

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

ФГБОУ ВО «УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**О.Б. Пушкарева
Н.Р. Шабалина
С.М. Шанчуров**

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА И ЭЛЕКТРОПРИВОД

Курс лекций
для обучающихся всех направлений
и специальностей

Электронное издание

Екатеринбург
2016

УДК 621.3.(075.8)

ББК 31.2я73

П91

Рецензенты:

С.В. Сверчков – технический директор ЗАО «Региональный центр лазерных технологий»;

А.В. Паздерин – заведующий кафедрой «Автоматизированные электрические системы», доктор технических наук, профессор УРФУ

Пушкарева, О.Б.

П91 Электротехника, электроника и электропривод: курс лекций для обучающихся всех направлений и специальностей / О.Б. Пушкарева, Н.Р. Шабалина, С.М. Шанчуров. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2016. – 101 с. – 3,7 Мб.

ISBN 978-5-94984-576-9

Представленный курс лекций подготовлен в соответствии с требованиями ФГОС ВО по дисциплине «Электротехника». Рассмотрены вопросы, связанные с изучением и расчетом электрических и магнитных цепей. Описаны электроизмерительные приборы и электротехнические измерения, электронные приборы и устройства, конструкции электрических машин и аппаратов. Подготовленный материал позволит быстро и качественно получить основные знания по предмету.

Рекомендуется обучающимся по техническим специальностям и направлениям.

Издается по решению редакционно-издательского совета Уральского государственного лесотехнического университета.

УДК 621.3.(075.8)

ББК 31.2я73

ISBN 978-5-94984-576-9

© ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет», 2016

© О.Б. Пушкарева, Н.Р. Шабалина,
С.М. Шанчуров, 2016

Содержание

<i>Лекция 1.</i> Основные понятия и определения.....	6
1.1. Общие сведения	6
1.2. Резистивные элементы.....	8
1.3. Индуктивный и емкостный элементы.....	9
1.4. Источники постоянного напряжения	10
<i>Лекция 2.</i> Электрические цепи постоянного тока.....	12
2.1. Общие сведения.....	12
2.2. Законы Кирхгофа	13
2.2.1. Первый закон Кирхгофа	13
2.2.2. Второй закон Кирхгофа	14
2.3. Распределение потенциала вдоль электрической цепи.....	15
2.4. Последовательное и параллельное соединения резистивных элементов	16
2.4.1. Последовательное соединение	16
2.4.2. Параллельное соединение	17
2.5. Электрическая энергия и мощность.....	18
2.6. Номинальные величины источников и приемников. Режимы работы электрических цепей	19
<i>Лекция 3.</i> Линейные однофазные электрические цепи синусоидального тока	21
3.1. Основные величины, характеризующие.....	21
3.1.1. Мгновенное значение	21
3.1.2. Действующее и среднее значения синусоидальных токов и напряжений	23
3.1.3. Изображение синусоидальных токов, напряжений и ЭДС комплексными числами и векторами	24
3.2. Элементы электрических цепей синусоидального тока	27
3.2.1. Резистивный элемент (РЭ)	27
3.2.2. Индуктивный элемент (ИЭ)	28
3.2.3. Емкостный элемент (ЕЭ)	30

3.3. Расчет неразветвленной электрической цепи синусоидального тока	33
3.4. Мощность в линейных цепях синусоидального тока.	36
Коэффициент мощности. Резонанс напряжений и токов в электрических цепях переменного тока	36
<i>Лекция 4.</i> Трехфазные линейные электрические цепи синусоидального тока	40
4.1. Трехфазный источник электрической энергии	40
4.2. Анализ электрических цепей при соединении трехфазного источника и приемника по схеме «звезда» с нулевым проводом..	42
4.3. Соединение приемника по схеме «треугольник»	44
4.4. Мощность трехфазной цепи.....	46
<i>Лекция 5.</i> Трансформаторы	47
5.1. Общие сведения.....	47
5.2. Принцип действия трансформатора.....	48
5.3. Работа трансформатора в режиме холостого хода	52
5.4. Опыт короткого замыкания.....	54
5.5. Потери мощности в трансформаторе	56
5.6. Внешняя характеристика трансформатора.....	57
5.7. Автотрансформаторы	58
<i>Лекция 6.</i> Электрические машины.....	60
6.1. Общие сведения.....	60
6.2. Вращающееся магнитное поле	61
6.3. Асинхронные машины.....	62
6.3.1. Принципы действия асинхронного двигателя (АР)	62
6.3.2. Устройство асинхронного двигателя	63
6.3.3. Характеристики асинхронного двигателя	64
6.4. Электрические машины постоянного тока (МПТ)	67
6.4.1. Общие понятия об устройстве машин постоянного тока и принципе их действия	67
6.4.2. ЭДС обмотки якоря и электромагнитный момент	71
6.4.3. Электрические двигатели постоянного тока (ДПТ)	73
6.4.4. Способы регулирования скорости ДПТ	74
6.4.5. Пуск электродвигателей постоянного тока	77

<i>Лекция 7. Электропривод</i>	79
7.1. Выбор мощности электродвигателя для длительного режима работы с постоянной мощностью.....	81
7.2. Выбор мощности электродвигателя для длительной переменной нагрузки.	81
7.3. Выбор мощности электродвигателя для кратковременного режима работы.....	86
7.4. Выбор мощности электродвигателя для повторно-кратковременного режима работы	87
<i>Лекция 8. Основы промышленной электроники</i>	91
8.1. Общие сведения.....	91
8.2. Полупроводниковые диоды	92
8.3. Выпрямители на полупроводниковых диодах	93
8.4. Транзисторы.....	97
8.4.1. Общие сведения	97
8.4.2. Усилители на транзисторах	98
Список использованных источников	100

Лекция 1. Основные понятия и определения

1.1. Общие сведения

Электротехника – это наука и отрасль техники. Как наука электротехника изучает процессы, связанные с практическим применением электрических и магнитных явлений. А как отрасль применяет эти явления в промышленности, медицине, строительстве и т. п.

В машинах, оборудовании, технологических комплексах и системах автоматизации, используемых при строительстве и производстве строительных материалов, изделий и конструкций, механизация и автоматизация технологических процессов во многом зависит от уровня электрификации этих процессов.

Для работы любого электротехнического устройства необходимо, чтобы через него проходил электрический ток, обязательным условием существования которого является наличие замкнутого контура – электрической цепи.

Электрическая цепь – совокупность устройств, предназначенных для производства, передачи, преобразования и использования электрического тока.

Все электротехнические устройства по назначению, принципу действия и конструктивному оформлению делят на три группы:

- 1) *источники энергии*, т. е. устройства, вырабатывающие электрический ток (генераторы, термоэлементы, фотоэлементы, химические элементы);
- 2) *приемники или нагрузка* – устройства, потребляющие электрический ток (электродвигатели, электролампы, электромеханизмы);
- 3) *проводники*, а также различная *коммутационная аппаратура* (выключатели, реле, контакторы, измерительные приборы).

В источниках электрической энергии различные виды энергии преобразуются в электрическую. Так, в генераторах электростанций в электрическую энергию преобразуется энергия механическая, в гальванических элементах и аккумуляторах – химическая, в солнечных батареях – световая и т. д.

В приемниках электрическая энергия источников преобразуется в тепловую (нагревательные элементы), световую (электрические лампы), химическую (электролизные ванны) и т. д.

Электрические цепи бывают:

- простые и сложные;
- с одним или несколькими источниками энергии;
- линейными и нелинейными;
- активные (содержащие источник энергии);
- неактивные, которые не содержат источник энергии.

Если электрическая цепь содержит один нелинейный элемент, сопротивление которого не является постоянным, а зависит от величины проходящего тока или приложенного напряжения, то такая цепь называется *нелинейной*.

В электрических цепях происходят физические процессы, которые делят на два вида: необратимые и обратимые.

Необратимые процессы – когда энергия источника необратимо преобразуется в другие виды энергии.

Обратимые процессы – когда энергия запасается в электрических и магнитных полях, а затем полностью возвращается в источник питания.

Чтобы охарактеризовать физические процессы, происходящие в цепях, используют понятие «параметры устройств»:

– электродвижущая сила (ЭДС) E , V характеризует способность устройства создавать разность потенциалов в цепи, а также поддерживать ток в цепи;

– сопротивление R , Ω характеризует способность устройства необратимо преобразовывать электрическую энергию в другие виды энергии;

– индуктивность L , H характеризует способность устройства создавать магнитное поле;

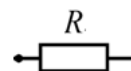
– емкость C , F характеризует способность устройства создавать собственное электрическое поле.

Каждый элемент электрической цепи обладает набором параметров. Для теоретического описания и расчетов электрических цепей реальные параметры заменяют идеальными элементами. Идеальный элемент обладает только одним параметром:

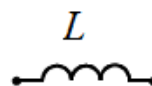
– идеальный источник ЭДС



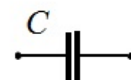
– идеальный резистивный элемент



– идеальный индуктивный элемент



– идеальный емкостной элемент



Графическое изображение электрической цепи с помощью идеальных элементов называется *схемой замещения*.

Приемники электрической энергии по характеру физических процессов, протекающих в них, делятся на три основных вида: резистивные, индуктивные, емкостные.

1.2. Резистивные элементы

В резистивных элементах (резисторах) электрическая энергия необратимо преобразуется в другие виды энергии. Примеры резистивных элементов – лампы накаливания (электрическая энергия необратимо преобразуется в световую и тепловую энергии), нагревательные элементы (электрическая энергия необратимо преобразуется в тепловую), электродвигатели (электрическая энергия необратимо преобразуется в механическую и тепловую энергии) и др.

Основной характеристикой резистивного элемента является его вольт-амперная характеристика (ВАХ):

$$U = f(I), \quad (1.1)$$

где U – напряжение, В; I – сила тока, А.

Если эта зависимость линейная, то резистивный элемент называется линейным и выражение (1.1) имеет вид, известный как закон Ома:

$$U = RI, \quad (1.2)$$

где R – сопротивление резистора, Ом.

Однако во многих случаях ВАХ резисторов является нелинейной. Для многих резисторов (нагревательные спирали, реостаты и др.) нелинейность ВАХ объясняется тем, что эти элементы – металлические проводники и электрический ток в них есть ток проводимости (направленное движение – «дрейф» свободных электронов).

Дрейфу электронов препятствуют (оказывают сопротивление) колеблющиеся атомы, амплитуда колебаний которых определяется температурой проводника (температура – мера кинетической энергии атомов).

При протекании тока свободные электроны сталкиваются с атомами и еще более раскачивают их. Следовательно, температура проводника возрастает, отчего увеличивается и его сопротивление R . Таким образом, сопротивление R зависит от тока $R = f(I)$ и ВАХ нелинейна (рис. 1.1).

При изменении температуры в небольших пределах сопротивление проводника выражается формулой

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)], \quad (1.3)$$

где R_0 , R – сопротивления проводников при температуре T_0 , T , Ом;

T_0 – начальная температура проводника, К; T – конечная температура проводника, К; α – температурный коэффициент сопротивления.

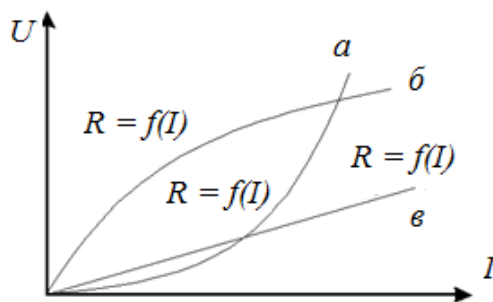
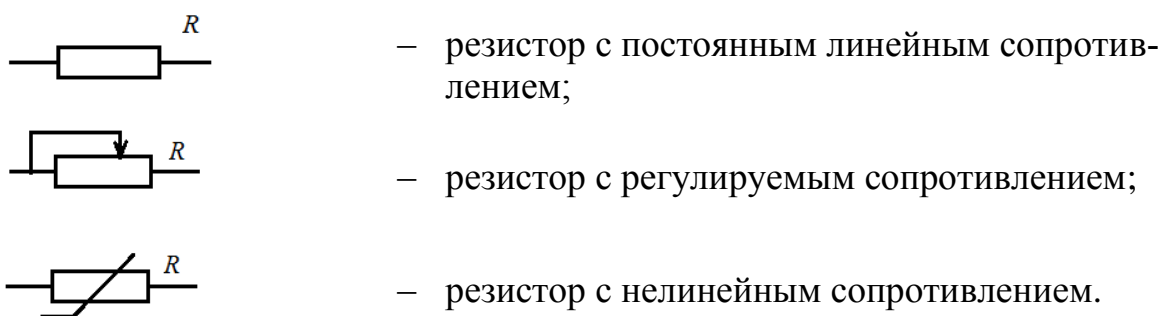


Рис. 1.1. Общий вид ВАХ: a – металлического; $б$ – полупроводникового; $в$ – константанового резистивных элементов

У большинства чистых металлов температурный коэффициент $\alpha > 0$, потому что с повышением температуры сопротивление металлов увеличивается. У электролитов, изделий из графита и полупроводников коэффициент равен $\alpha < 0$.

Условные графические обозначения резистивных элементов:



Для характеристики проводящих свойств различных материалов существует понятие *объемного удельного электрического сопротивления*. Объемное удельное электрическое сопротивление ρ_v данного материала равно сопротивлению между гранями куба с ребром 1 м в соответствии с формулой

$$\rho_v = \frac{R \cdot S}{\ell}, \quad (1.4)$$

где S – площадь поперечного сечения проводника, м^2 ;
 ℓ – длина проводника, м.

1.3. Индуктивный и емкостный элементы

Эти элементы имеют принципиальное отличие от резистивных элементов в том, что в них не происходит необратимого преобразования элек-

трической энергии в другие виды энергии. Другими словами, когда сопоставляют элементы по своему характеру, то резистивные элементы называют *активными*, а индуктивный и емкостный элементы – *реактивными*.

Классическим примером индуктивного элемента является катушка, намотанная проводом на магнитопровод (сердечник). Примерами емкостного элемента являются конденсаторы плоские, цилиндрические, сферические и т. д.

Напряжение u_L на идеальном индуктивном элементе связано с током i_L в этом элементе формулой

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}, \quad (1.5)$$

где L – индуктивность элемента, Гн.

Для идеального емкостного элемента ток i_C и напряжение u_C выражаются идентичной формулой

$$i_C = C \frac{du_C}{dt}, \quad (1.6)$$

где C – емкость элемента, Ф.

Из (1.5) и (1.6) следуют следующие выводы:

- при постоянном токе ($i_L = \text{const}$) напряжение $u_L = 0$, вследствие чего и сопротивление индуктивного элемента на постоянном токе равно нулю;
- при постоянном напряжении ($u_C = \text{const}$) ток $i_C = 0$, вследствие чего сопротивление емкостного элемента на постоянном токе равно бесконечности.

Таким образом, индуктивный элемент пропускает постоянный ток *без сопротивления*, а емкостный элемент *не пропускает* постоянный ток.

Конденсаторы можно рассматривать как *идеальные емкостные элементы*. Однако катушки индуктивности имеют значительное резистивное сопротивление и поэтому не могут рассматриваться в качестве идеальных индуктивных элементов.

1.4. Источники постоянного напряжения

Источник постоянного напряжения (ИПН) характеризуется следующими основными параметрами:

- электродвижущей силой (ЭДС) E ;

- внутренним сопротивлением R_0 ;
- напряжением U на зажимах (полюсах) источника.

Схема ИПН с подключенным к нему приемником R изображена на рис. 1.2, *а*. Основной характеристикой ИПН является его ВАХ (внешняя характеристика) – зависимость напряжения U на его зажимах от тока I источника (прямая 1 на рис. 1.2, *б*).

$$U = E - R_0 \cdot I, \quad (1.7)$$

Уменьшение напряжения U источника при увеличении тока объясняется увеличением падения напряжения на внутреннем сопротивлении R_0 источника (произведение $R_0 \cdot I$ в (1.7)).

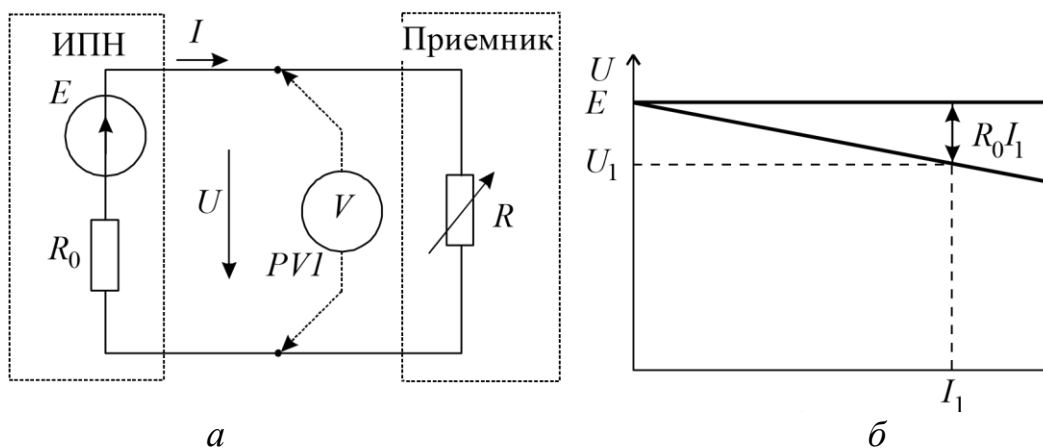


Рис. 1.2. Схема источников постоянного напряжения:
а – простейшей электрической цепи; *б* – ВАХ ИПН

Прямая 2 соответствует ВАХ идеального ИПН, у которого $R_0 = 0$.

Анализ (1.7) позволяет сделать следующие выводы:

- при токе источника $I = 0$ (холостой ход источника) напряжение источника равно его ЭДС: $U = E_{I=0}$;
- ЭДС источника – это его напряжение в режиме холостого хода;
- по известной ВАХ источника (рис. 1.2, *б*) можно определить его внутреннее сопротивление по формуле

$$R_0 = \frac{E - U_1}{I_1}; \quad (1.8)$$

- ЭДС источника (рис.1.2, *а*) можно измерить в режиме холостого хода вольтметром $pV1$ с относительно большим внутренним сопротивлением R_V , так как при ($R_V \gg R_0$) из (1.7) имеем

$$E = U_V + R_0 I = I R_V + R_0 I \approx U_V. \quad (1.9)$$

Лекция 2. Электрические цепи постоянного тока

2.1. Общие сведения

Электротехнические устройства, установки и системы постоянного тока имеют большое практическое применение на транспорте (двигатели подъемных механизмов, трамваев, троллейбусов, электровозов, электрокар) при электрохимическом получении металлов (электролизные ванны), в космической технике, в радиоэлектронике, компьютерной технике и т.д.

