Таблица 11

Таблица вариантов

Заземленная точка		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>m</i>	<i>n</i>
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							
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>m</i>	<i>n</i>	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 <sup>2</sup>	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.

### 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, напряжение стабилизации которого равно 8 В в пределах изменения тока стабилитрона от 1 до 5 мА (рис. 10).

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
$R_{кз}, кОм$	0,8	4			0,9	3,3							1		1,1
$I_{кз}, МА$		1,4	5	1			6		7		8		5	1,6	6
$U_{кз}, В$		5	5		6		7	7				6		5	
$U_{ит}, В$				7	5	6			7,5	5				6	
$I_{б}, мКА$	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	
$R_{кз}, кОм$	3	0,8		0,9			3,3	1						1,1	3,9
$I_{кз}, МА$		7		8	2	5			1,2		1,8		1,5		2
$U_{кз}, В$		5	7		6		5		5	6				7	
$U_{ит}, В$	7		5	6		5	6	5			7	7			
$I_{б}, мКА$			50		60			450		150	20	300	40		60

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.

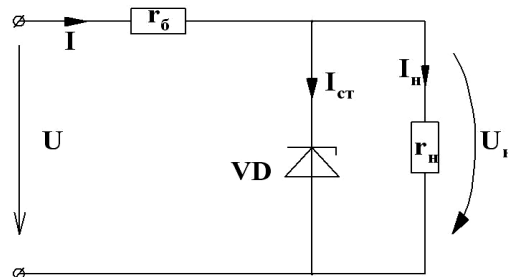


Рис. 10

### 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).

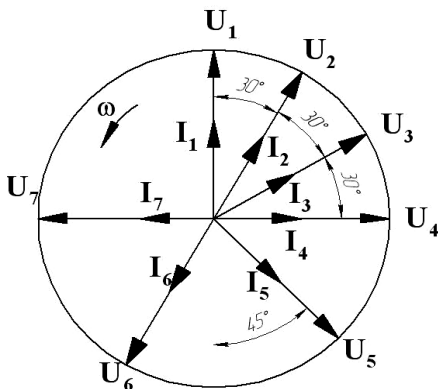


Рис. 11

Таблица 15

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 выбирать 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).

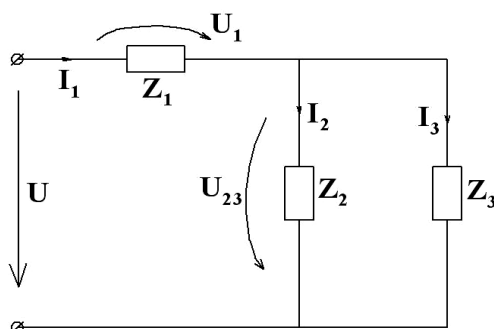


Рис. 12

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, которую следует включить звездой для нечетных вариантов и треугольником – для четных.

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.

2. Определить емкость и номинальное напряжение 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		660
Фазное напряжение нагрузки (печи) $U_{1\phi}$ , В	127	1,2	3,4	5,6	–	–	–
	220	–	7,8	9,10	11,12	13,14	–
	380	–			15,16	17,18	19,20
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  $\alpha_1$  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 $\alpha_n$							
	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:
  - а) для работы трансформатора тока;
  - б) для работы ваттметра;
  - в) 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,

$I_B = 20 \text{ A}$ ,  $I_C = 30 \text{ A}$ . «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
A	1	2	3	4	5	6	7	8	9
B	10	11	12	13	14	15	16	17	18
C	19	20	21	22	23	24	25	26	27

### Задача № 19

Вторичная обмотка однофазного трансформатора включена на активную нагрузку  $r_H = \text{const}$  (рис. 13). Как изменятся показания приборов, включенных в первичную и вторичную цепи, а также магнитный поток  $\Phi$ , 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?

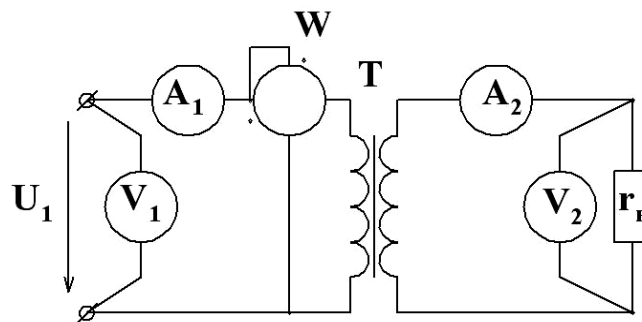


Рис. 13

Здесь  $U_1$  и  $f$  – напряжение и частота тока сети,  $S$  – сечение магнитопровода,  $\delta$  – расчетная длина воздушного зазора в магнитопроводе.

Результаты анализа внести в табл. 21 и аргументировать ответы письменно с помощью формул и зависимостей.

При анализе считать, что изменение тока холостого хода практически не влияет на изменение тока в первичной цепи при заданной нагрузке.

Таблица 20

Таблица вариантов

Характер изменения	Параметр	$U_1$	$f$	$W_1$	$W_2$	$S$	$\delta_0$
		В	Гц	–	–	мм <sup>2</sup>	мм
Увеличивается		1	2	3	4	5	6
Уменьшается		7	8	9	10	11	12

Таблица 21

Расчетная таблица

Анализируемые параметры	$\Phi$	$B$	$H$	$I_{10}$	$U_1$	$I_1$	$P_1$	$U_2$	$I_2$
	Вδ	Т	А/м	А	В	А	Вт	В	А

### Задача № 20

Генератор постоянного тока независимого возбуждения, характеристика холостого хода которого задана аналитически  $E_{\text{я}} = 20 + 400 \cdot I_1$ , приводится во вращение асинхронным двигателем с постоянной угловой скоростью  $\omega$ . Напряжение и ток обмотки возбуждения, нагрузка генератора и напряжение на его зажимах контролируются приборами V1, A1, A2 и V2 (рис. 14).

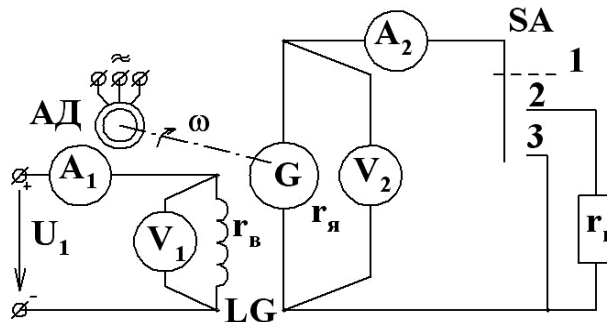


Рис. 14

С помощью переключателя SA можно установить три режима работы генератора. По заданным величинам (см. 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 22

Таблица вариантов

№ вар.	Цепь LG		1-е полож. SA			2-е полож. SA			3-е полож. SA			Сопротивления		
	$U_1, В$	$I_1, А$	$U_2, В$	$I_2, А$	$P, Вт$	$U_2, В$	$I_2, А$	$P, Вт$	$U_2, В$	$I_2, А$	$P, Вт$	$r_н, Ом$	$r_г, Ом$	$r_б, Ом$
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								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				110			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  $\omega$ , ЭДС обмотки якоря  $E_y$ , ток обмотки якоря  $I_y$  и вращающий момент  $M_{вр}$ , если изменить один из следующих параметров: сопротивление цепи якоря  $r_{ця}$ , напряжение питания обмотки якоря  $U$ , магнитный поток  $\Phi$  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		
$r_{ця}$	$U$	$\Phi$	$M_c$	$r_{ця}$	$U$	$\Phi$	$M_c$			
1	2	3	4	5	6	7	8	$\omega$	$E_y$	$I_y$
9	10	11	12	13	14	15	16	$\omega$	$E_y$	$M_{вр}$
17	18	19	20	21	22	23	24	$\omega$	$I_y$	$M_{вр}$

### 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  $\eta_H$ , мощностью, потребляемой двигателем из сети,  $P_H$ , потребляемым током  $I_H$ , потерями в обмотке якоря  $\Delta P_y$  и обмотке возбуждения  $\Delta P_B$ , суммарными механическими и магнитными потерями  $\Delta P_M$ , общими потерями в двигателе  $\Delta P$ , 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  $r_y$ , 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  $I = I_A + I_B$ , где  $I_B$  – 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  $\Delta P_A = r_A I_A^2$  и цепи возбуждения  $\Delta P_B = r_B I_B^2 = UI_B$  (где  $r_A$  и  $r_B$  – сопротивления обмоток якоря и возбуждения), механических и магнитных потерь  $\Delta P_M$ , которые считаются постоянными независимо от нагрузки (от холостого хода до номинальной). Таким образом, с достаточной степенью точности можно считать, что  $\Delta P = \Delta P_A + \Delta P_B + \Delta P_M$ .