Применение высоковольтных ЛЭП постоянного тока большой протяженности экономически оказывается более целесообразно, чем ЛЭП переменного тока.

Первые шаги электротехники были связаны с освоением энергии постоянного тока, которая вырабатывалась гальваническими элементами.

В настоящее время основными источниками постоянного тока (ИПТ) являются выпрямительные преобразователи (выпрямители), химические аккумуляторы, электромашинные генераторы постоянного тока.

Развиваются и совершенствуются новые виды ИПТ:

– источники, преобразующие лучистую энергию Солнца при помощи фотоэлементов, являющихся основными источниками электрической энергии космических аппаратов;

– магнитогидродинамические генераторы (МГД-генераторы);

– электрохимические ИПТ для электромобилей, в которых электрическая энергия будет получаться в результате реакции кислорода атмосферного воздуха с бензиновым топливом.

В электротехнике решаются две задачи:

1) синтез электротехнических устройств; 2) анализ этих устройств.

Задача *синтеза* решается при создании новых устройств конструкторами, это наиболее сложная задача. Анализ работы электроустройств чаще всего необходимо проводить уже при их эксплуатации, поэтому существуют типовые задачи анализа.

Как правило, задача *анализа* состоит в определении токов и напряжений на всех участках электрической цепи. При этом конфигурация цепи и параметры ее элементов (ВАХ источников и потребителей энергии, электрические сопротивления токопроводов и др.) считаются известными.

Как уже отмечалось, при анализе (расчете режима работы) электрической цепи необходимо эту цепь представить и изобразить графически схемой, в которой элементы электрической цепи представлены в виде соединений идеализированных элементов – резистивного R , индуктивного L и емкостного C , а источники электрической энергии представляются как

последовательное соединение ЭДС и внутренних сопротивлений этих источников.

Однако при анализе электрических цепей *постоянного тока* пассивными элементами схем являются только резистивные элементы, т. к. сопротивления индуктивных элементов ($X_L = \omega L$) постоянному току равны нулю, а сопротивления емкостных элементов ($X_C = 1/(\omega C)$) при этом равны бесконечности, так что емкостные элементы разрывают электрические цепи постоянного тока.

2.2. Законы Кирхгофа

Законы Кирхгофа лежат в основе анализа электрических цепей.

2.2.1. Первый закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма токов в узле электрической цепи равна нулю.

Узел – место соединения трех и более ветвей.

Математически это записывается так:

$$\sum I = 0. \quad (2.1)$$

Всем токам, направленным *от узла*, в уравнении (2.1) приписывается одинаковый знак, например, *положительный*, тогда все токи, направленные *к узлу*, войдут в уравнение с *отрицательным* знаком.

На рис. 2.1 показан узел, в котором сходятся четыре ветви. **Ветвь** – участок цепи, заключенный между двумя узлами, по которому протекает один и тот же ток. Уравнение (2.1) в этом случае принимает вид

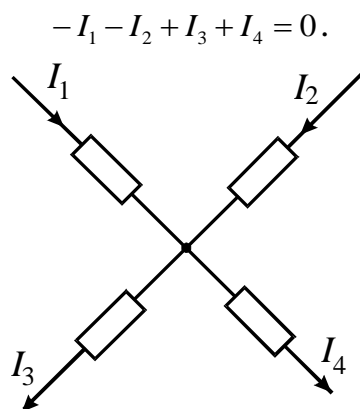


Рис. 2.1. Узел, в котором сходятся четыре ветви (первый закон Кирхгофа)

Первый закон Кирхгофа отражает тот факт, что в узле электрический заряд не накапливается и не расходуется. Сумма электрических зарядов, приходящих к узлу, равна сумме зарядов, уходящих от узла за один и тот же промежуток времени.

2.2.2. Второй закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма ЭДС в любом контуре цепи равна алгебраической сумме напряжений на элементах этого контура:

$$\sum E = \sum U. \quad (2.2)$$

Контур – замкнутый путь по нескольким ветвям.

Если в рассматриваемом контуре отсутствуют ЭДС, то уравнение (2.2) принимает вид

$$\sum U = 0. \quad (2.3)$$

При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа выбирают произвольное направление обхода контура (рис. 2.2). При этом ЭДС и напряжения, совпадающие с направлением обхода, берутся с одинаковыми знаками, например, со знаками «+».

Например, для схемы (рис. 2.2) имеем

$$E_1 - E_2 = U_1 + U_2 + U_3 - U_4;$$

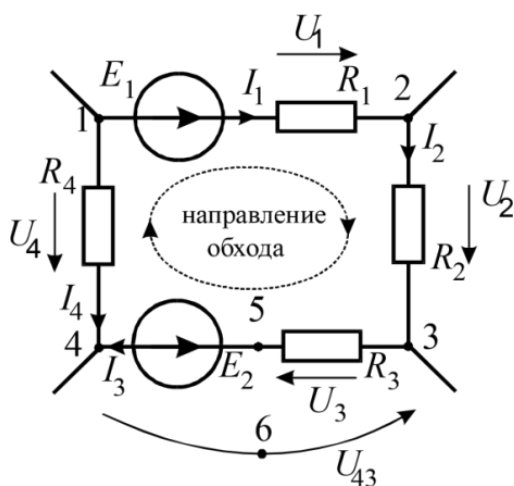


Рис. 2.2. Произвольное направление обхода контура (второй закон Кирхгофа)

Второй закон Кирхгофа можно применять и для контуров, которые состоят не только из участков схемы, но и из напряжений между

какими-либо точками схемы. Так, для контура 4 – 5 – 3 – 6 – 4, состоящего из участка цепи 4 – 5 – 3 и напряжения 4 – 6 – 3, можно составить уравнение

$$E_2 = -I_3 R_3 - U_{43},$$

где U_{43} – напряжение между точками 4 и 3 схемы, V .

2.3. Распределение потенциала вдоль электрической цепи

Рассмотрим неразветвленную электрическую цепь постоянного тока (ЭЦПТ), содержащую резисторы с сопротивлениями R и источниками ЭДС E (рис. 2.3).

Примем потенциал одной из точек ЭЦПТ, равным нулю $\phi_0 = 0$. Тогда можем найти потенциалы остальных точек схемы при известных значениях силы тока I , ЭДС E_1, E_2, E_3 и сопротивлений R_1, R_2, R_3 :

$$\left. \begin{aligned} \phi_1 &= \phi_0 + E_1 \\ \phi_2 &= \phi_1 - IR_1 \\ \phi_3 &= \phi_2 - E_2 \\ \phi_4 &= \phi_3 - IR_2 \\ \phi_5 &= \phi_4 + E_3 \\ \phi_0 &= \phi_5 - IR_3 \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

График изменения потенциала (иллюстрация второго закона Кирхгофа) в соответствии с формулами (2.4) представлен на рис. 2.3, б.

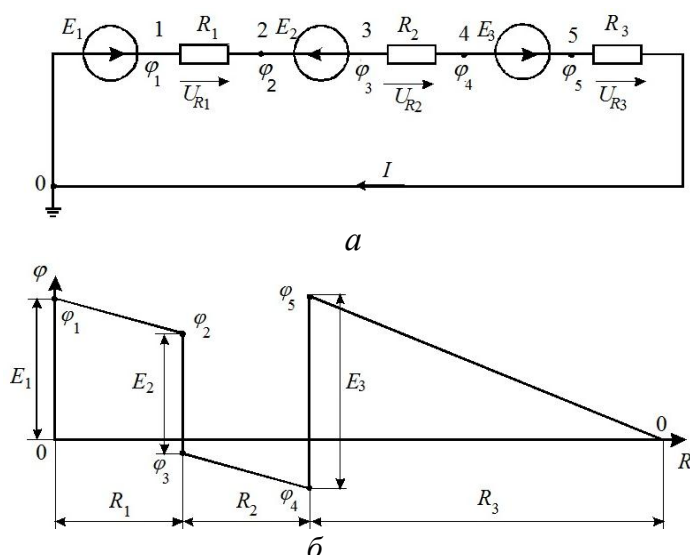


Рис. 2.3. Неразветвленная электрическая цепь постоянного тока:
а – схема ЭЦПТ; б – график изменения потенциала

2.4. Последовательное и параллельное соединения резистивных элементов

2.4.1. Последовательное соединение

Рассмотрим цепь с последовательным соединением резисторов с соответствующими сопротивлениями R_1, R_2 (рис. 2.4).

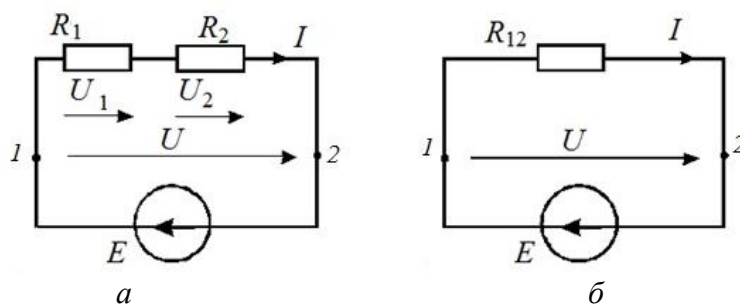


Рис. 2.4. Цепь с последовательным соединением резисторов:
a – схема ЭЦ с последовательным соединением резисторов;
б – упрощенная схема этой цепи с эквивалентным сопротивлением

Ток I , протекающий по этим резисторам, один и тот же. Напряжения U_1 и U_2 на каждом из резисторов различны.

На основании второго закона Кирхгофа можно записать

$$U = U_1 + U_2, \quad (2.5)$$

где U – напряжение источника ЭДС, приложенное к обоим резисторам, В.

Применяя закон Ома, перепишем уравнение (2.5):

$$U = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2) = IR_{12}, \quad (2.6)$$

где R_{12} – общее (эквивалентное) сопротивление всей цепи относительно зажимов 1 и 2, Ом.

Полученные результаты можно распространить на n последовательно соединенных резисторов, а именно:

$$R_{1,2,\dots,n} = R_1 + R_2 + \dots + R_n. \quad (2.7)$$

Сопротивление цепи, состоящей из нескольких последовательно соединенных резистивных элементов, равно сумме их сопротивлений.

2.4.2. Параллельное соединение

Такой участок цепи имеет одно и то же напряжение, а токи на резисторах разные (рис. 2.5). На основании первого закона Кирхгофа можно записать

$$I = I_1 + I_2.$$

По закону Ома:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}$$

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) = \frac{U}{R_{12}}, \quad (2.8)$$

где R_{12} – общее эквивалентное сопротивление цепи, Ом.

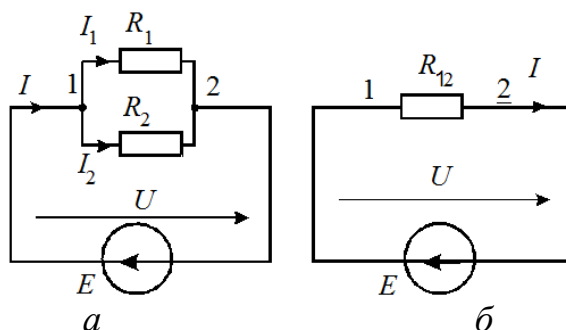


Рис. 2.5. Параллельное соединение:

a – схема ЭЦ с параллельным соединением резисторов;
б – упрощенная схема этой цепи с эквивалентным сопротивлением

Выражение (2.8) можно распространить на случай n параллельно соединенных резистивных элементов. Тогда

$$\frac{1}{R_{1,2,\dots,n}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}. \quad (2.9)$$

Если вместо сопротивлений резисторов ввести понятие *электрической проводимости*, равной $G_1 = \frac{1}{R_1}$, $G_2 = \frac{1}{R_2}$ и т. д., получим

$$G_{1,2,\dots,n} = G_1 + G_2 + \dots + G_n. \quad (2.10)$$

Общая эквивалентная проводимость $G_{1,2,\dots,n}$ (См – Сименс) электрической цепи, состоящей из n параллельно соединенных резистивных элементов, равна сумме их проводимостей $G_1 + G_2 + \dots + G_n$.

Параллельное включение – основной способ включения в ЭЦ различных приемников (потребителей) электрической энергии.

2.5. Электрическая энергия и мощность

В любой электрической цепи электрическая энергия (а также мощность), вырабатываемая источниками, равна энергии (мощности), потребляемой приемниками.

Согласно закону Джоуля-Ленца энергия, потребляемая резистивным элементом (резистором) с сопротивлением R , определяется по формулам:

$$W = I^2 R t ; W = \left(\frac{U^2}{R} \right) \cdot t, \quad W = U I t. \quad (2.11)$$

В электрической цепи постоянного тока мощность P равна отношению энергии W к промежутку времени t , в течение которого энергия была выработана источником или преобразована приемником электрической энергии.

$$P = \frac{W}{t}. \quad (2.12)$$

Мощность численно равна энергии W , если промежуток времени t равен единице.

Из (2.11) и (2.12) получаем выражения для расчета мощности резистивного приемника:

$$P_{np} = I^2 R = \frac{I^2}{G}; P_{np} = \frac{U^2}{R} = U^2 G; \quad P_{np} = U I. \quad (2.13)$$

Если направление ЭДС и тока через источник совпадают, то мощность, вырабатываемая источником с ЭДС E , равна

$$P_u = E \cdot I.$$

В противном случае мощность источника отрицательна

$$P_u = -E \cdot I$$

и ее относят к мощности приемника.

Для любой электрической цепи можно записать уравнение баланса мощностей

$$P_u = P_n,$$

или

$$\sum E_i I_i = \sum I_i^2 R_i. \quad (2.14)$$

В левой части уравнения (2.14) находятся мощности, вырабатываемые всеми источниками электрической энергии, в правой – мощности, преобразуемые (потребляемые) всеми приемниками электрической энергии.

Основными единицами электрической энергии (ЭЭ) и мощности являются 1 Джоуль (1 Дж = 1 Вт·с) и 1 Ватт (1 Вт = 1 Дж/с = 1 ВА). Для мощности и энергии промышленных установок часто используются более крупные единицы: 1 киловатт (1 кВт = 10^3 Вт), 1 мегаватт (1 МВт = 10^6 Вт), 1 киловатт-час (1 кВт·ч = $3,6 \cdot 10^6$ Вт·с).

2.6. Номинальные величины источников и приемников. Режимы работы электрических цепей

Каждый приемник электрической энергии характеризуется номинальными величинами, которые приводятся в справочной литературе, на щитке, прикрепленном к корпусу.

К **номинальным величинам** приемников относят номинальное напряжение U_n , мощность P_n и ток I_n (например, на лампах накаливания имеется штамп, в котором указывается номинальное напряжение и мощность).

В качестве номинальных величин аккумуляторов указываются напряжение и емкость (в ампер-часах), которая показывает, какое количество электричества может пройти через аккумулятор, пока его напряжение не снизится до некоторого минимального значения.

Электрические цепи могут работать в различных режимах.

Номинальным режимом работы какого-либо элемента электрической цепи (источника, приемника) считается такой режим, в котором данный элемент работает при номинальных величинах $U_{ном}, I_{ном}, P_{ном}$. Для большинства приемников: $U_{ном} = 12, 24, 36, 110, 127, 220, 440$ В.

Согласованным называется режим, при котором мощность, отдаваемая источником или потребляемая приемником, имеет максимальное значение (применяется в радиотехнических цепях, устройствах автоматики и телемеханики и в других слаботочных цепях, где необходимо передать от источника к приемнику наибольшую мощность). Максимальные значения мощностей получаются при определенном соотношении (согласовании) параметров ЭЦ. При этом:

$$R_{л} = R_{нагр}; U_{л} = U_{нагр}; P_{л} = P_{нагр},$$

где $R_{л}, U_{л}, P_{л}$ – соответственно сопротивление проводов в линии, напряжение линии, мощность в линии;

$R_{нагр}, U_{нагр}, P_{нагр}$ – соответственно сопротивление, напряжение и мощность нагрузки.

В этом режиме коэффициент полезного действия (КПД) электрической цепи

$$\eta = 50 \%$$

Под **режимом холостого хода** (ХХ) понимается такой режим, при котором через источник или приемник не протекает ток. При этом источник не отдает энергию во внешнюю цепь, а приемник не потребляет ее:

$$R_{\text{нагр}} = \infty; I_0 = 0 \text{ (ток холостого хода); } \eta = 100 \%$$

Режимом короткого замыкания (КЗ) называется режим, возникающий при соединении между собой без какого-либо сопротивления (накоротко) зажимов источника или иных элементов электрической цепи, между которыми имеется напряжение, т. е.

$$R_{\text{нагр}} = 0; I_{\text{кз}} \gg I_{\text{ном}}; \eta = 0 \%$$

Режим короткого замыкания может быть следствием нарушения изоляции, обрыва проводов, ошибки оператора при сборке электрической цепи и других недостатков. При коротком замыкании могут возникнуть недопустимо большие токи, электрическая дуга, что может привести к тяжелым последствиям, поэтому режим короткого замыкания является аварийным.

Лекция 3. Линейные однофазные электрические цепи синусоидального тока

3.1. Основные величины, характеризующие синусоидальные ток, напряжение и ЭДС

Этими основными величинами являются:

- мгновенное значение;
- амплитудное значение;
- начальная фаза;
- действующее значение;
- среднее значение;
- комплекс действующего или амплитудного значения и другие величины.

3.1.1. Мгновенное значение

Мгновенное значение величины a показывает закон ее изменения и записывается в виде

$$a = A_m \sin(\omega t + \psi), \quad (3.1)$$

где A_m – амплитуда (максимальное значение) величины; ω – угловая частота, рад/с; t – текущее значение времени, с; ψ – начальная фаза.