Электрическая мощность двигателя  $P_1 = P + \Delta P$ . В режиме холостого хода  $P_{1xx} = P_{xx} + \Delta P_{xx} = \Delta P_{Bxx} + \Delta P_{Mxx}$ , т.к.  $P_{xx} = 0$ , а потери в цепи якоря  $\Delta P_{Axx} \approx 0$ , 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  $I_{A \text{ пуск}} = \frac{U}{r_A}$ . Если в цепь якоря включено пусковое сопротивление  $r_{\text{пуск}}$ , то пусковой ток якоря можно уменьшить до величины  $I_{A \text{ пуск}} = \frac{U}{(r_A + r_{\text{пуск}})}$ .



Механический момент на валу двигателя  $M = \kappa\Phi I_{я}$ , где коэффициент  $\kappa$  – постоянный для данной машины,  $\Phi$  – магнитный поток под одним плюсом. Если известны ток якоря и момент в номинальном режиме  $M_n = \kappa\Phi I_{ян}$ , то, разделив правые и левые части последних двух уравнений, получим  $M / M_n = I_{я} / I_{ян}$  или  $M = M_n I_{я} / I_{ян}$ .

При пуске  $M_{пуск} = M_n I_{я\ пуск} / I_{ян}$ .

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 ( $M_n, \omega_n$ ) и режим пуска двигателя ( $M_{пуск}, \omega_{пуск} = 0$ ).

Пересечение этой прямой с осью ординат определяет скорость идеального холостого хода  $\omega_0$ . Искусственную механическую характеристику при введении сопротивления в цепь якоря также можно построить по двум точкам, соответствующим режиму холостого хода ( $\omega_0, M_{хх} = 0$ ), и пусковому режиму ( $\omega_{пуск} = 0, M_{пуск}$ ).

Для построения рабочих характеристик составим баланс мощностей:

$$P_1 = P + \Delta P = P + \Delta P_{я} + \Delta P_{г} + \Delta P_{м}$$

или

$$U(I_{я} + I_{г}) = P + r_{я} I_{я}^2 + \Delta P_{г} + \Delta P_{м}.$$

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,  $I = I_{я} + I_{г}$ .

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 противоЭДС  $E = K\Phi \cdot \omega$ . Зная ЭДС и скорость в номинальном режиме, легко определить скорость для любого режима:

$$\omega = \omega_n E / E_n.$$

ПротивоЭДС вычисляется в соответствии с уравнением, составленным по второму закону Кирхгофа:

$$E = U - r_{я} \cdot I_{я},$$

кпд электродвигателя

$$\eta = P / P_1 = P / UI.$$

Варианты заданий приведены в табл. 24.

В пояснительной записке привести расчет для мощности нагрузки  $P = 0,25P_n$ , а результаты расчета для других значений мощности свести в табл. 25.

Механические и рабочие характеристики построить в удобном масштабе на миллиметровой бумаге.

Таблица 25

Расчетная таблица

P	$I_{я}$	I	M	$E_{я}$	$\omega$	n	P	$\eta$
кВт	А	А	Нм	В	С	об/мин	кВт	–

### 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  $\Delta P$  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.

Таблица вариантов

№ вар.	$P_H$	$M_H$	$n_H$	$U$	$P_{1H}$	$\eta_H$	$I_H$	$I_e$	$\Delta P$	$\Delta P_{я}$	$P_{10}$	$\Delta P_{м}$	$P_{10}$	$I_0$	$r_{я}$	$r_e$
	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						90
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

Таблица 26

Расчетная таблица

$S$	$\omega$	$n$	$M$
[1]	$[c^{-1}]$	[об/мин]	[Н·м]

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.

Все двигатели рассчитаны на напряжение 220/380 В,  $M_{\max}/M_n = 2$ ,  $I_{\text{пуск}}/I_n = 6$ .

Таблица 27

Таблица вариантов

№ вар.	$U$	$P_n$	$S_n$	$\eta_n$	$\cos \varphi_n$	$P$	$M_{\text{пуск}}/M_n$
	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
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

### Задача № 24

Для маркировки выводов трехфазной четырехпроводной сети три 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.

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 5 А, а первичный ток выбрать из ряда чисел, кратных 10 А. Измерение осуществляется амперметром, рассчитанным на 1 А.

5. Каковы последствия того, что схема включения двигателя будет изменена, а момент нагрузки на валу останется номинальным?