Мгновенные значения тока i , напряжения u или ЭДС e записываются в виде:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad (3.2)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u); \quad (3.3)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi_e). \quad (3.4)$$

Аргумент синуса $(\omega t + \psi)$ называется **фазой**. Угол ψ равен фазе в начальный момент времени $t = 0$ и поэтому называется **начальной фазой**.

Угловая частота ω связана с периодом T и частотой $f = 1/T$ формулой

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad \text{или} \quad \omega = 2\pi f. \quad (3.5)$$

Частота f , равная числу колебаний в $(f = 1/T)$ 1 с., измеряется в герцах (Гц). При $f = 50$ Гц имеем $\omega = 314$ рад/с.

На рис. 3.1 изображены графики синусоидальных токов одинаковой частоты, но с различными амплитудами и начальными фазами:

$$i_1 = I_{m1} \sin(\omega t + \psi_1);$$

$$i_2 = I_{m2} \sin(\omega t - \psi_2).$$

По оси абсцисс отложено время t и величина ωt , пропорциональная времени и измеряемая в радианах.

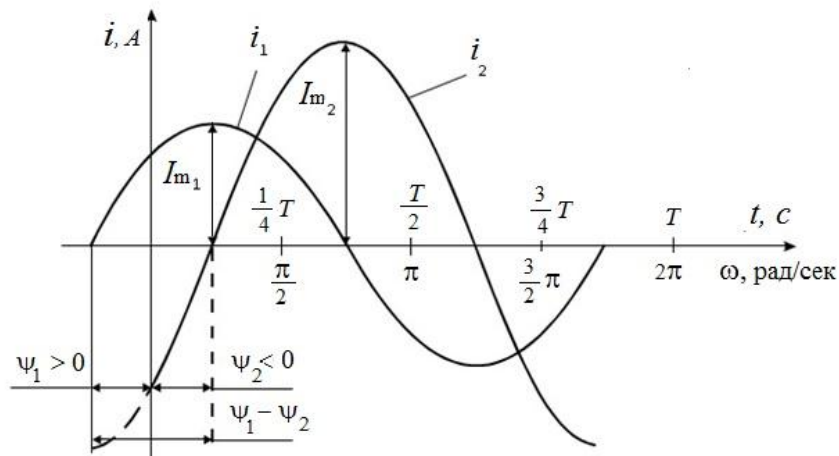


Рис. 3.1. График синусоидальных токов одинаковой частоты, но с различными амплитудами и начальными фазами

Начальный фазный угол отсчитывается от начала синусоиды, т. е. от момента перехода синусоиды от отрицательных к положительным значениям до момента времени $t = 0$ (начало координат). При $\psi_1 > 0$ начало синусоиды сдвинуто влево, а при $\psi_2 < 0$ вправо от начала координат.

Если у нескольких синусоидальных функций, изменяющихся с одинаковой частотой, начала синусоид не совпадают, то говорят, что они сдвинуты друг относительно друга по фазе.

Сдвиг фаз измеряется разностью фаз, которая равна разности начальных фаз. На рис. 3.1 $\psi_1 - \psi_2 > 0$, т. е. ток i_1 опережает по фазе ток i_2 на угол $\varphi = \psi_1 - \psi_2$, или, что то же самое, ток i_2 отстает по фазе от тока i_1 на угол $\varphi = \psi_1 - \psi_2$.

Если у синусоидальных функций одной частоты одинаковые начальные фазы, то говорят, что они совпадают по фазе; если разность их фаз равна $\pm\pi$, то говорят, что они противоположны по фазе (в противофазе). И если разность их фаз равна $\pm\pi/2$, то говорят, что они находятся в квадратуре.

Наибольшее распространение в электротехнике получил синусоидальный ток частотой 50 Гц, которая принята за стандартную в России. В США и Японии стандартной является частота $f = 60$ Гц.

Диапазон частот, применяемых на практике синусоидальных токов и напряжений, очень широк: от долей герца, например, в геологоразведке, до десятков тысяч мегагерц (МГц) в радиолокации.

Синусоидальные токи и напряжения низких частот (до нескольких килогерц) получают с помощью синхронных генераторов, в которых используется принцип получения синусоидального напряжения путем вращения витка с постоянной угловой скоростью в однородном магнитном поле. Этот принцип основан на явлении электромагнитной индукции, открытом в 1831 году М. Фарадеем. Синусоидальные токи и напряжения высоких частот (ВЧ) получают с помощью ламповых или полупроводниковых генераторов.

3.1.2. Действующее и среднее значения синусоидальных токов и напряжений

Согласно закону Джоуля-Ленца тепловая энергия Q , выделяемая в резисторе с сопротивлением R при протекании по нему постоянного тока I_0 в течение промежутка времени t , равна

$$Q = I_0^2 \cdot R \cdot t . \quad (3.6)$$

Для синусоидального тока формулу (3.6) можно применить лишь для определения тепловой энергии dQ , выделившейся в резисторе с сопротивлением R за бесконечно малый промежуток времени dt , в течение которого силу тока i можно считать не изменяющейся, т. е.

$$dQ = i^2 R dt . \quad (3.7)$$

За период времени T выделившаяся энергия

$$Q = \int_0^T i^2 R dt . \quad (3.8)$$

Пусть $i = I_m \sin \omega t$, тогда

$$Q = \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t R dt = I_m^2 R \int_0^T \sin^2 \omega t dt = \frac{I_m^2}{2} RT .$$

Введем величину $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$, называемую *действующим значением синусоидального тока*, и, подставив ее в последнее выражение, получим

$$Q = I^2 RT . \quad (3.9)$$

Сопоставив формулу (3.9), полученную для синусоидального тока, с формулой (3.6), справедливой для постоянного тока, делаем следующий вывод: *действующее значение синусоидального тока равно такому значению постоянного тока, который за один период выделяет в том же резисторе такое же количество тепла, как и синусоидальный ток.*

Аналогично существуют понятия действующих значений синусоидальных напряжений и ЭДС:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}; E = \frac{E_m}{\sqrt{2}}. \quad (3.10)$$

Из формул (3.8) и (3.9) получаем

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (3.11)$$

В силу (3.11) действующее значение синусоидального тока часто называют *среднеквадратичным* или *эффективным* значениями.

Действующие значения токов и напряжений показывают большинство электроизмерительных приборов (амперметров, вольтметров). В действующих значениях указываются номинальные токи и напряжения в паспортах различных электроприборов и устройств.

Под *средним значением* синусоидального тока понимают его среднее значение за полпериода

$$I_{\text{cp}} = \frac{1}{T/2} \int_0^{T/2} I_m \sin \omega t dt = \frac{2}{\pi} I_m, \quad (3.12)$$

т. е. среднее значение синусоидального тока составляет $\frac{2}{\pi} = 0,638$ от амплитудного значения. Аналогично $E_{\text{cp}} = 2E_m/\pi, U_{\text{cp}} = 2U_m/\pi$.

3.1.3. Изображение синусоидальных токов, напряжений и ЭДС комплексными числами и векторами

В основу метода комплексных чисел приняты следующие положения:

- любой вектор синусоидальной величины можно разложить на составляющие, направленные по двум осям прямоугольной системы координат;
- ось абсцисс – ось действительных чисел;
- ось ординат – ось мнимых чисел.

Составляющую вектора по мнимой оси выделяем посредством множителя $-j$ (рис. 3.2).

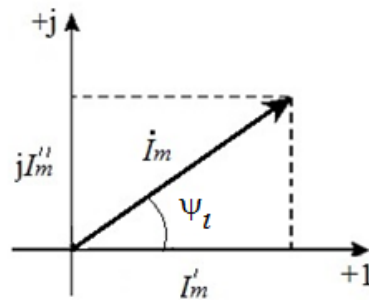


Рис. 3.2. Изображение синусоидального тока на комплексной плоскости вектором \dot{I}

Синусоидально изменяющийся ток i изображается комплексным числом

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \Leftrightarrow I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}. \quad (3.13)$$

Принято изображение тока находить для момента времени $t = 0$, т. е.:

$$i = I_m \sin \psi_i = \dot{I}_m \Leftrightarrow I_m e^{j\psi_i}. \quad (3.14)$$

Величину \dot{I}_m называют комплексной амплитудой тока, или комплексом амплитуды тока.

Под комплексом действующего значения тока или под комплексом тока \dot{I} понимают частное от деления комплексной амплитуды тока на $\sqrt{2}$:

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot e^{j\psi_i} = I \cdot e^{j\psi_i}. \quad (3.15)$$

Тогда комплексное число, соответствующее точке, в которой лежит конец вектора, может быть записано в трех формах.

1. *Алгебраическая форма записи*

$$\dot{I}_m = I'_m + jI''_m, \quad (3.16)$$

где $I'_m = I_m \cos \psi_i$ — действительная часть комплексного числа;

$I''_m = jI_m \sin \psi_i$ — мнимая часть комплексного числа;

$I_m = \sqrt{(I'_m)^2 + (I''_m)^2}$ — модуль комплексной амплитуды.

2. Тригонометрическая форма записи

$$\dot{I}_m = I_m \cos \psi_i + j I_m \sin \psi_i, \quad (3.17)$$

где $\psi_i = \arctg\left(\frac{I_m''}{I_m'} – аргумент комплексного числа.$

3. Показательная форма записи комплексного числа получается из формулы Эйлера $\rightarrow \cos \psi_i + j \sin \psi_i = e^{\pm j\psi_i}$:

$$\dot{I}_m = I_m e^{j(\omega t \pm \psi_i)}. \quad (3.18)$$

Для единообразия принято на комплексной плоскости изображать векторы синусоидально изменяющихся величин во времени для момента времени $\omega t = 0$, для которого показательная форма

$$\dot{I}_m = I_m e^{\pm j\psi_i}, \quad (3.19)$$

для действующего значения

$$i_m = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{\pm j\psi_i}. \quad (3.20)$$

Под комплексами напряжения и ЭДС понимают подобные выражения:

$$\dot{U}_m = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{\pm j\psi_i}, \quad (3.21)$$

$$\dot{E}_m = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{\pm j\psi_i}. \quad (3.22)$$

Комплексы тока, напряжения и ЭДС изображаются так же на комплексной плоскости векторами.

Пример 3.1. Ток $i = 2 \sin(\omega t + 30^\circ)$ А. Записать выражение для комплексной амплитуды этого тока.

Решение. В данном случае $I_m = 2$ А, $\psi = 30^\circ$. Следовательно,

$$\dot{I}_m = 2 \cdot e^{j30^\circ} = (2 \cos 30^\circ + j \cdot 2 \sin 30^\circ) = \sqrt{3} + j \cdot 1 \text{ А.}$$

Пример 3.2. Представить комплексный ток $\dot{I} = (4 + j3)$ А в тригонометрической и показательной формах записи.

Решение. Определим модуль комплексного тока: $I = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5$ А.

Для тригонометрической формы записи вычислим аргумент комплексного числа (3.17): $\psi = \arctg \frac{3}{4} = 36^\circ 50'$

$$\dot{I} = (4 + j3) = I(\cos \psi + j \sin \psi) = 5(\cos 36^\circ 50' + j \sin 36^\circ 50').$$

Показательная форма записи

$$\dot{I} = (4 + j3) = Ie^{j\psi} = 5e^{j36^\circ 50'}.$$

3.2. Элементы электрических цепей синусоидального тока

Основные элементы электрических цепей синусоидального тока:

- источники электрической энергии (источники ЭДС и источники тока);
- резистивные элементы (резисторы, реостаты, нагревательные элементы и т. д.);
- емкостные элементы (конденсаторы);
- индуктивные элементы (катушки индуктивности).

3.2.1. Резистивный элемент (РЭ)

На рис. 3.4, а изображен РЭ, по которому течет ток

$$i = I_m \sin \omega t. \quad (3.23)$$

По закону Ома напряжение РЭ:

$$u = i \cdot R = R \cdot I_m \sin \omega t = U_m \sin \omega t, \quad (3.24)$$

где $U_m = R \cdot I_m$.

Из формул (3.23) и (3.24) следует следующий вывод: *ток и напряжение в резистивном элементе совпадают по фазе (изменяются синфазно)*. Это положение наглядно иллюстрируется на рис. 3.4, б, в. Из формул (3.24) следует другой вывод: *закон Ома выполняется как для амплитудных значений тока и напряжения*

$$U_m = R \cdot I_m, \quad (3.25)$$

так и для действующих значений тока и напряжения

$$U = R \cdot I. \quad (3.26)$$

Выразим мгновенную мощность p через мгновенные значения тока i и напряжения u :

$$p = u \cdot i = U_m \cdot I_m \sin \omega t \sin \omega t = \frac{U_m \cdot I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) = U \cdot I \cdot (1 - \cos 2\omega t). \quad (3.27)$$

График изменения мощности p во времени представлен на рис. 3.3, *г*. Анализ графика и формулы позволяют сделать выводы:

- мгновенная мощность p имеет постоянную составляющую $\frac{U_m \cdot I_m}{2} = U \cdot I$ и переменную составляющую $\left(\frac{U_m \cdot I_m}{2}\right) \cos 2\omega t$, изменяющуюся с частотой 2ω ;
- мощность в любой момент времени положительна ($p > 0$). Это значит, что в резистивном элементе происходит *необратимое* преобразование электрической энергии в другие виды энергии («потребление» энергии).

Под активной мощностью понимают среднее значение мгновенной мощности p за период T , т. е.

$$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p_a dt = U_a I. \quad (3.28)$$

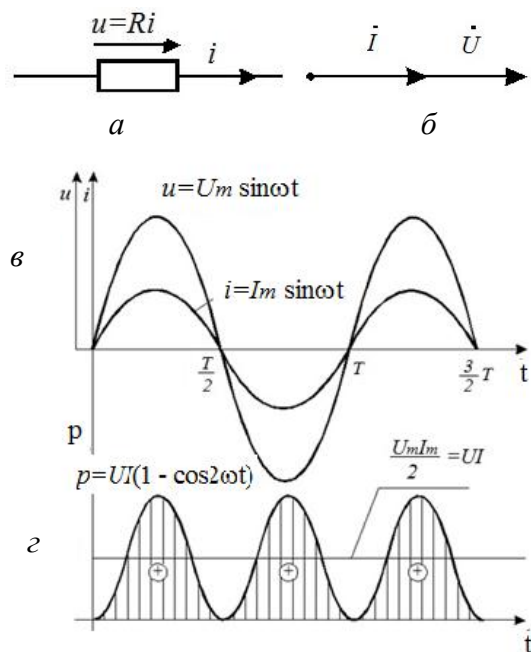


Рис. 3.3. Резистивный элемент: *а* – изображение на схеме; *б* – векторы тока и напряжения; *в* – графики тока и напряжения; *г* – график мгновенной мощности

3.2.2. Индуктивный элемент (ИЭ)

Классическим примером индуктивного элемента (ИЭ) является катушка индуктивности – провод, намотанный на изоляционный каркас (рис. 3.4, *а*)

На рис. 3.4, б изображен индуктивный элемент, по которому течет ток

$$i_L = I_m \sin \omega t . \quad (3.29)$$

Согласно закону электромагнитной индукции, напряжение на индуктивном элементе

$$u_L = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d(L \cdot i)}{dt} = L \cdot \frac{di_L}{dt}, \text{ т. е. } u_L = L \cdot \frac{di_L}{dt}, \quad (3.30)$$

где Φ – магнитный поток, сконцентрированный внутри индуктивного элемента (катушки индуктивности);

L – индуктивность элемента (коэффициент пропорциональности между магнитным потоком и током в индуктивном элементе), для линейного индуктивного элемента индуктивность $L = \text{const}$.

Подставляя в (3.30) выражение (3.29), получим

$$u_L = \omega \cdot L \cdot I_m \cos \omega t = U_m \sin(\omega t + 90^\circ), \quad (3.31)$$

где $U_m = \omega \cdot L \cdot I_m = X_L \cdot I_m$.

Величина $X_L = \omega \cdot L$ называется **индуктивным сопротивлением**, измеряется в Омах, и зависит от частоты ω .

Сопоставляя выражения (3.30) и (3.31), сделаем важный вывод: *ток в индуктивном элементе отстает по фазе от напряжения на $\frac{\pi}{2}$ (90°).*

Это положение иллюстрируется на рис. 3.4, в, г. Из формулы (3.31) следует:

- индуктивный элемент оказывает синусоидальному (переменному) току сопротивление, модуль которого $X_L = \omega \cdot L$ прямо пропорционален частоте;
- закон Ома выполняется как для амплитудных значений тока и напряжения

$$U_m = X_L \cdot I_m, \quad (3.32)$$

так и для действующих значений:

$$U_m = X_L \cdot I_m \Rightarrow \frac{U_m}{\sqrt{2}} = X_L \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow U = X_L \cdot I. \quad (3.33)$$

Выразим мгновенную мощность p через i и u :

$$p = u \cdot i = U_m \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \sin 2\omega t = U \cdot I \sin 2\omega t . \quad (3.34)$$

График изменения мощности p со временем построен на основании формулы (3.34) на рис. 3.4, д. Анализ графика и (3.34) позволяют сделать следующие выводы:

- мгновенная мощность на индуктивном элементе имеет только переменную составляющую $\left(\frac{U_m \cdot I_m}{2}\right) \sin 2\omega t = U \cdot I \sin 2\omega t$, изменяющуюся с двойной частотой (2ω);
- мощность периодически меняется по знаку: то положительна, то отрицательна. Это значит, что в течение одних четверть периодов, когда $p > 0$, энергия запасается в индуктивном элементе (в виде энергии магнитного поля), а в течение других четверть периодов, когда $p < 0$, энергия возвращается в электрическую цепь. Эта мощность называется реактивной (индуктивной) Q_L , единицы измерения – Вар.