В схему соединений включить трансформатор тока и амперметр.

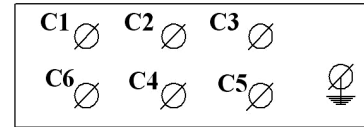


Таблица 28

Расчетная таблица

Номер вар. Клеммы	1 2	3 4	5 6	7 8	9 10	11 12	13 14	15 16	17 18	19 20	21 22	23 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.

Включить вольтметры для измерения  $U$  и  $U_{\phi}$ .

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					

### Задача № 26

Определить линейный и фазный ток, потребляемый асинхронным двигателем, который с помощью редуктора поднимает груз весом  $Q$  со скоростью 0,2 м/с. Выбрать мощность двигателя из ряда: 1,1; 1,5; 1,9; 2,6; 3,3; 4,5 кВт. Номинальные данные двигателя:  $n_n = 1400$  об/мин,  $\cos\phi_n = 0,8$ ,  $M_{пуск}/M_{ном} = 2$ ,  $M_{пуск}/M_n = 1,2$ . Зависимость КПД двигателя от мощности на валу определяется эмпирической формулой:  $\eta = \sqrt{0,57P/P_n}$ . Коэффици-

ент полезного действия редуктора  $\eta_{ред} = 0,85$ . Номинальное напряжение двигателя, напряжение сети и вес груза даны в таблице. Сможет ли двигатель поднять груз весом  $1,5Q$ ? (При этом считать, что при изменении нагрузки частота вращения практически не изменяется.) Как изменится ток и  $\cos\phi$ , если выбрать более мощный двигатель?

Таблица 30

Таблица вариантов

Пример	Напряжение сети												Номинальное напряжение двигателя
	127			220			380			660			
	1	7	13	2	8	14							127/220
				3	9	15	4	10	16				220/380
							5	11	17	6	12	18	380/660
0,3	0,5	0,9	1,5	0,5	0,9	1,5	0,5	0,9	1,5	0,5	0,9	1,5	Вес груза, т

### План решения

Ток двигателя определяется геометрической суммой активной и реактивной составляющих. Реактивная составляющая практически не зависит от нагрузки и ее можно определить по номинальному режиму. Для этого необходимо определить номинальный ток, а затем его реактивную составляющую  $I_n \sin\phi_n$ . Активная составляющая  $I \cos\phi$  зависит от нагрузки и определяется по формуле  $P = \sqrt{3} U I \cos\phi \cdot \eta$ . Для того, чтобы ответить на вопрос сможет ли двигатель поднять груз весом  $1,5 Q$ , необходимо сравнить реальный момент на валу с пусковым.

### Пример

1. Мощность на валу двигателя

$$P = Q \cdot v / \eta_{ред} = 300 \cdot 9,8 \cdot 0,2 / 0,85 = 692 \text{ Вт.}$$

2. Выбираем номинальную мощность двигателя

$$P_n = 1,1 \text{ кВт } (P_n \geq P).$$

3. Номинальный линейный ток двигателя

$$I_n = P_n / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \eta_n \cos\phi_n) = 1100 / (\sqrt{3} \cdot 127 \cdot 0,755 \cdot 0,8) = 8,28 \text{ А,}$$

где  $\eta_n = \sqrt{0,57 P_n / P_n} = \sqrt{0,57 \cdot 1,1 / 1,1} = 0,755$ .

4. Реактивная составляющая номинального тока (намагничивающий ток)

$$I_p = I_n \sin\phi_n = I_n \sqrt{1 - \cos^2\phi_n} = 8,28 \sqrt{1 - 0,8^2} = 4,97 \text{ А.}$$

Активная составляющая линейного тока при заданной нагрузке

$$I_a = I \cos \varphi = P / \sqrt{3}U \cdot \eta = 692 / \sqrt{3} \cdot 127 \cdot 0,6 = 5,24 \text{ А},$$

где  $\eta = \sqrt{0,57P / P_n} = \sqrt{0,57 \cdot 692 / 1100} = 0,6$ .

5. Линейный ток двигателя при заданной нагрузке

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2} = \sqrt{5,24^2 + 4,97^2} = 7,22 \text{ А}.$$

Фазное напряжение двигателя 127/220 равно 127 В, поэтому в сеть с напряжением 127 В его необходимо включить треугольником. Фазный ток двигателя  $I_\varphi = I / \sqrt{3} = 7,22 / \sqrt{3} = 4,17 \text{ А}$ .

6. Номинальный момент двигателя

$$M_{ном} = P_n / \omega_n = 1100 / 147 = 7,5 \text{ Нм},$$

где  $\omega_n = \pi n_n / 30 = 3,14 \cdot 1400 / 30 = 147 \text{ с}^{-1}$ .

7. Пусковой момент  $M_{пуск} = 1,2M_{ном} = 1,2 \cdot 7,5 = 9 \text{ Нм}$ .

8. Момент нагрузки груза  $1,5Q$

$$M_c = 1,5P / \omega \approx 1,5P / \omega_n = 1,5 \cdot 692 / 147 = 7,06 \text{ Нм}.$$

Так как  $M_{пуск} > M_c$  ( $9 > 7,06$ ), то двигатель этот груз поднимет даже без перегрузки, поскольку  $M_c < M_{ном}$  ( $7,06 < 7,5$ ). Если для подъема этого груза взять более мощный двигатель (1,5 кВт), то потребляемый ток возрастет за счет реактивной составляющей, хотя активная составляющая практически не изменится. По этой же причине уменьшится и коэффициент мощности  $\cos \varphi$ . Двигатель будет выполнять ту же работу, но потреблять больший ток. Недогрузка двигателя снижает его энергетические показатели.

## Задача № 27

В номинальном режиме ток, потребляемый асинхронным двигателем, в 2 раза превышает ток холостого хода. Во сколько раз изменится ток, потребляемый двигателем, если мощность нагрузки уменьшилась в 2 раза, а КПД при этом практически не изменился.

Ответ: уменьшился в 1,51 раза.

**Подсказка:**

Если мощность нагрузки уменьшилась в 2 раза, то при неизменной реактивной составляющей тока (тока холостого хода) активная составляющая тока уменьшилась в 2 раза. Общий ток  $I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}$ .



### Задача № 28

Определить величину и фазу общего напряжения при последовательном соединении всех трех вторичных обмоток трехфазного трансформатора, если фазное напряжение их равно 20 В. Фазу искомого напряжения определить относительно вектора  $\vec{U}_A = \vec{U}_{ax}$ .

Таблица 31

**Таблица данных**

Вариант	Искомое напряжение	Соединены выводы
1	$U_{zx}$	$ac$ и $by$
2	$U_{dz}$	$ay$ и $bc$
3	$U_{bx}$	$ac$ и $yz$
4	$U_{xy}$	$az$ и $bc$
5	$U_{az}$	$bx$ и $cy$
6	$U_{yz}$	$cx$ и $ab$
7	$U_{cz}$	$ab$ и $yz$
8	$U_{cx}$	$ay$ и $bz$
9	$U_{xy}$	$ac$ и $bz$
10	$U_{bx}$	$az$ и $cy$
11	$U_{ac}$	$bx$ и $yz$
12	$U_{bz}$	$cx$ и $ay$
13	$U_{xz}$	$ac$ и $by$
14	$U_{zd}$	$ay$ и $bc$
15	$U_{xb}$	$ac$ и $yz$
16	$U_{yx}$	$az$ и $bc$
17	$U_{za}$	$bx$ и $cy$
18	$U_{zy}$	$cx$ и $ab$
19	$U_{zc}$	$ab$ и $yz$
20	$U_{xc}$	$ay$ и $bz$
21	$U_{yx}$	$ac$ и $bz$
22	$U_{xb}$	$az$ и $cy$
23	$U_{ca}$	$bx$ и $yz$
24	$U_{zb}$	$cx$ и $ay$

На рис. 15 – схема, в которой соединены выводы  $ab$  и  $yz$ , векторная диаграмма фазных напряжений и построение векторной диаграмма для определения величины и фазы напряжения  $\vec{U}_{xc}$ .

Для определения  $\vec{U}_{xc}$  необходимо на пути от  $x$  к  $c$  геометрически сложить напряжения всех фаз  $\vec{U}_{xc} = \vec{U}_{xa} + \vec{U}_{by} + \vec{U}_{zc} = -\vec{U}_A + \vec{U}_B - \vec{U}_C$ .

По векторной диаграмме легко посчитать, что  $\bar{U}_{xc} = 40$  В, а  $\varphi_{xc} = -120^\circ$ .