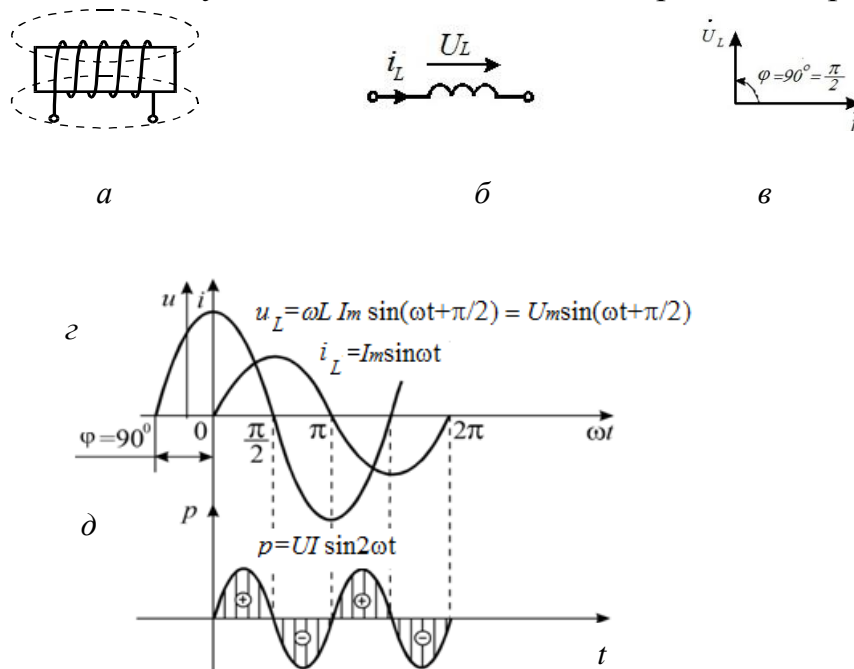


Рис. 3.4. Индуктивный элемент: а – схема конструкции катушки индуктивности; б – изображение индуктивного элемента на схеме; в – векторы тока и напряжения; г – графики тока и напряжения; д – график мгновенной мощности.

3.2.3. Емкостный элемент (ЕЭ)

Примером емкостного элемента является плоский конденсатор – две параллельные пластины, находящиеся на небольшом расстоянии друг от друга (рис. 3.5, а).

Пусть к емкостному элементу приложено напряжение (рис. 3.5, б):

$$u_c = U_m \sin \omega t . \quad (3.35)$$

На пластинах емкостного элемента появится заряд q , пропорциональный приложенному напряжению $q = C \cdot u_c$.

Ток в рассматриваемой цепи

$$i_c = \frac{dq}{dt}. \quad (3.36)$$

Подставляя выражение (3.35) в (3.36), получим следующее соотношение:

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{dU_{mC} \sin \omega t}{dt} = C\omega U_{mC} \cos \omega t = C\omega U_{mC} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (3.37)$$

Амплитуда тока на емкостном участке определится

$$I_{mC} = C\omega U_{mC}. \quad (3.38)$$

Тогда ток на емкости

$$i_c = I_{mC} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right). \quad (3.39)$$

Сравнивая формулы (3.35) и (3.39), видно, что ток в цепи, содержащей емкость, изменяется синусоидально так же, как и напряжение, но опережает его по фазе на 90° .

Анализ выражений (3.38) и (3.39) позволяет сделать и другие выводы:

- емкостный элемент оказывает синусоидальному (переменному) току сопротивление, модуль которого $X_C = \frac{1}{\omega C}$ [Ом] обратно пропорционален частоте;
- закон Ома выполняется как для амплитудных значений тока и напряжения

$$U_m = X_C I_m, \quad (3.40)$$

так и для действующих значений:

$$U_m = X_C I_m \rightarrow \frac{U_m}{\sqrt{2}} = X_C \frac{I_m}{\sqrt{2}} \rightarrow U_C = X_C I_C. \quad (3.41)$$

Выразим мгновенную мощность p через i и u :

$$p = u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \cos \omega t = \frac{U_m \cdot I_m}{2} \sin 2\omega t = U \cdot I \sin 2\omega t. \quad (3.42)$$

График изменения мощности p со временем построен на рис. 3.5, д. Анализ графика и (3.42) позволяют сделать следующие выводы:

- мгновенная мощность на емкостном элементе имеет только переменную составляющую $\frac{U_m \cdot I_m}{2} \sin 2\omega t = U \cdot I \cdot \sin 2\omega t$ и изменяющуюся с двойной частотой (2ω).
- мощность периодически меняется по знаку: то положительна, то отрицательна. Это значит, что в течение одних четверть периодов, когда $p > 0$, энергия запасается в емкостном элементе (в виде энергии электрического поля), а в течение других четверть периодов, когда $p < 0$, энергия возвращается в электрическую цепь. Такая мощность является реактивной (емкостной) Q_C .

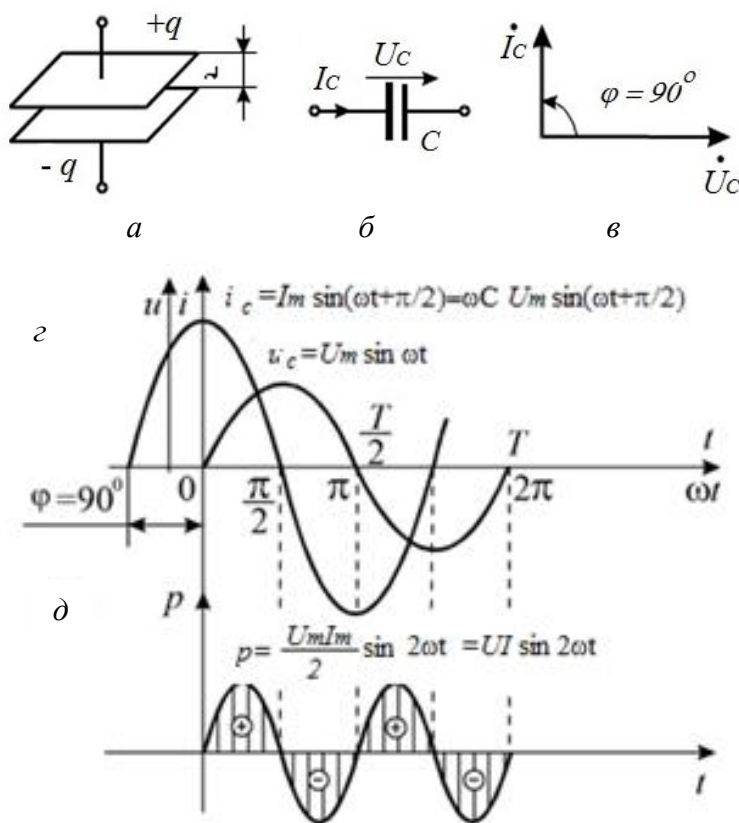


Рис. 3.5. Емкостный элемент: а – схема конструкции плоского конденсатора; б – изображение емкостного элемента на схеме; в – векторы тока и напряжения на емкостном элементе; г – графики мгновенных значений тока и напряжения; д – график мгновенной мощности

3.3. Расчет неразветвленной электрической цепи синусоидального тока

Для расчета режима неразветвленной электрической цепи применим комплексный метод. Представим все синусоидальные величины их комплексами:

$$\begin{aligned}\dot{E} &= E \cdot e^{j\psi_e}; \quad \dot{I} = I \cdot e^{j\psi_i}; \quad \dot{U}_R = U_R \cdot e^{j\psi_{uR}}; \\ \dot{U}_L &= U_L \cdot e^{j\psi_{uL}}; \quad \dot{U}_C = U_C \cdot e^{j\psi_{uC}}.\end{aligned}$$

Порядок расчета такой же, как на постоянном токе. Во-первых, стрелками изображаем положительные направления тока, ЭДС и напряжений. Во-вторых, выбираем направление обхода контура по направлению движения часовой стрелки и записываем уравнение по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_L + \dot{U}_R + \dot{U}_C = j\omega LI + RI - j\frac{1}{\omega C} \dot{I} = \dot{E}. \quad (3.43)$$

Выражения RI , $j\omega LI = jX_L I$, $-j\frac{1}{\omega C} \dot{I} = -jX_C I$ отражают особенности проявления закона Ома для резистивного, индуктивного и емкостного элементов электрической цепи:

$$\dot{U}_R = RI; \quad \dot{U}_L = jX_L \dot{I}; \quad \dot{U}_C = -jX_C \dot{I}.$$

Здесь умножение на $+j$ означает, что напряжение \dot{U}_L опережает по фазе ток \dot{I} на 90° , умножение на $-j$ означает, что напряжение \dot{U}_C отстает по фазе от тока \dot{I} на 90° .

Из (3.43) находим комплексный ток в цепи:

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} \quad (3.44)$$

или (так как $\dot{E} = \dot{U}$)

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}, \quad (3.45)$$

где $\dot{U} = U \cdot e^{j\varphi_u} = \dot{E} = E \cdot e^{j\varphi_e}$ – напряжение между выводами a и b неразветвленной цепи (рис. 3.6, a).

Величина \underline{Z} , стоящая в знаменателе, называется *комплексным сопротивлением* (неразветвленной цепи), т. е.

$$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + j(X_L - X_C). \quad (3.46)$$

Величина \underline{Y} , обратная комплексному сопротивлению, называется *комплексной проводимостью*, т. е.

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}.$$

На рис. 3.6, б построена векторная диаграмма тока и напряжений неразветвленной цепи для случая: $X_L > X_C$.

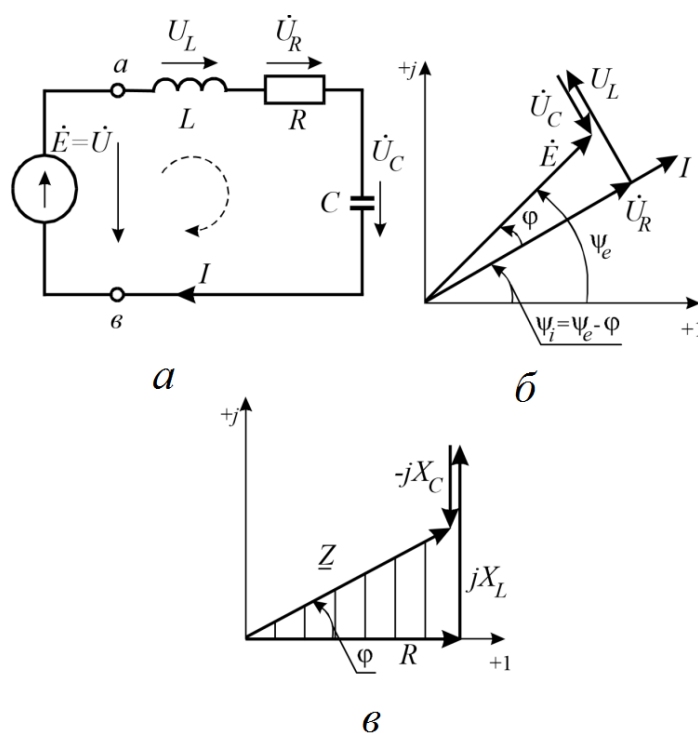


Рис. 3.6. Расчет неразветвленной электрической цепи синусоидального тока: а – схема электрической цепи; б – векторная диаграмма тока и напряжений; в – изображение комплексных сопротивлений на комплексной плоскости

Обычно векторная диаграмма строится в конце расчета по полученным значениям тока и напряжений. При этом проверяется правильность расчета. Поделив все составляющие векторной диаграммы на i , получаем значения комплексных сопротивлений и изображаем комплексные сопротивления R , jX_L , $-jX_C$, \underline{Z} на комплексной плоскости (рис. 3.6, в). Получаем диаграмму, подобную диаграмме тока и напряжений.

Обратим внимание на «треугольник сопротивлений» (заштрихованная площадь), стороны которого соответствуют сопротивлениям R ,

$X = X_L - X_C$ и \underline{Z} . Треугольник сопротивлений подобен треугольнику напряжений (рис. 3.6, б).

Анализ диаграммы сопротивлений позволяет перейти от алгебраической формы записи комплексного сопротивления к тригонометрической и показательной формам:

$$\underline{Z} = z \cdot \cos \phi + jz \cdot \sin \phi ; \quad (3.47)$$

$$\underline{Z} = z \cdot e^{j\phi} , \quad (3.48)$$

где $z = |\underline{Z}| = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ – модуль комплексного сопротивления или полное сопротивление;

$\phi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$ – аргумент комплексного сопротивления.

В зависимости от знака величины $(X_L - X_C)$ аргумент комплексного сопротивления может быть либо положительным (индуктивный характер), либо отрицательным (емкостный характер). Подставив (3.48) в (3.44) или в (3.45), получим закон Ома для неразветвленной цепи:

$$\dot{i} = \frac{\dot{E}}{\underline{Z}} = \left(\frac{E}{z} \right) \cdot e^{j(\psi_e - \phi)} \quad (3.49)$$

или

$$\dot{i} = I \cdot e^{j\psi_i} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \left(\frac{U}{z} \right) \cdot e^{j(\psi_u - \phi)} , \quad (3.50)$$

т. е.

$$I = \frac{U}{z} ; \quad \psi_i = \psi_u - \phi . \quad (3.51)$$

При нескольких последовательно соединенных элементах комплексное сопротивление

$$\underline{Z} = \sum R + j(\sum X_L - \sum X_C) = R + jX , \quad (3.52)$$

где $R = \sum R$ – активное сопротивление цепи;

$X = \sum X_L - \sum X_C$ – реактивное сопротивление цепи.

В активном сопротивлении происходит *необратимое* преобразование электрической энергии в другие виды энергии, а в реактивном сопротивлении – не происходит. Полное сопротивление и аргумент комплексного сопротивления можно рассчитывать по формулам:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} ; \quad (3.53)$$

$$\phi = \arctg \left(\frac{X}{R} \right) . \quad (3.54)$$

3.4. Мощность в линейных цепях синусоидального тока. Коэффициент мощности. Резонанс напряжений и токов в электрических цепях переменного тока

В линейных цепях синусоидального тока имеют место три вида мощности: активная P , реактивная Q и полная S .

Активная мощность – это мощность необратимого преобразования электрической энергии в другие виды энергии в резистивных элементах цепи. В источниках электрической энергии активная мощность P , Вт рассчитывается по формуле

$$P = U \cdot I \cdot \cos \phi, \quad (3.55)$$

где U – действующее значение напряжения в ИЭЭ, В;

I – действующее значение тока в ИЭЭ, А;

ϕ – угол сдвига фаз между током и напряжением.

В резистивных элементах *активная мощность* определяется как по формуле (3.57), так и по формуле

$$P = I^2 \cdot R, \quad (3.56)$$

где R – сопротивление резистивного элемента, Ом;

I – сила тока через него, А.

В реактивных элементах *реактивная мощность* Q , ВАр определяется по формулам:

$$Q = I^2 \cdot X ;$$

$$Q = UI \cdot \sin \phi ;$$

$$Q = Q_L - Q_C,$$

где Q_L – индуктивная мощность;

Q_C – емкостная мощность.

Полная мощность определяется по формулам:

$$S = \sqrt{P^2 + (Q_L^2 - Q_C^2)};$$

$$\dot{S} = \dot{U} \cdot \dot{I} = P + jQ,$$

где \dot{I} – комплексное значение тока, протекающего через соответствующий элемент, А;

\dot{U} – комплекс напряжения на этом элементе, В.

Связь полной и реактивной мощностей выражается формулой

$$P = S \cos \phi = UI \cos \phi,$$

откуда

$$\cos \phi = \frac{P}{UI}. \quad (3.57)$$

Отношение активной мощности P к полной называют **коэффициентом мощности** $\cos \phi$. Он показывает, какую долю всей вырабатываемой источником мощности составляет активная мощность.

Чем больше $\cos \phi$, тем экономичнее работает энергосистема, т.к. при одних и тех же значениях тока I и напряжения U источника можно получить большую активную мощность.

Также при определенных значениях напряжения и мощности источника можно передавать активную энергию меньшим током, что снижает потери в линии электропередачи. Так, например, если активная мощность передается при $\cos \phi = 1$, то ток в линии

$$I = \frac{P}{U \cos \phi} = \frac{P}{U},$$

где U – напряжение в линии.

Если активная мощность передается при $\cos \phi = 0,5$, то

$$I = \frac{P}{U \cos \phi} = \frac{P}{U \cdot 0,5} = 2 \frac{P}{U},$$

т. е. ток увеличился в 2 раза по сравнению с первым случаем.

Увеличение тока в 2 раза требует увеличения сечения проводов, что приводит к увеличению капитальных затрат, поэтому на промышленных предприятиях поддерживают $\cos \phi = 0,9 \dots 0,92$. Для этого параллельно нагрузке включают синхронные компенсаторы (синхронные двигатели облегченной механической конструкции, предназначенные для повышения $\cos \phi$) или батареи конденсаторов. Емкость батареи конденсаторов, определяется по формуле

$$C = \frac{P(\operatorname{tg} \phi_1 - \operatorname{tg} \phi_2)}{2\pi f U^2}, [\Phi],$$

где ϕ_1 – значение угла, при котором работает энергетическая установка;

ϕ_2 – значение угла, при котором должна работать энергетическая установка.

Резонансом называется такой режим в электрической цепи, содержащей катушки индуктивности и конденсаторы, при котором ее входное реактивное сопротивление при последовательном соединении элементов (или ее входная проводимость при параллельном соединении ветвей

с элементами L и C) равно нулю. При резонансе ток и напряжение на входе цепи совпадают по фазе.

Различают два вида резонансных состояний: резонанс напряжений и резонанс токов.

Резонанс напряжений может быть в цепи при последовательном соединении R , L и C (рис. 3.7, *а*).

При резонансе напряжение на индуктивном элементе U_L и напряжение на емкостном элементе U_C равны по величине $U_L = U_C$, но их векторы противоположны по направлению (рис. 3.7, *б*). Тогда в комплексном виде

$$\dot{U}_{ex} = \dot{U}_a + j(\dot{U}_L - \dot{U}_C) = \dot{U}_a,$$

или действительное значение

$$U_{ex} = \sqrt{U_a^2 + (U_L^2 - U_C^2)} = U_a.$$

Резонанс напряжений наступает при равенстве реактивных сопротивлений, т. е. когда $x_L = x_C$. При этом резонансная угловая частота

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Ток в цепи по фазе совпадает с напряжением на входе, т. е. $\varphi = 0$.

В связи с явлением резонанса напряжений, когда $\omega L = 1/(\omega C) \gg R$, напряжения U_L и U_C на реактивных элементах L и C могут быть много больше напряжения на входе цепи. В связи с этим в электроустановках большой мощности резонанс напряжений не применяется, т. к. может наступить внезапно, привести к опасным перенапряжениям и рассматриваться как аварийный.

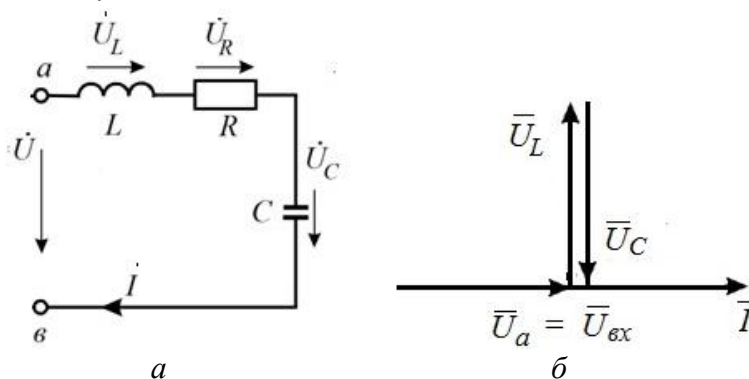


Рис. 3.7. Резонанс напряжений: *а* – электрическая схема с последовательным соединением элементов; *б* – векторная диаграмма при резонансе напряжений

В электрической цепи при параллельном соединении двух ветвей, когда в одной ветви включены элементы R_1 и L , а в другой R_2 и C (рис. 3.8, *а*),

может установиться *режим резонанса токов*, при котором ток в неразветвленной части цепи будет совпадать по фазе с напряжением ($\varphi = 0$).

В режиме *резонанса токов* реактивные проводимости обеих ветвей равны ($B_L = B_C$), поэтому реактивные составляющие токов в параллельных ветвях будут равны по значению ($I_L = I_C$) и противоположны по направлению (рис. 3.8, б). Ток в неразветвленной части цепи будет только активный, равный сумме активных составляющих токов в ветвях, т. е.

$$I = I_{a1} + I_{a2} = (G_1 + G_2)U,$$

где G_1 и G_2 – активные проводимости 1-й и 2-й ветвей.

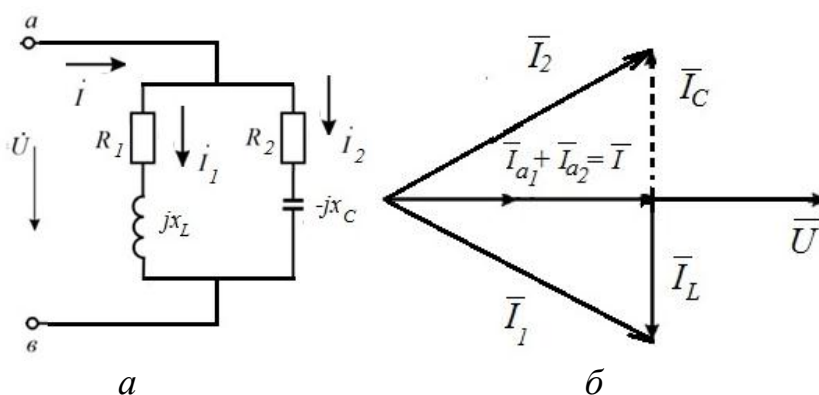


Рис. 3.8. Резонанс токов: а – электрическая цепь с параллельным соединением элементов; б – векторная диаграмма при резонансе токов

Из условия резонанса токов $B_L = B_C$ через параметры цепи и частоту получаем

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R_1^2}{L/C - R_2^2}}.$$

Из формулы видно, что состояние резонанса токов в цепи можно получить либо изменением частоты источника ω , либо изменением параметров L , C , R_1 и R_2 .

Лекция 4. Трехфазные линейные электрические цепи синусоидального тока

Как и в однофазных электрических цепях, в трехфазных электрических цепях основными элементами являются источник электрической энергии (генератор) и приемник (потребитель).

4.1. Трехфазный источник электрической энергии

В отличие от однофазного, трехфазный источник электрической энергии имеет не два, а четыре вывода (рис. 4.1, а)

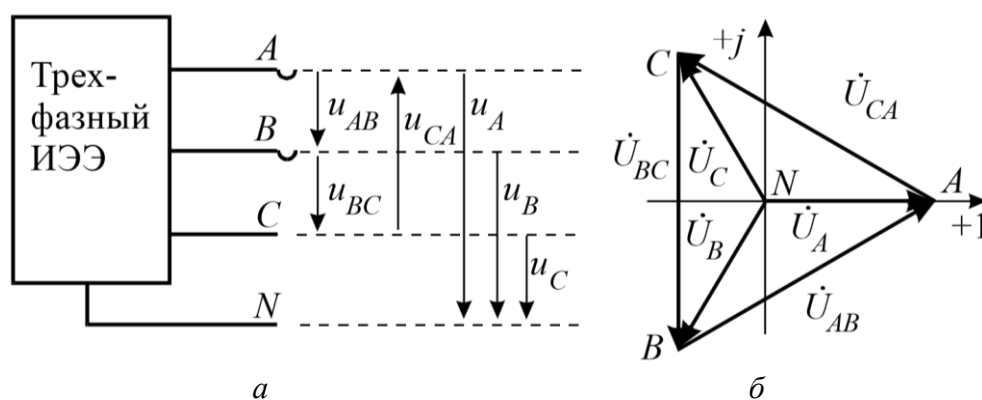


Рис. 4.1. Схема трехфазной линейной электрической цепи: а – источник электрической энергии; б – векторная диаграмма его напряжений

Выводы A , B , C называются *фазными*, а вывод N называется *нейтральным* или *нулевым*.

Напряжения между фазными выводами U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} называются *линейными*, а напряжения между соответствующими фазными выводами и нулевым выводом U_{AN} , U_{BN} , U_{CN} – *фазными* напряжениями. Обычно вместо обозначений U_{AN} , U_{BN} , U_{CN} применяются обозначения U_A , U_B , U_C .

Таким образом, трехфазный источник электрической энергии вырабатывает не одно, а шесть напряжений, причем линейные напряжения по модулю связаны с фазными напряжениями зависимостью

$$U_l = \sqrt{3} \cdot U_\phi, \quad (4.1)$$

где U_l и U_ϕ – действующие значения линейных и фазных напряжений трехфазного источника электрической энергии.

Например, при $U_l = 380\text{В}$ $U_\phi = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220\text{В}$; при $U_l = 220\text{В}$ $U_\phi = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127\text{В}$ и т. д.

Очевидно, что соотношение (4.1) справедливо и для амплитудных значений напряжений трехфазного источника электрической энергии ($U_{\text{ли}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{ф}}$).

Наличие напряжений двух уровней (фазного и линейного), на которые можно переходить путем простого переключения, является *преимуществом* трехфазного генератора по сравнению с однофазным.

Основными частями трехфазного генератора являются *статор* и *ротор*. В пазах статора расположены три одинаковые обмотки (катушки) *A*, *B*, *C*, оси которых смещены относительно друг друга на 120° или $2\pi/3$ рад. Обмотки генератора называются фазами, которые обозначаются соответственно *A*, *B*, *C*.

Таким образом, термин «фаза» в электротехнике обозначает в одних случаях аргумент синуса ($\omega t + \psi$), а в других случаях – одну из обмоток трехфазного генератора или только вывод этой обмотки.

В каждой обмотке (фазе) статора под действием вращающегося магнитного поля (ВМП) ротора, согласно закону электромагнитной индукции, индуцируются синусоидальные напряжения с равными амплитудами U_m и угловыми частотами, но сдвинутые по фазе на угол $\frac{2\pi}{3}$ друг относительно друга:

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t; \\ u_B &= U_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_C &= U_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

где u_A , u_B , u_C – мгновенные значения фазных напряжений.

Система напряжений, описываемая уравнениями (4.2), называется *симметричной*, а генератор, вырабатывающий такую систему напряжений, – *симметричным*.

Фазные напряжения (4.2) трехфазного симметричного генератора в комплексной форме имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_A &= U_A \cdot e^{j0} = U \\ \dot{U}_B &= U_B \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} = U \cdot e^{-j\frac{2\pi}{3}} \\ \dot{U}_C &= U_C \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}} = U \cdot e^{-j\frac{4\pi}{3}} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

где U – действующее значение фазного напряжения.

На рис. 4.1, б построена на комплексной плоскости векторная диаграмма фазных и линейных напряжений симметричного источника электрической энергии в соответствии с уравнениями (4.2) и (4.3).

Трехфазная система впервые разработана и применена русским инженером-электриком М.И. Доливо-Добровольским в 80-х годах XIX века в Германии. В настоящее время генераторы электростанций всех видов являются трехфазными.

4.2. Анализ электрических цепей при соединении трехфазного источника и приемника по схеме «звезда» с нулевым проводом

У источника энергии, выполненного по схеме «звезда», концы фазных обмоток X, Y, Z генератора соединяются в общий узел в N (рис. 4.2).

Аналогичный узел n образует соединение концов x, y, z трех фаз приемника, а точки N и n соединяет *нейтральный провод*, в результате чего потенциалы этих точек равны. Остальные три провода, соединяющие выводы генератора A, B, C с выводами приемника a, b, c , называются *линейными*.

Таким образом, вместо шести проводов (в случае отдельного питания фаз приемника однофазными источниками) трехфазная система, выполненная по схеме «звезда» с нулевым проводом, содержит четыре провода.

Следовательно, трехфазная электрическая цепь обеспечивает передачу электрической энергии с меньшими потерями и с меньшим расходом материала проводов при передаче одинаковой мощности. В этом следующее *преимущество* трехфазных электрических цепей перед однофазными.

Линейные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ в линиях (проводах) $A-a, B-b, C-c$ определяются по закону Ома в комплексной форме:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A}; \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B}; \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}. \quad (4.4)$$

Ток \dot{I}_N в нейтральном проводе связан с линейными токами законом Кирхгофа в комплексной форме

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (4.5)$$

Очевидно, что в схеме (рис. 4.2) линейные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ являются одновременно и фазными, т. е. они протекают одновременно в фазах источника и приемника и в соединяющих их проводах (линиях).

Приемник с одинаковыми сопротивлениями всех трех фаз ($Z_a = Z_b = Z_c = Z_\phi \cdot e^{j\varphi}$) называется *симметричным*.

Из уравнений (4.4) следует, что при симметричном приемнике действующие значения линейных токов I_L и токов I_ϕ всех фаз приемника равны:

$$I_L = I_\phi = I_A = I_B = I_C, \quad (4.6)$$

Равны также сдвиги фаз φ этих токов относительно соответствующих фазных напряжений.

Таким образом, токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ представляют симметричную систему токов, в связи с чем их векторная сумма равна нулю и ток в нейтральном проводе \dot{I}_N согласно (4.5) также равен нулю.

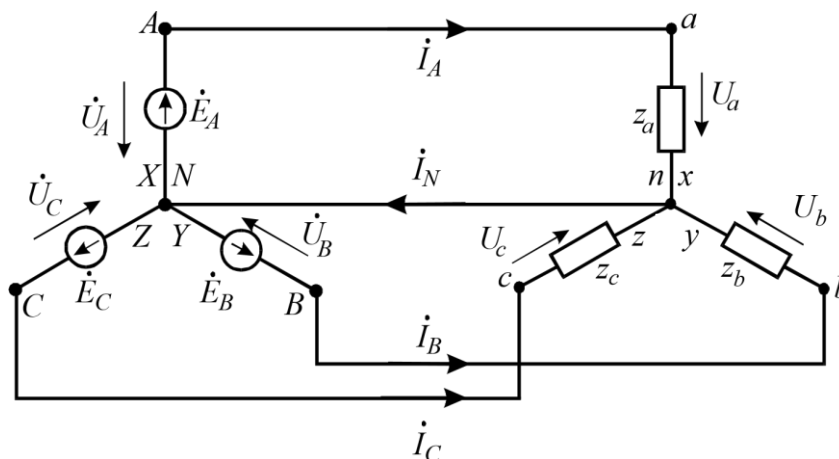


Рис. 4.2. Схема электрической цепи при соединении источника и приемника по схеме «звезда» с нулевым проводом

Векторная диаграмма напряжений и токов при емкостном характере симметричного приемника (ток опережает напряжение по фазе на угол φ) изображена на рис. 4.3, а.

Векторная диаграмма напряжений на рис. 4.3, а повторяет векторную диаграмму напряжений источника электрической энергии (рис. 4.1), т. к. система фазных и линейных напряжений в рассматриваемой электрической цепи задается источником и не зависит от нагрузки. В этом *достоинство* электрической цепи с нулевым проводом.

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура ANBA (рис. 4.2):

$$\dot{U}_A - \dot{U}_B = \dot{U}_{AB}, \quad (4.7)$$

где \dot{U}_{AB} – комплекс линейного напряжения.

На векторной диаграмме вектор \dot{U}_{AB} направлен в т. A так, чтобы выполнялось условие (4.7).

Физически это направление вектора указывает, что условно потенциал т. A выше потенциала т. B .

Из векторной диаграммы следует, что при симметричном приемнике, соединенном в «звезду», и при наличии нулевого (нейтрального) провода, симметричной системе напряжений (4.3) соответствует *симметричная* система токов:

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin(\omega t + \phi) \\ i_B &= I_m \sin(\omega t + \phi - 120^\circ) \\ i_C &= I_m \sin(\omega t + \phi - 240^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (4.8)$$

Если приемник несимметричный, токи в схеме (рис. 4.2) не будут представлять симметричную систему и в нулевом проводе в соответствии с (4.5) появится ток \dot{I}_N .

На рис. 4.3, б приведена векторная диаграмма токов для случая несимметричного приемника емкостного характера. Нейтральный провод выравнивает фазные напряжения при несимметричной нагрузке.

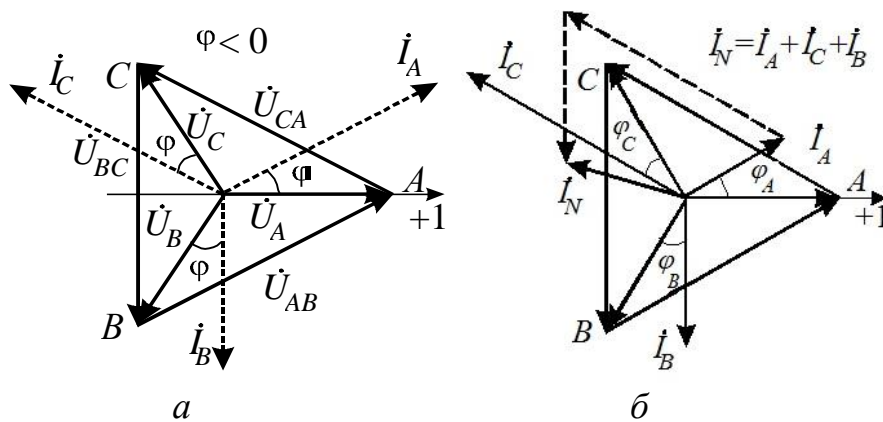


Рис. 4.3. Векторные диаграммы напряжений и токов трехфазной электрической цепи: *a* – при соединении симметричного приемника и источника по схеме «звезда» при емкостном характере приемника; *б* – при несимметричном приемнике

4.3. Соединение приемника по схеме «треугольник»

В этом случае к фазным выводам источника электрической энергии A, B, C подсоединяются выводы приемника a, b, c (рис. 4.4). Таким образом, к фазам приемника приложена симметричная система линейных напряжений трехфазного источника электрической энергии.

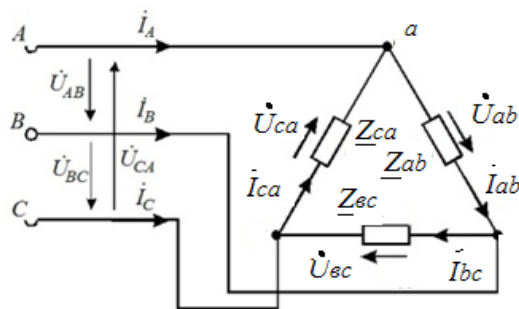


Рис. 4.4. Схема трехфазной электрической цепи при соединении приемника «треугольником»

В линейных проводах $A-a$, $B-b$, $C-c$ протекают линейные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$. В фазах приемника протекают фазные токи $\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$ определяемые по закону Ома в комплексной форме:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}}; \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}}; \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}. \quad (4.9)$$

Линейные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ при известных фазных токах находятся по первому закону Кирхгофа в комплексной форме:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \end{aligned} \right\}. \quad (4.10)$$

Из уравнений (4.9) и (4.10) следует, что при симметричном приемнике ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c = \underline{Z}_\phi$) системы фазных ($\dot{I}_{ab}, \dot{I}_{bc}, \dot{I}_{ca}$) и линейных ($\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$) токов *симметричны*, а модули фазных I_ϕ и линейных I_l токов находятся в следующем соотношении:

$$I_l = \sqrt{3} \cdot I_\phi. \quad (4.11)$$

В случае несимметричного приемника токи не будут представлять собой симметричные системы и соотношение (4.11) не выполняется.

Трехфазные цепи, соединенные звездой, получили большее распространение, чем трехфазные цепи, соединенные треугольником. Это объясняется тем, что в цепи, соединенной звездой, можно получить два напряжения: линейное и фазное. Если фазы обмотки электрической машины, соединенной треугольником, находятся в неодинаковых условиях, в обмотке появляются дополнительные токи, нагружающие ее. Такие токи отсут-

ствуют в фазах электрической машины, соединенных по схеме «звезда». Поэтому на практике избегают соединять обмотки трехфазных электрических машин в треугольник.

4.4. Мощность трехфазной цепи

Как и в однофазной линейной цепи синусоидального тока, в трехфазной линейной цепи могут иметь место три вида мощности:

- активная P [Вт];
- реактивная Q [ВАр];
- полная S [ВА].

Активной мощностью трехфазной электрической цепи называется сумма активных мощностей всех фаз источников электрической энергии или всех фаз приемника.

Трехфазная электрическая цепь с симметричным приемником

В электрической цепи с симметричным приемником, при любой схеме их соединений, для каждой из фаз приемника имеем

$$P_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \phi,$$

где ϕ – угол сдвига фаз между фазным напряжением \dot{U}_{ϕ} и током \dot{I}_{ϕ} .