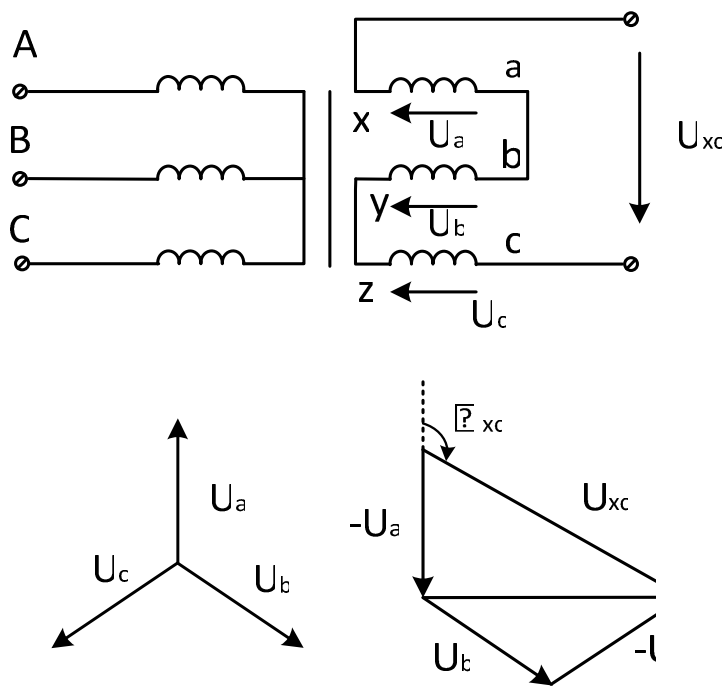


Рис. 15

### Задача № 29

Определить величину и фазу напряжения, измеряемого вольтметром, включенным в диагональ моста, если сопротивления всех активных и реактивных элементов цепи равны, а начальную фазу напряжения питания  $U_{ax} = 220$  В принять равной нулю. Как изменится это напряжение по величине и фазе при заданном в табл. 32 изменении схемы? Показать на волновой диаграмме в произвольном масштабе синусоиды входного и выходного напряжения с учетом фазовых сдвигов между ними.

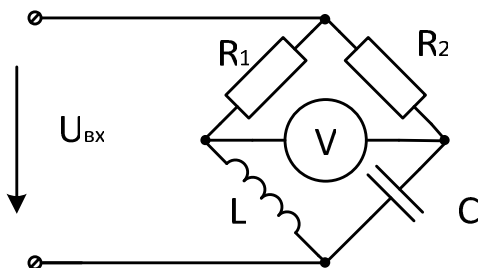


Таблица данных

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Обрыв цепи	R1	R2	L	C	–	–	–	–	–	–
Закорочен элемент	–	–	–	–	R1	R2	L	C	–	–
Поменять местами	–	–	–	–	–	–	–	–	R1 и L	R2 и C

## Задача № 30

Вольтметр, подключенный к зажимам разряженного аккумулятора с внутренним сопротивлением  $r_{вн}$ , показал напряжение  $U_1$ , а после зарядки –  $U_2$ . Аккумулятор заряжался источником постоянного тока напряжением  $U_0$  – через добавочное сопротивление  $r_{доб}$ . Начальный ток зарядки  $I_1$ , в конце зарядки –  $I_2$ . При включении заряженного аккумулятора на номинальную нагрузку с током  $I_n$  напряжение на его зажимах было равно  $U_n$ . По заданным величинам определить неизвестные и заполнить табл. 33.

Таблица 33

Вариант	$U_1$ , В	$U_2$ , В	$R_{вн}$ , Ом	$U_0$ , В	$R_{доб}$ , Ом	$I_1$ , А	$I_2$ , А	$I_n$ , А	$U_n$ , В
1	4,5	7,5		50		5		5	6
2	11		0,4	50			3,69	5	12
3	20	28	1		5		3,66	4	
4	30	42	0,6		3,4	5			36
5	4,5	7,5		60			4,73	2,5	6
6	11		0,4		9,4		4,69	5	12
7	20	28	0,8		7,2	5		5	
8	30	42	0,5	60		5			36
9	4,5	7,6			12,7		4,76	4	6
10	11		0,5		11,3	5		4	12
11	20	28	0,5	70		4		8	
12	30	42	1,2	70			2,8		36
13	4,5	7,4			14,7	5		3,5	6
14	11		0,5	80		4		4	12
15	20	28	0,4	80			3,47	10	
16	30	42	1,5		11		3,04		36

## Задача № 31

Трехфазный трансформатор номинальной мощностью  $S_n = 20 + 2N$  кВА и напряжением 10/0,4 кВ питает нагрузку мощностью  $P_2 = 2N$  кВт и коэффициентом мощности  $\cos\varphi_n = 0,8$ . Определить номинальные линей-

ные токи первичной  $I_{1н}$  и вторичной  $I_{2н}$  цепей, линейные токи  $I_1$  и  $I_2$  реальной нагрузки, коэффициент загрузки  $K_3$  трансформатора. Нарисовать развернутую схему питания нагрузки с включением двух ваттметров для измерения активной мощности трехфазной нагрузки. Токовые обмотки ваттметра включить через трансформаторы тока, для которых выбрать стандартное значение первичного тока. Токовые обмотки ваттметра рассчитаны на 10 А, обмотки напряжения – на 500 В. Определить показания обоих ваттметров. Данные расчета свести в табл. 34.

Таблица 34

$I_{1н}, А$	$I_{2н}, А$	$I_1, А$	$I_2, А$	$K_3 = I_2/I_{2н}$	ТА	$P_1, кВт$	$P_2, кВт$

### Задача № 32

При исследовании генератора постоянного тока независимого возбуждения (рис. 16) снимались характеристика холостого хода (рис. 16, б) и семейство внешних характеристик (рис. 16, 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. 35)?

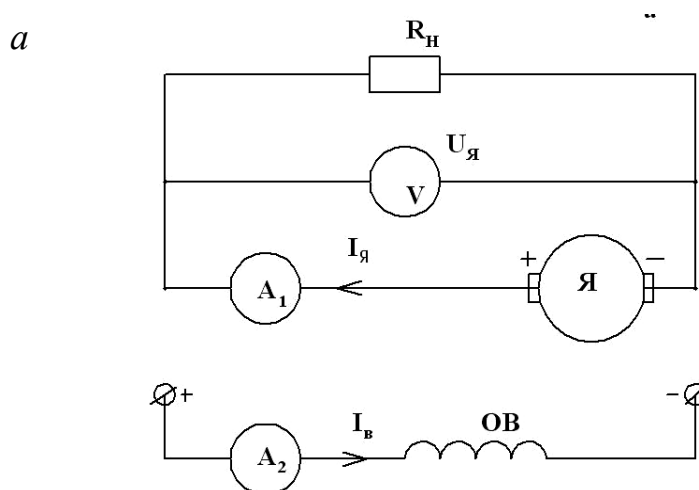


Рис. 16. Генератор постоянного тока:

*a* – схема включения  
(см. также стр. 309)

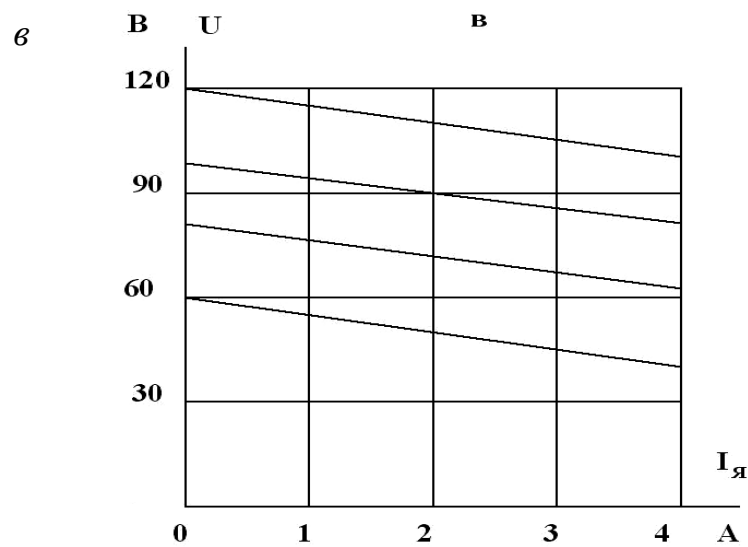
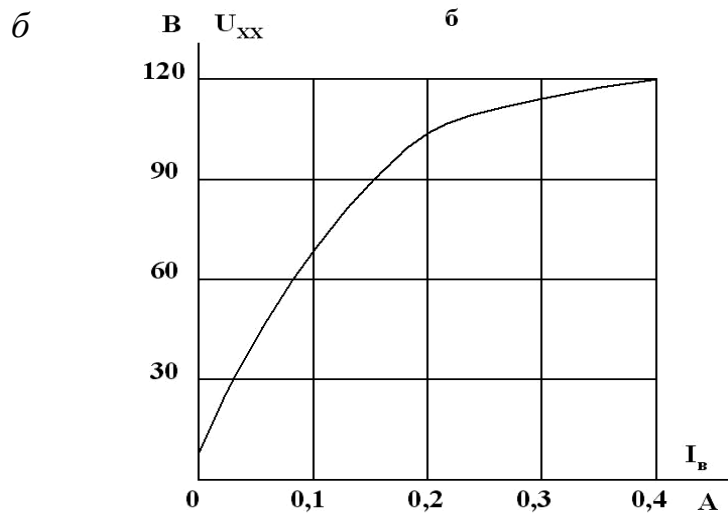