Очевидно, в этом случае активная мощность всей электрической цепи

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \cos \phi, \quad (4.12)$$

или

$$P = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \cos \phi. \quad (4.13)$$

Реактивная мощность для каждой из фаз приемника

$$Q_{\phi} = U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \phi, \quad (4.14)$$

Реактивная мощность всей цепи

$$Q = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} \cdot \sin \phi, \quad (4.15)$$

или

$$Q = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л} \cdot \sin \phi. \quad (4.16)$$

Для полной мощности в случае симметричного приемника имеем

$$S = 3U_{\phi} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot U_{л} \cdot I_{л}. \quad (4.17)$$

Лекция 5. Трансформаторы

5.1. Общие сведения

Трансформатором называется статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока при одной и той же частоте.

По назначению трансформаторы делятся на силовые (повышающие и понижающие) и специального назначения (измерительные, автотрансформаторы, сварочные, согласующие и др.).

Генераторы электрических станций вырабатывают электрическую энергию при напряжении 6, 10, 15 кВ, так как на более высокие напряжения конструировать электрогенераторы сложно в связи с трудностью обеспечить хорошую изоляцию обмоток.

В то же время в линиях электропередачи применяют напряжения до 110, 220, 400, 500 кВ и более, чтобы уменьшить силу тока в линии, а значит, и сечение проводов, что позволяет резко снизить мощность потерь и стоимость линий электропередач.

Таким образом, необходимы *повышающие трансформаторы*, увеличивающие напряжение генераторов электрических станций до напряжения линий электропередач.

В местах же потребления электрической энергии, на производстве, в быту и т. п. необходимы *понижающие трансформаторы*, чтобы иметь напряжения 380, 220, 127 В и менее. Трансформаторы имеют высокий коэффициент полезного действия, достигающий до 99 %, и высокую надежность, так как не содержат движущихся частей.

Основными частями трансформатора являются магнитопровод и обмотки из медного изолированного провода. Магнитопровод собирается из тонких (толщиной 0,3–0,5 мм) изолированных друг от друга листов электротехнической стали с целью уменьшения потерь на вихревые токи (потери в стали) P_C (рис. 5.1).

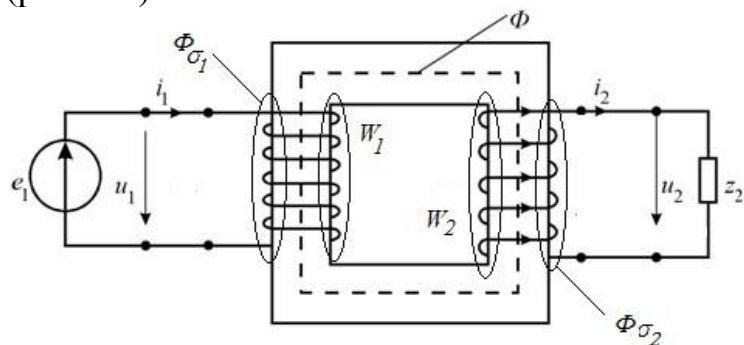


Рис. 5.1. Схема электрической цепи с трансформатором

Обмотка, подключаемая к источнику электрической энергии (генератору) или к линии электропередач (электрической сети), называется *первичной (входной)* и имеет W_1 витков. Обмотка, к которой подключается приемник электрической энергии, – *вторичной (выходной)* с количеством витков W_2 .

На щитке электрического трансформатора указываются:

- высшее и низшее номинальные напряжения;
- номинальная полная мощность $S = U_1 \cdot I_1$, ВА или кВА;
- частота f (Гц);
- токи в первичной и вторичной ($I_{1н}$, $I_{2н}$) обмотках при номинальной мощности;
- коэффициент трансформации K ;
- число фаз;
- схема соединений обмоток (звездой или треугольником) в случае трехфазного электрического трансформатора;
- режим работы (длительный или кратковременный);
- способ охлаждения (масляный, воздушный).

5.2. Принцип действия трансформатора

Принцип действия трансформатора заключается в передаче электрической энергии из первичной обмотки во вторичную путем индуктирования ЭДС и тока во вторичной замкнутой обмотке переменным основным магнитным потоком. Чем больше ток нагрузки i_2 , тем больше потребляемый ток трансформатора i_1 . (рис. 5.1).

При подаче от источника электрической энергии напряжения u_1 на первичную обмотку трансформатора по ней протекает переменный синусоидальный ток i_1 , возбуждающий в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ , Вб:

$$\Phi = \Phi_{\max} \sin \omega t, \quad (5.1)$$

где Φ_{\max} – максимальное значение потока.

По закону электромагнитной индукции магнитный поток пронизывает обе обмотки и индуцирует в них ЭДС:

- в первичной обмотке ЭДС самоиндукции

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad (5.2)$$

– во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (5.3)$$

где $\frac{d\Phi}{dt}$ – производная магнитного потока по времени;

W_1 и W_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Знак минус указывает на то, что ЭДС действуют против изменения потока, а если магнитный поток создается током обмотки, то против изменения тока.

Подставив в (5.1) формулу (5.2) и дифференцируя, получим

$$e_1 = -W_1 \Phi_{\max} \frac{d \sin \omega t}{dt} = -\omega W_1 \Phi_{\max} \cos \omega t = W_1 \omega \Phi_{\max} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (5.4)$$

Аналогично определяем значение ЭДС во вторичной обмотке

$$e_2 = \omega W_2 \Phi_{\max} \sin(\omega t - \pi/2). \quad (5.5)$$

Из формул (5.4) и (5.5) видно, что ЭДС отстают от магнитного потока Φ на угол $\pi/2$.

Под действием e_2 во вторичной обмотке, замкнутой на нагрузку Z_H , появится ток i_2 , направление которого совпадает с направлением e_2 . Максимальное значение ЭДС следующее:

$$E_{1\max} = \omega W_1 \Phi_{\max}.$$

Разделив полученное выражение на $\sqrt{2}$ и подставив $\omega = 2\pi f$, получим действующее значение первичной ЭДС, В, т. е.

$$E_1 = \frac{E_{1\max}}{\sqrt{2}} = \left(\frac{2\pi}{\sqrt{2}} \right) W_1 f \Phi_{\max} = 4,44 W_1 f \Phi_{\max}. \quad (5.6)$$

Тогда по аналогии определяем действующее значение вторичной ЭДС, т. е.

$$E_2 = 4,44 W_2 f \Phi_{\max}. \quad (5.7)$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения E_1 к ЭДС низшего напряжения E_2 называется коэффициентом трансформации, а именно:

$$K = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2}. \quad (5.8)$$

При практических расчетах коэффициент трансформации с некоторым допущением принимают равным отношению номинальных напряжений обмоток:

$$K = \frac{U_{1\text{ном}}}{U_{2\text{ном}}}. \quad (5.9)$$

Из (5.6), (5.7), (5.8) и (5.9) следует, что если $K > 1$ – трансформатор *понижающий*, то $K < 1$ – *повышающий*.

Токи I_1 и I_2 в обмотках трансформатора, помимо основного потока Φ , создают магнитные потоки рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$ (рис. 5.1), каждый из которых сцеплен с витками лишь собственной обмотки и индуцирует в ней ЭДС рассеяния $E_{\sigma 1}$ и $E_{\sigma 2}$. Магнитные потоки рассеяния замыкаются главным образом в немагнитной среде, магнитная проницаемость которой постоянна индуктивности, $L_{\sigma 1}$ и $L_{\sigma 2}$ можно считать постоянными, тогда действующие значения ЭДС пропорциональны токам, т. е.

$$E_{\sigma 1} = -jI_1x_1, E_{\sigma 2} = -jI_2x_2, \quad (5.10)$$

где x_1 и x_2 – индуктивные сопротивления рассеяния первичной и вторичной обмотках, Ом.

Таким образом, в каждой из обмоток трансформатора индуцируется по две ЭДС: от основного потока и от потока рассеяния.

По второму закону Кирхгофа для первичной обмотки, включенной в сеть на напряжение U_1 с учетом падения напряжения на активном сопротивлении, можно записать уравнение

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} = \dot{I}_1 R_1$$

или, перенося ЭДС \dot{E}_1 и \dot{E}_2 в правую часть уравнения и выразив ЭДС через сопротивление рассеяния x_1 , получим уравнение напряжений для первичной обмотки трансформатора

$$\dot{U}_1 = -(\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 R_1, \quad (5.11)$$

где $\dot{I}_1 x_1$ и $\dot{I}_1 R_1$ – напряжения в первичной обмотке, возникающие в результате наличия резистивного сопротивления и магнитного потока рассеяния в этой обмотке.

ЭДС E_1 , наведенная основным магнитным потоком Φ , представляет собой ЭДС самоиндукции, а поэтому находится в противофазе с подве-

денным к первичной обмотке напряжению U_1 . Значит, можно записать равенство

$$\dot{U}_1 \approx -\dot{E}_1. \quad (5.12)$$

Для вторичной цепи трансформатора, замкнутой на нагрузку с сопротивлением Z_n , уравнение имеет вид

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} = IR_2 + I_2 Z_2,$$

где $I_2 Z_2 = U_2$ – напряжение на вторичной обмотке.

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 R_2. \quad (5.13)$$

Из (5.13) следует, что напряжение на выходе нагруженного трансформатора отличается от ЭДС вторичной обмотки на значение падения напряжения.

Если к концам вторичной обмотки присоединен приемник электроэнергии Z_n (рис. 5.1), то под действием напряжения U_2 во вторичной обмотке потечет ток i_2 , который в свою очередь возбуждает магнитный поток Φ_2 , направленный согласно закону Ленца противоположно магнитному потоку Φ_1 .

Результирующий магнитный поток в магнитопроводе:

$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_2 \quad (5.14)$$

уменьшится, что приведет к уменьшению напряжения U_1 .

Однако напряжение U_1 не может быть меньше определенного значения, определяемого в соответствии со вторым законом Кирхгофа (5.10).

Таким образом, ток в первичной обмотке возрастает до такого значения, при котором результирующий магнитный поток Φ_{\max} индуцирует необходимое значение U_1 , соответствующее уравнению (5.13) и заданной нагрузке Z_n .

В установившемся режиме работы электрического трансформатора имеет место соотношение

$$\dot{I}_1 W_1 - \dot{I}_2 W_2 = I_{1x} w_1. \quad (5.15)$$

Преобразуя (5.15), получим выражение

$$\dot{I}_1 W_1 = I_{1x} w_1 + (-\dot{I}_2 W_2), \quad (5.16)$$

где $I_1 W_1$ – намагничивающая сила первичной обмотки;

$I_2 W_2$ – намагничивающая сила вторичной обмотки;
 I_{1x} – ток холостого хода.

Ток I_{1x} также называют намагничивающим, так как он определяет значение результирующего магнитного потока Φ_{\max} .

В связи с вышеизложенным следует, что результирующий (суммарный) магнитный поток в магнитопроводе электрического трансформатора в режиме нагрузки равен магнитному потоку первичной обмотки трансформатора в режиме холостого хода.

Из уравнения (5.16) потребляемый ток трансформатора при нагрузке:

$$\dot{I}_1 = I_{1x} + \left(-\dot{I}_2 \frac{W_2}{W_1} \right), \text{ или } \dot{I}_1 = I_{1x} + \left(-I_2 \frac{1}{K} \right) = I_{1x} + (-I_k), \quad (5.17)$$

где I_k – компенсационная составляющая первичной обмотки, которая создает в ней магнитодвижущую силу МДС, равную по величине и противоположную по фазе МДС вторичной обмотки, что приводит к неизменности магнитного потока трансформатора.

Уравнения (5.6 – 5.9), (5.10), (5.13), (5.16) – это основные уравнения трансформатора.

5.3. Работа трансформатора в режиме холостого хода

Режим холостого хода (рис. 5.2) – такой режим работы электрического трансформатора, при котором его вторичная цепь разомкнута и ток в ней равен нулю ($i_2 = 0$).

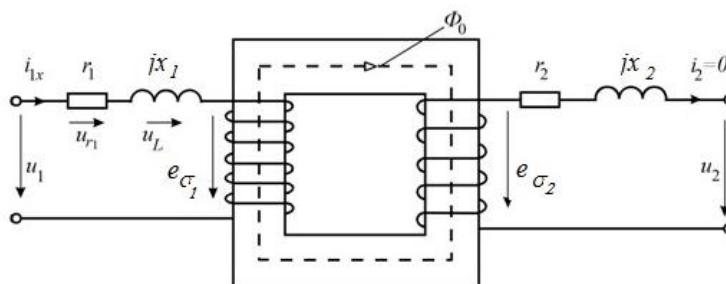


Рис. 5.2. Схема замещения трансформатора в режиме холостого хода

Составим уравнение для первичной цепи по второму закону Кирхгофа следующей комплексной форме:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1). \quad (5.18)$$

На рис. 5.3 представлена векторная диаграмма напряжений и токов, построенная в соответствии с (5.18).

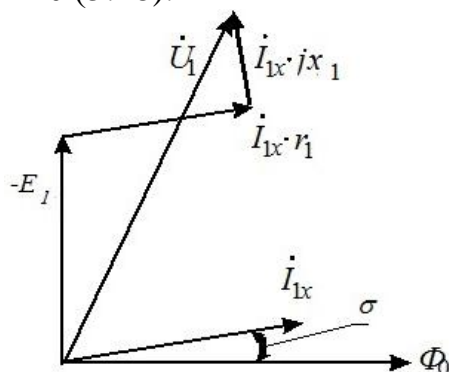


Рис. 5.3. Векторная диаграмма напряжений и тока трансформатора в режиме холостого хода

Опыт холостого хода называется испытание электрического трансформатора при разомкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном приложенном к первичной обмотке напряжении $U_{1x} = U_{1H}$.

Для проведения опыта холостого хода собирается электрическая цепь согласно схеме рис. 5.4.

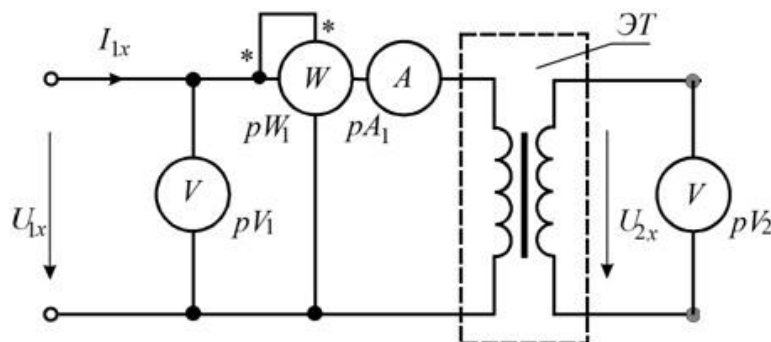


Рис. 5.4. Схема электрической цепи для проведения опыта холостого хода трансформатора

При $U_{1x} = U_{1H}$ ток I_{1x} составляет 3...10 % от номинального первичного тока I_{1H} . Следовательно, в формуле (5.18) слагаемыми $\dot{U}_{\sigma 1} = jx_{\sigma 1} \cdot \dot{I}_{1x}$ и $\dot{U}_{r1} = r_1 \cdot \dot{I}_{1x}$ можно пренебречь. Тогда имеем

$$\dot{U}_{1x} = -\dot{E}_1. \quad (5.19)$$

При разомкнутой цепи вторичной обмотки будет

$$U_{2x} = E_2, \quad (5.20)$$

поэтому, измерив вольтметром pV_1 первичное напряжение U_{1x} и вольтметром pV_2 – вторичное напряжение U_{2x} , определяют коэффициент трансформации

$$K = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{1x}}{U_{2x}} = \frac{W_2}{W_1}. \quad (5.21)$$

Этот коэффициент указывается на щитках электрических трансформаторов как отношение высшего напряжения к низшему (например, $K = 6000 / 230$).

При холостом ходе $I_{1x} \ll I_{1н}$ мощность потерь в проводах первичной обмотки (потери в меди) P_{M1} небольшая по сравнению с потерями на вихревые токи P_c . Поэтому в опыте холостого хода по показаниям ваттметра pW определяют мощность потерь в магнитопроводе.

5.4. Опыт короткого замыкания

Необходимо различать *опыт короткого замыкания* и *режим короткого замыкания*, так как в последнем случае имеет место аварийный режим электрического трансформатора, при котором он сильно разогревается и может произойти сгорание трансформатора. Однако некоторые специальные трансформаторы рассчитываются для работы в режиме, близком к короткому замыканию. Это сварочные трансформаторы, измерительные трансформаторы тока и т. п.

Опыт короткого замыкания – испытание электрического трансформатора при короткозамкнутой цепи вторичной обмотки. При этом на первичную обмотку подается такое малое напряжение, чтобы по обмоткам протекали номинальные токи (рис. 5.5).

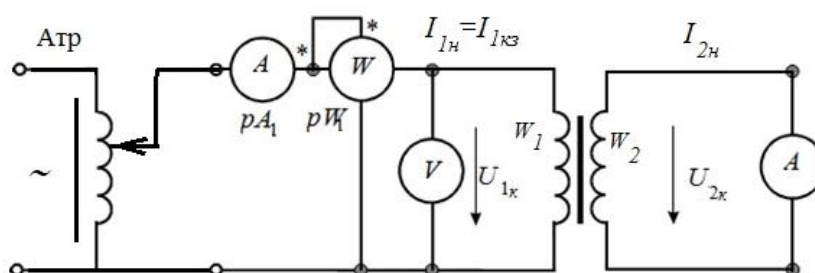


Рис. 5.5. Схема электрической цепи для проведения опыта короткого замыкания трансформатора

Первичную обмотку автотрансформатора (Атр) подключают к сети переменного тока. Движок автотрансформатора ставят в нулевое положение.

ние. Плавно увеличивая напряжение перемещением движка по амперметру (pA_1), устанавливают номинальное значение первичного тока

$$I_{1к} = I_{1н}. \quad (5.22)$$

Напряжение короткого замыкания составляет примерно $0,05U_{1н}$.

При этом во вторичной обмотке устанавливается номинальный ток $I_{2н}$.

Этот опыт проводится при аттестации электрического трансформатора для определения важнейших параметров:

- мощности потерь в проводах обмоток (потери в меди) P_M ;
- внутреннего падения напряжения;
- коэффициента трансформации и др.

Опыт короткого замыкания, как и опыт холостого хода, обязателен при заводских испытаниях.