Рис. 16. Генератор постоянного тока:  
**б** – характеристика холостого хода; **в** – семейство внешних характеристик  
 (окончание)

Таблица 35

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
$I_б, А$				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  $I_b$ , сопротивлением в цепи якоря  $r_{\text{я}}$ , током и ЭДС обмотки якоря  $I_{\text{я}}$  и  $E_{\text{я}}$  и электромагнитным вращающим моментом  $M_{\text{эм}}$ . Определить, как изменятся в установившемся режиме два из четырех параметров ( $n$ ,  $I_{\text{я}}$ ,  $E_{\text{я}}$ ,  $M_{\text{эм}}$ ), если изменить один из независимых параметров ( $U$ ,  $r_{\text{я}}$ ,  $I_b$ ,  $M_c$ ) (табл. 36).

Таблица 36

**Таблица вариантов**

Определяемые параметры	Изменяемый независимый параметр							
	увеличить				уменьшить			
	$U$	$r_{\text{я}}$	$I_b$	$M_c$	$U$	$r_{\text{я}}$	$I_b$	$M_c$
$n, I_{\text{я}}$	1	2	3	4	17	18	19	20
$E_{\text{я}}, M_{\text{эм}}$	5	6	7	8	21	22	23	24
$E_{\text{я}}, I_{\text{я}}$	9	10	11	12	25	26	27	28
$n, M_{\text{эм}}$	13	14	15	16	29	30	31	32

## ЛИТЕРАТУРА

1. Паначевный, Б.И. Курс электротехники / Б.И. Паначевный. – 2-е изд., дораб. – Харьков: Торсинг, 2002. – 287 с.
2. Китунович, Ф.Г. Электротехника: учебник для вузов / Ф.Г. Китунович. – 4-е изд., перераб. и доп. – Минск: Высш. шк., 1999. – 400 с.
3. Электротехника: учеб. пособие. / А.С. Касаткин [и др.]. – 4-е изд., перераб. – М.: ЭнергATOMиздат, 1983. – 440 с.
4. Липатов, Д.Н. Вопросы и задачи по электротехнике 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 специальностей вузов / В.Г. Герасимов [и др.]; под ред. В.Г. Герасимова. – 4-е изд., перераб. и доп. – 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.
7. Щербаков, И.П. Основы электроники / И.П. Щербаков. – 5-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1989. – 352 с.
8. Гусев, В.Г. Электроника: учеб. пособие для приборостроит. специальностей вузов / В.Г. Гусев, Ю.М. Гусев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1991. – 62 с.
9. МикроЭВМ, микропроцессоры и основы программирования: учеб. пособие / А.Н. Морозевич [и др.]; под общ. ред. А.Н. Морозевича. – Минск: Выш. шк., 1991. – 352 с.
10. Гутников, В.С. Интегральная электроника в измерительных устройствах / В.С. Гутников. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, Ленинград. отд-ние, 1988. – 304 с.

*Учебное издание*

АВДЕЙКО Валерий Порфирьевич  
ВЕРШИНИН Александр Сергеевич  
АДАМОВИЧ Александр Леонидович

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА,  
ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ И ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Учебно-методический комплекс  
для студентов технических специальностей  
неэлектротехнического профиля

В двух частях

Часть 1

**Электротехника**

Редактор *Т. А. Дарьянова*

Дизайн обложки *В. А. Виноградовой*

---

Подписано в печать 19.09.12. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.  
Ризография. Усл. печ. л. 18,10. Уч.-изд. л. 17,74. Тираж 30 экз. Заказ 1343.

---

Издатель и полиграфическое исполнение –  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

ЛИ № 02330/0548568 от 26.06.09

ЛП № 02330/0494256 от 27.05.09

Ул. Блохина, 29, 211440, г. Новополоцк.