В опыте короткого замыкания $U_{2к} = 0$ напряжение. Пропорционально значению напряжения уменьшается магнитный поток Φ_0 в магнитопроводе, а вместе с ним и мощность потерь в магнитопроводе P_C , пропорциональная Φ_0^2 . Следовательно, в опыте короткого замыкания почти вся мощность трансформатора $P_{1к}$ равна мощности потерь в проводах первичной и вторичной обмоток (потери в меди):

$$P_{1к} = I_{1к}^2 \cdot r_1 + I_{2к}^2 \cdot r_2 \approx P_M. \quad (5.23)$$

Значение этой мощности определяется по показаниям ваттметра pW_1 (рис. 5.5). $I_{1к}$ и $I_{2к}$ – токи в опыте короткого замыкания соответствующих обмоток трансформатора, определяемые по показаниям амперметров pA_1 и pA_2 .

При коротком замыкании в уравнении (5.15) составляющая $I_{1к} \cdot W_1$ ничтожно мала по сравнению с двумя другими составляющими, и ею можно пренебречь, следовательно:

$$W_1 \cdot I_{1к} \approx W_2 \cdot I_{2к}$$

и коэффициент трансформации

$$K = \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{I_{2к}}{I_{1к}}.$$

Таким образом, опыт короткого замыкания может служить для определения коэффициента трансформации K .

5.5. Потери мощности в трансформаторе

Отношение активной мощности P_2 на выходе трансформатора к активной мощности P_1 на входе

$$\eta = P_2/P_1 \text{ или } \eta (\%) = (P_2/P_1) \cdot 100 \%$$

называется *коэффициентом полезного действия трансформатора* (КПД). КПД трансформатора зависит от режима работы.

При номинальных значениях напряжения $U_1 = U_{1H}$ и тока $I_1 = I_{1H}$ на первичной обмотке трансформатора и коэффициенте мощности приемника $\cos \varphi_2 > 0,8$ коэффициент полезного действия очень высок и у мощных электрических трансформаторов превышает 99 %.

По этой причине не применяется прямое определение коэффициента полезного действия трансформатора на основании непосредственного измерения мощностей P_1 и P_2 , так как для получения удовлетворительных результатов нужно было бы измерять мощности P_1 и P_2 с очень высокой точностью (свыше 1 %), что практически трудно получить.

Но относительно просто можно определить коэффициент полезного действия методом косвенного измерения, основанного на прямом измерении мощности потерь в трансформаторе.

Так как мощность потерь $\Delta P = P_1 - P_2$, то коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}. \quad (5.24)$$

Мощность потерь в электрических трансформаторах равна сумме мощностей потерь в магнитопроводе ΔP_c (потери в стали) и в проводах обмоток ΔP_M (потери в меди).

При номинальных значениях первичных напряжений $U_1 = U_{1H}$ и тока $I_1 = I_{1H}$ мощности потерь в магнитопроводе и проводах обмоток практически равны активным мощностям трансформатора в опытах холостого хода и короткого замыкания соответственно.

Полезная мощность трансформатора при любом характере нагрузки

$$P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_H \cos \varphi_2, \quad (5.25)$$

где S_H – полная мощность трансформатора, ВА;

$\beta = I_2/I_{2H}$ – коэффициент нагрузки.

Потери в стали ΔP_C не зависят от нагрузки и равны потерям холостого хода. Потери в обмотках ΔP_M пропорциональны квадрату тока

$$\Delta P_M = R_k I_2^2 = R_k I_n^2 \beta = \Delta P_M \beta^2. \quad (5.26)$$

Подставив (5.25) и (5.26) в (5.24), выражение для КПД примет вид

$$\eta = \frac{\beta S_n \cos \phi_2}{\beta S_n \cos \phi_2 + \Delta P_C + \Delta P_M \beta^2}. \quad (5.27)$$

Для силовых трансформаторов выбирают η_{\max} при $\beta = 0,5 \dots 0,7$, т. к. они обычно работают большее время с недогрузкой.

5.6. Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика представляет собой зависимость ($U_2 = f(I_2)$) между вторичным напряжением U_2 и током нагрузки I_2 при заданном напряжении на входе трансформатора U_1 .

Важное значение имеет напряжение на вторичной обмотке трансформатора, т. к. к ней присоединяют приборы, устройства, электрические машины и т. п.

Изменение вторичного напряжения определяют в процентах, т. е.

$$\Delta u \% = \frac{U_{2\text{нн}} - U_2}{U_{2\text{нн}}} 100 \%.$$

Внешние характеристики при активной ($\cos \phi_2 = 1$) и активно-индуктивной ($\cos \phi_2 = 0,8$) представлены на рис. 5.6.

Из характеристики видно, что чем больше нагрузка (чем больше ток I_2), тем меньше напряжение U_2 . В пределах от холостого хода до номинальной нагрузки, т. е. от I_2 до $I_2 = I_{2\text{ном}}$, коэффициент нагрузки меняется $0 \leq \beta \leq 1$.

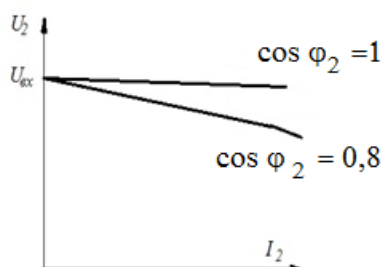


Рис. 5.6. Внешние характеристики трансформатора

Напряжение U_2 изменяется на несколько процентов. Чем больше нагрузка, тем больше токи I_2 и I_1 , а значит, больше падение напряжения на

сопротивлении обмотки трансформатора и, следовательно, тем меньше напряжение U_2 .

5.7. Автотрансформаторы

В ряде случаев при передаче электроэнергии требуется соединить через трансформатор электрические цепи, отношение номинальных напряжений которых не превышает два, например цепи высокого напряжения 110 и 220 кВ.

В подобных случаях экономически целесообразно вместо обычного трансформатора применить автотрансформатор, так как его коэффициент полезного действия выше, а габариты меньше, чем у трансформатора той же номинальной мощности.

Автотрансформатор отличается от трансформатора тем, что имеет лишь одну обмотку – обмотку высшего напряжения, а обмоткой низшего напряжения служит часть обмотки высшего напряжения (рис. 5.7).

Обмотка высокого напряжения автотрансформатора может быть первичной (рис. 5.7, а) и вторичной (рис. 5.7, б).

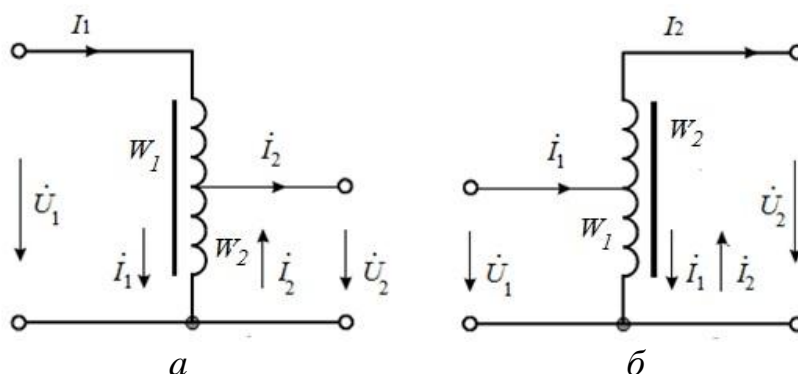


Рис. 5.7. Схема автотрансформаторов: а – с первичной обмоткой высшего напряжения; б – первичной обмоткой низшего напряжения

Напряжения и токи автотрансформатора связаны теми же приближенными соотношениями, что и в однофазном трансформаторе, если пренебречь резистивными сопротивлениями обмоток ($r_1 = r_2 = 0$) и индуктивными сопротивлениями потоков рассеяния ($x_1 = x_2 = 0$):

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{W_1}{W_2} \approx \frac{I_1}{I_2}.$$

Ток в общей части обмотки равен разности первичного I_1 и вторичного токов (рис. 5.7). Если коэффициент трансформации лишь немного отличается от единицы, то действующие значения токов I_2 и I_1 и их фазы почти одинаковы, а их разность ($I_2 - I_1$) мала по сравнению с каждым из них.

В связи с этим общую часть первичной и вторичной обмоток можно сделать из значительно более тонкого провода, т. е. стоимость обмотки автотрансформатора меньше, чем обмоток обычного трансформатора, и для ее размещения требуется меньше места.

Расчетная полная мощность общей части обмотки автотрансформатора следующая:

$$S' \approx U_2(I_2 - I_1) \approx U_2 I_2 (1 - W_2/W_1).$$

Расчетная полная мощность остальной части обмотки

$$S'' \approx I_1(U_1 - U_2) \approx U_1 I_1 (1 - W_2/W_1),$$

так как приближенно $U_2 \cdot I_2 \approx U_1 \cdot I_1$, то $S' \approx S'' \approx S_{ам}$.

Расчетная полная мощность каждой из обмоток обычного трансформатора следующая:

$$S_T \approx I_2 U_2 \approx U_1 I_1.$$

Следовательно, при одной и той же полной мощности в сопротивлении нагрузки получается следующее соотношение между расчетными полными мощностями автотрансформатора и трансформатора:

$$\frac{S_{AT}}{S_T} = 1 - \frac{W_2}{W_1},$$

т. е. чем меньше различаются числа витков W_2 и W_1 (коэффициент трансформации K близок к единице), тем выгоднее применять автотрансформатор.

Так как первичная и вторичная цепи автотрансформатора электрически соединены, то при высоком напряжении на первичной стороне и большом коэффициенте трансформации (например, $K = 6000 \text{ В}/220 \text{ В}$) при пользовании вторичным напряжением необходимо принимать дополнительные меры к обеспечению безопасности и усилению изоляции вторичной электрической цепи.

Широкое применение находят лабораторные маломощные автотрансформаторы (ЛАТРы), позволяющие регулировать вторичное напряжение.

Лекция 6. Электрические машины

6.1. Общие сведения

Электрические машины делятся на две основные категории: *генераторы*, предназначенные для преобразования механической энергии в электрическую, и *двигатели*, которые преобразуют электрическую энергию в механическую.

Принцип действия электрических машин основан на законах электромагнитной индукции, Ампера и явлении вращающегося магнитного поля.

Согласно закону электромагнитной индукции в проводнике, помещенном в магнитное поле и движущемся относительно него со скоростью \vec{V} , наводится ЭДС E , направление которой определяется правилом буравчика или правилом правой руки (рис. 6.1, *a*),

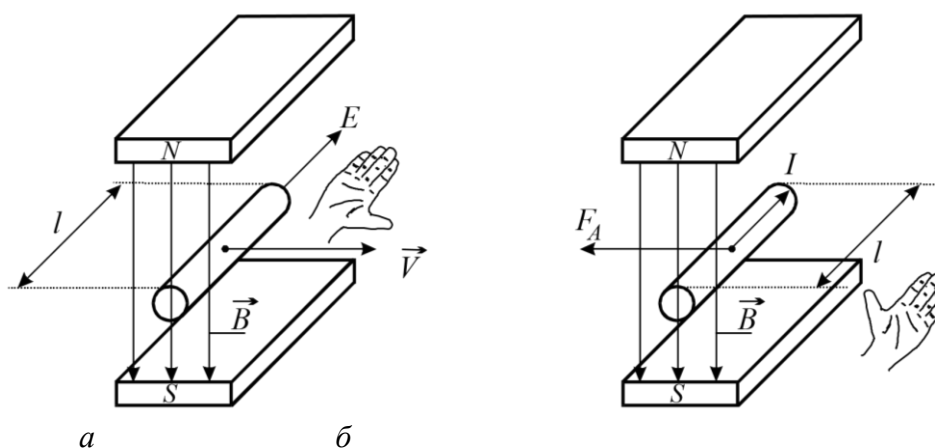


Рис. 6.1. Принцип действия электрических машин:
a – закон электромагнитной индукции; *б* – закон Ампера

Если проводник длиной l равномерно движется перпендикулярно силовым линиям магнитного поля, то значение наводимой в проводнике ЭДС равно

$$E = V \cdot B \cdot l, \quad (6.1)$$

где B – индукция магнитного поля.

Согласно закону Ампера на проводник с током I , помещенный в магнитное поле, действует сила, направление которой определяется правилом буравчика или правилом левой руки (рис. 6.1, б), а значение по формуле

$$F_A = I \cdot B \cdot l, \quad (6.2)$$

где направление тока I , магнитной индукции \vec{B} и силы \vec{F}_A взаимно перпендикулярны.

6.2. Вращающееся магнитное поле

Важным преимуществом трехфазного тока является возможность получения вращающегося магнитного поля, лежащего в основе принципа действия электрических машин – асинхронных и синхронных двигателей трехфазного тока.

Если на три одинаковые катушки, оси которых расположены под углом 120° относительно друг друга (рис. 6.2, а), подать переменный трехфазный ток (рис. 6.2, б), то появится вращающееся магнитное поле.

На рис. 6.2, а показаны положительные направления токов в катушках и направления индукций магнитных полей B_A, B_B, B_C , создаваемых каждой из катушек в отдельности.

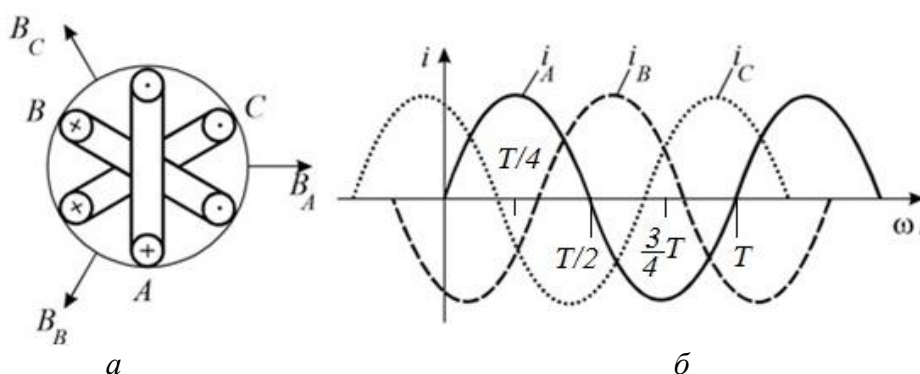


Рис. 6.2. Схема вращающегося магнитного поля: а – расположение катушек при получении вращающегося магнитного поля; б – волновая диаграмма трехфазной симметричной системы токов, текущих по катушкам

На рис. 6.3 показаны действительные направления токов для моментов времени $t = 0; t = \frac{T}{4}; t = \frac{T}{2}; t = \frac{3T}{4}$ и направления индукции $B_{рез}$ результирующего магнитного поля, создаваемого тремя катушками.

Анализ рис. 6.3 позволяет сделать выводы:

- индукция $B_{рез}$ результирующего магнитного поля с течением времени меняет свое направление (вращается);

– частота вращения магнитного поля такая же, как и частота изменения тока.

Так, при $f = 50$ Гц вращающееся магнитное поле совершает пятьдесят оборотов в секунду или три тысячи оборотов в минуту.

Значение индукции результирующего магнитного поля постоянно:

$$B_{\text{рез}} = 1,5B_{\text{max}},$$

где B_{max} – амплитуда индукции одной катушки.

6.3. Асинхронные машины

Асинхронные машины – это машины переменного тока, у которых частота вращения ротора не равна частоте вращающегося магнитного поля и зависит от нагрузки на валу машины. Асинхронные машины чаще применяются как двигатели. Генераторный режим используется как один из режимов работы двигателя.

6.3.1. Принцип действия асинхронного двигателя (АД)

Принцип действия АД основан на двух законах: законе *электромагнитной индукции* и законе *электромагнитных сил*. Пусть магнитное поле вращается «по часовой стрелке», тогда цилиндр относительно вращающегося магнитного поля будет вращаться в обратном направлении (рис. 6.3, б). Учитывая это, по правилу правой руки найдем направление наведенных в цилиндре токов. На рис. 6.3, б направления наведенных токов (вдоль образующих цилиндра) показаны крестиками («от нас») и точками («к нам»).

Применяя правило левой руки (рис. 6.1, б), получаем, что взаимодействие наведенных токов с магнитным полем порождает силы F (рис. 6.3, б), приводящие во вращательное движение ротора в том же направлении, в каком вращается магнитное поле.

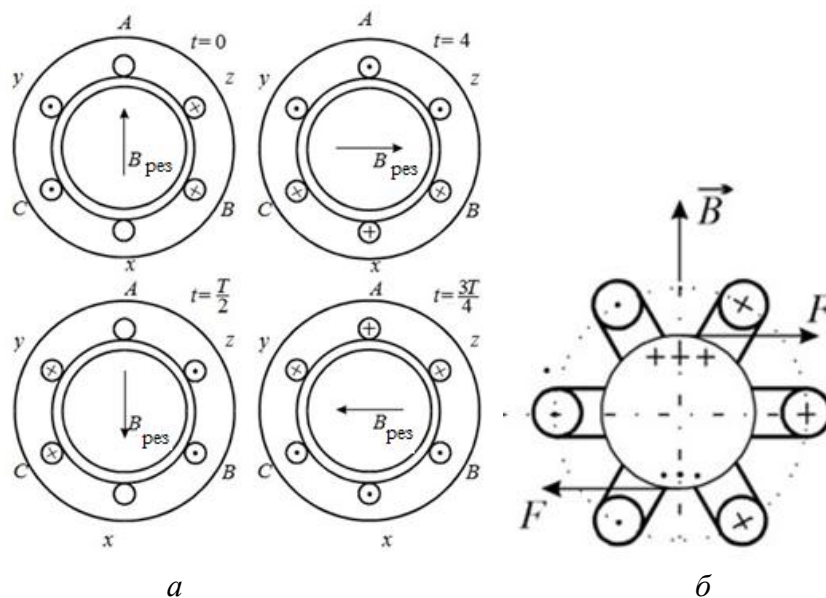


Рис. 6.3. Направление индукции вращающегося магнитного поля:
a – в различные моменты времени;
б – двухполюсное вращающееся магнитное поле (одна пара полюсов)

Частота вращения ротора ω_2 меньше частоты вращения магнитного поля ω_1 , т. к. при одинаковых угловых скоростях относительная скорость ротора и вращающегося магнитного поля была бы равна нулю и в роторе не было бы наведенных ЭДС и токов. Следовательно, не было бы сил F , создающих вращающий момент. Рассмотренное простейшее устройство поясняет принцип действия *асинхронных двигателей*. Слово «асинхронный» (греч.) означает неодновременный. Этим словом подчеркивается различие в частотах вращающегося магнитного поля и ротора – подвижной части двигателя.

За один период синусоидального тока двухполюсное магнитное поле делает один оборот. Следовательно, при стандартной частоте $f = 50$ Гц это поле делает три тысячи оборотов в минуту и вращается со скоростью

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p} \text{ (об./мин.)}, \quad (6.3)$$

где p – число пар полюсов.

Скорость вращения ротора немногим меньше этой синхронной скорости.

В тех случаях, когда требуется асинхронный двигатель с меньшей скоростью, применяется многополюсная обмотка статора, состоящая из шести, девяти и т. д. катушек. Соответственно вращающееся магнитное поле будет иметь две, три и т. д. пары полюсов.

6.3.2. Устройство асинхронного двигателя

Магнитная система (магнитопровод) асинхронного двигателя состоит из двух частей: наружной неподвижной, имеющей форму полого цилиндра (рис. 6.4), и внутренней – вращающегося цилиндра.

Обе части асинхронного двигателя собираются из листов электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Эти листы для уменьшения потерь на вихревые токи изолированы друг от друга слоем лака.

Неподвижная часть машины называется *статором*, а вращающаяся – *ротором* (от латинского *stare* – стоять и *rotate* – вращаться).

В пазах с внутренней стороны статора уложена трехфазная обмотка, выполненная из медной проволоки, токи которой возбуждают вращающееся магнитное поле машины. В пазах ротора размещена вторая обмотка, токи в которой индуктируются вращающимся магнитным полем.

Магнитопровод статора заключен в массивный корпус, являющийся внешней частью машины, а магнитопровод ротора укреплен на валу.

Роторы асинхронных двигателей изготавливаются двух видов: короткозамкнутые и с контактными кольцами (фазные). Первые из них проще по устройству и чаще применяются.

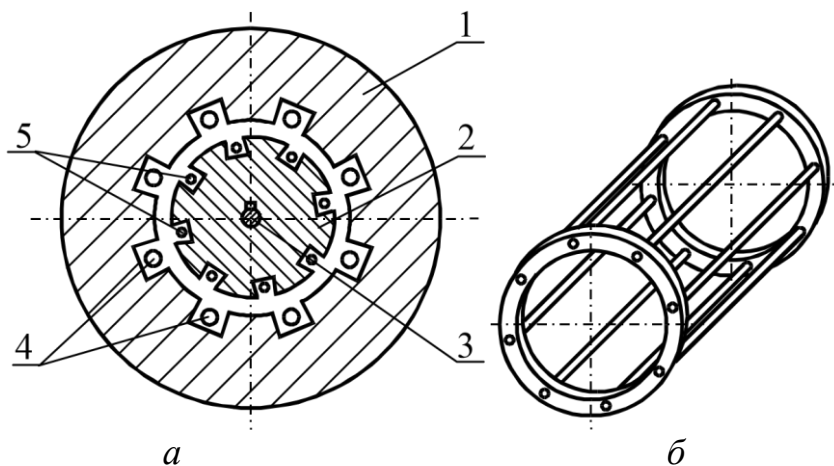


Рис. 6.4. Схема устройства асинхронного двигателя: *а* – поперечный разрез; *б* – обмотка ротора: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – вал; 4 – витки обмотки статора; 5 – витки обмотки ротора

Обмотка короткозамкнутого ротора представляет собой цилиндрическую клетку («беличье колесо») из медных шин или алюминиевых стержней, замкнутых накоротко на торцах двумя кольцами (рис. 6.4, б). Стержни этой обмотки вставляются без изоляции в пазы магнитопровода. Применяется также способ заливки пазов магнитопровода ротора расплавленным алюминием с одновременной отливкой и замыкающих колец.

6.3.3. Характеристики асинхронного двигателя

Скорость вращения вращающегося магнитного поля определяется либо угловой частотой ω_1 , либо числом оборотов n_1 в минуту. Эти две величины связаны так:

$$n_1 = \frac{30 \cdot \omega_1}{\pi}. \quad (6.4)$$

Характерной величиной является относительная скорость вращающегося магнитного поля, называемая *скольжением* (степень отставания ротора от вращающегося магнитного поля статора) s :

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{n_s}{n_1}, \quad (6.5)$$

где n_2 – число оборотов ротора в минуту, об./мин.;

$n_1 - n_2 = n_s$ – частота вращения ротора относительно поля статора.

У современных асинхронных двигателей скольжение даже при полной нагрузке невелико – около 0,02...0,08 % (два – восемь процента). Для малых АД около 0,08, у мощных двигателей – 0,02.

Чем ближе скорость ротора n_2 к скорости вращающегося магнитного поля n_1 , тем меньше ЭДС, индуцируемые полем в роторе, а следовательно, и токи в роторе. Наведенные токи в обмотках ротора имеют частоту

$$f_2 = f \cdot s. \quad (6.6)$$

Убывание токов уменьшает вращающий момент $M_{вр}$, действующий на ротор, поэтому ротор двигателя должен вращаться медленнее вращающегося магнитного поля – асинхронно.

Асинхронный двигатель работает в трех основных режимах:

1. **Пусковой режим.** При этом ротор неподвижен и $n_p = 0$, тогда $s = 1$ (6.5), частота тока в обмотках ротора $f_2 = f \cdot s = f = 50$ Гц.
2. **Холостой ход.** При холостом ходе ротор асинхронного двигателя вращается со скоростью $n_2 \approx n_1$, поэтому скольжение будет теоретически равным 0, а соответственно $f_2 = f \cdot s = 0$.
3. **Номинальный режим.** Скольжение $s = 3...4$ %, $f_2 = f \cdot s = 1,5...2$ Гц.

При увеличении механической нагрузки асинхронного двигателя тормозящий момент на валу становится больше вращающегося и скольжение s возрастает.

Увеличение скольжения вызывает возрастание ЭДС и токов в обмотке ротора, благодаря чему увеличивается вращающий момент $M_{вр}$ и восста-

навливается динамическое равновесие вращающего и тормозящего M_T моментов:

$$M_{вр} = M_T = M .$$

Таким образом, увеличение нагрузки АД вызывает увеличение его скольжения. Характерная кривая зависимости M от скольжения s показана на рис. 6.5, а.

Максимум вращающегося момента разделяет кривую $M = f(s)$ на устойчивую часть от $s = 0$ до s_k и неустойчивую часть от s_k до $s = 1$, в пределах которой вращающий момент уменьшается с ростом скольжения.

На участке от $s = 0$ до s_k при уменьшении тормозящего момента M_T на валу АД увеличивается скорость вращения, скольжение уменьшается, так что на этом участке работа асинхронного двигателя устойчива.

На участке от s_k до $s = 1$ с уменьшением M_T скорость вращения увеличивается, скольжение уменьшается и вращающий момент увеличивается, что приводит к еще большему возрастанию скорости вращения, так что работа двигателя неустойчива.

Таким образом, пока тормозящий момент $M_T < M_{max}$, динамическое равновесие моментов автоматически восстанавливается. Когда же $M_T > M_{max}$, при дальнейшем увеличении нагрузки возрастание скольжения приводит к уменьшению вращающегося момента M и двигатель останавливается вследствие преобладания тормозящего момента над вращающим.

Для практики большое значение имеет зависимость скорости двигателя n_p от нагрузки на валу $n_p = f(M)$. Эта зависимость носит название *механической характеристики* (рис. 6.5, б). Как показывает кривая (рис. 6.5, б), скорость АД лишь незначительно снижается при увеличении вращающего момента в пределах от нуля до максимального значения M_{max} . Такую зависимость называют жесткой.

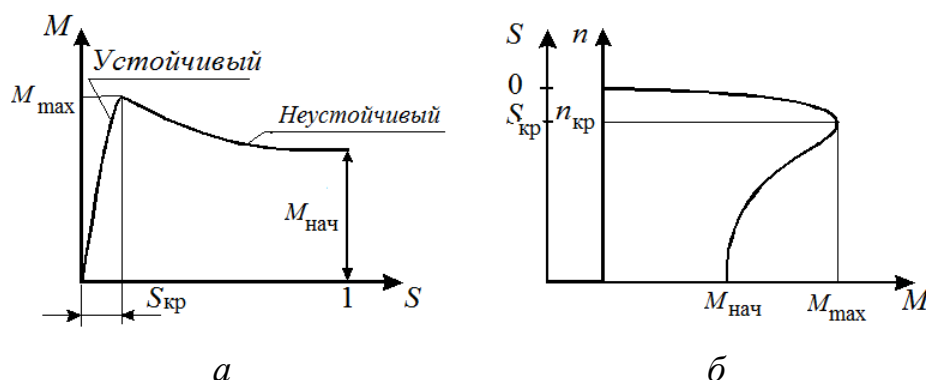


Рис. 6.5. Работа асинхронного двигателя: а – зависимость вращающего момента на валу асинхронного двигателя от скольжения; б – механическая характеристика

При перегрузке свыше максимального момента M_{\max} двигатель входит в область неустойчивого режима и останавливается.

Асинхронные двигатели получили широкое распространение благодаря следующим достоинствам:

- простоте устройства;
- высокой надежности в эксплуатации;
- низкой стоимости.

С помощью асинхронных двигателей приводятся в движение подъемные краны, лебедки, лифты, эскалаторы, насосы, вентиляторы и другие механизмы.

К недостаткам АД относятся:

- ток при пуске асинхронного двигателя в 5–7 раз превышает ток в номинальном режиме $I_n = (5 - 7)I_n$;
- пусковой вращающий момент относительно момента в номинальном режиме мал $M_n = (1,2 - 1,6)M_n$;
- регулирование скорости вращения ротора затруднено.

6.4. Электрические машины постоянного тока (МПТ)

Электрические машины постоянного тока обладают многими полезными качествами. Двигатели постоянного тока (ДПТ) допускают плавное регулирование скорости вращения в широких пределах, создавая при этом большой пусковой момент, поэтому ДПТ незаменимы в качестве тяговых двигателей трамваев, метро, троллейбусов и т. п. Также ДПТ широко используются в промышленности.

Генераторы постоянного тока (ГПТ) используются для питания электромагнитов различного назначения, электролитических ванн. ГПТ как правило приводятся в действие асинхронными и синхронными двигателями переменного тока.

6.4.1. Общие понятия об устройстве машин постоянного тока и принципе их действия

У МПТ нормального исполнения цилиндрический ротор с расположенной на нем обмоткой, называемый якорем, вращается в неподвижном магнитном поле (рис. 6.6). В витках 1–3 и 2–4 обмотки якоря индуктируются переменные ЭДС, для получения неизменного направления тока i в сопротивлении нагрузки r применяется коллектор K , состоящий из медных изолированных друг от друга пластин, образующих цилиндр, по которому скользят щетки $a - b$. Наличие коллектора является отличительной особенностью машины постоянного тока. К его пластинам присоединяются

начала и концы витков обмотки. Стороны витков, расположенные за плоскостью рисунка, условно показаны штриховыми линиями.

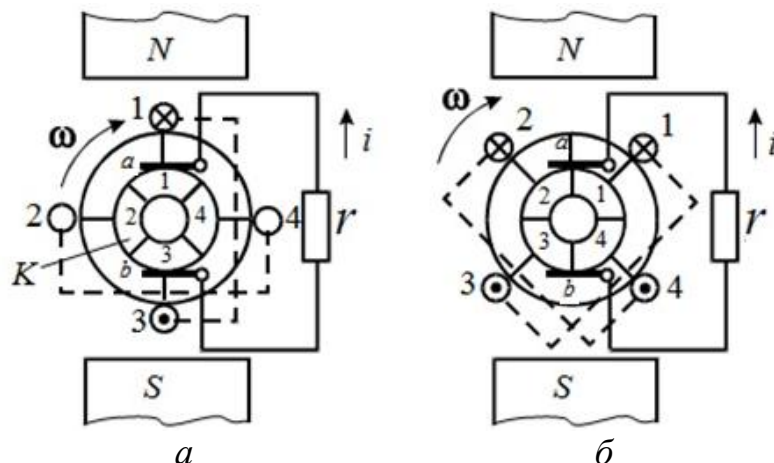


Рис. 6.6. Простейший генератор с двумя витками и четырьмя коллекторными пластинами

В положении, показанном на рис. 6.6, *а*, между щетками будет максимальная ЭДС, так как стороны 1–3 витка пересекают магнитные линии перпендикулярно. При дальнейшем вращении эта ЭДС начнет убывать. После поворота якоря на 45° (рис. 6.6, *б*) щетки перейдут с пластин 1–3 коллектора на пластины 2–4 и подключатся к следующему витку. ЭДС в нем будет сначала возрастать до максимума, а затем начнет уменьшаться, пока щетки снова не перейдут на пластины 3–1; ЭДС снова начнет возрастать и т. д. Рост и уменьшение ЭДС происходят за время, соответствующее повороту якоря на угол $\frac{\pi}{2}$ (рис. 6.7), на протяжении этого времени каждая щетка касается одной и той же коллекторной пластины.

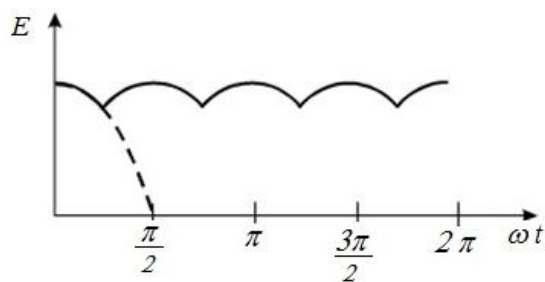


Рис. 6.7. Рост и уменьшение ЭДС соответствует повороту якоря на угол $\frac{\pi}{2}$

Пульсации ЭДС (и тока) вредно сказываются на работе приемников и самого генератора. Для их уменьшения увеличивают число витков, в которых индуктируются ЭДС, и число коллекторных пластин. В соответствии с принципом обратимости машина постоянного тока может работать как генератор и как двигатель. В любом случае проводники пересекают линии поля и в них коллекторными пластинами одновременно на проводники с током в магнитном поле воздействуют электромагнитные силы.

Генератор преобразует механическую энергию, которая подводится к валу первичным двигателем, в электрическую, потребляемую приемником, включенным на его зажимы. Механическое усилие первичного двигателя (рис. 6.8, а) приводит проводники якоря в движение с некоторой скоростью v . Возникающая ЭДС E вызывает ток I такого же направления и должна преодолеть падение напряжения в обмотке якоря и сопротивление нагрузки:

$$E = U + I \cdot r_{\text{я}}, \quad (6.7)$$

где U – напряжение на зажимах генератора или приемника;

$r_{\text{я}}$ – сопротивления цепи якоря.

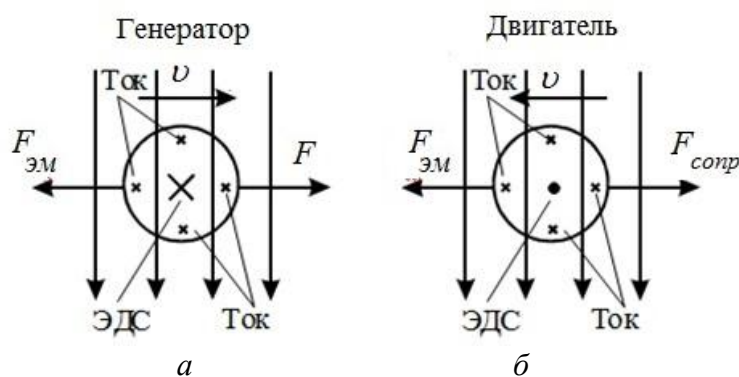


Рис. 6.8. Работа генератора: а – ЭДС, токи и механические силы в проводнике обмотки якоря генератора; б – двигатель постоянного тока

Электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$, действующая на проводники с током, оказывает противодействие усилию F первичного двигателя. В установившемся режиме при постоянной скорости эти силы равны

$$F_{\text{эм}} = F.$$

Механическая мощность, развиваемая первичным двигателем,

$$P_{\text{мех}} = F \cdot v = F_{\text{мех}} \cdot v = P_{\text{эм}} \quad (6.8)$$

преобразуется в электромагнитную мощность генератора $P_{\text{эм}}$. Последняя частично расходуется на нагрев обмотки якоря, а остающаяся ее часть составляет электрическую мощность $P_{\text{эл}}$, потребляемую приемником ($P_{\text{эл}} = UI$), т. е.

$$P_{\text{эм}} = EI = (U + I \cdot r_{\text{я}}) \cdot I = P_{\text{эл}} + I^2 r_{\text{я}}. \quad (6.9)$$

В двигателе протекание тока в обмотке якоря обусловлено приложенным напряжением U , направление которого совпадает с направлением тока (рис. 6.8, б). На проводники с током действует электромагнитная сила $F_{\text{эм}}$, приводящая в движение якорь со скоростью v . При том же направлении тока, что и в генераторе, направление движения будет противоположным. Возникающая в проводниках при пересечении линий поля ЭДС оказывает-

ся противоположной току, а следовательно, и напряжению U , которое должно преодолеть эту ЭДС и падение напряжения в обмотке якоря:

$$U = E + I \cdot r_{\text{я}}. \quad (6.10)$$

При постоянной скорости электромагнитная сила должна преодолеть силу сопротивления $F_{\text{сопр}}$ на валу двигателя. Электрическая мощность, потребляемая двигателем из сети, следующая:

$$P_{\text{эл}} = UI = EI + I^2 r_{\text{я}} = P_{\text{эм}} + I^2 r_{\text{я}}. \quad (6.11)$$

При этом частично идет на нагрев обмотки якоря. Остающаяся ее часть представляет собой электромагнитную мощность, которая оказывается равной механической мощности, развиваемой двигателем на валу:

$$P_{\text{эм}} = EI = F_{\text{эм}} \cdot v = F_{\text{сопр}} \cdot v = P_{\text{мех}}. \quad (6.12)$$

Полученные выражения можно объединить:

$$P_{\text{мх}} = P_{\text{эл}} \pm I^2 r_{\text{я}}; \quad E = U \pm I^2 r_{\text{я}}. \quad (6.13)$$

(знак плюс берется для генератора, минус – для двигателя).

Важнейшим отличительным признаком МПТ является способ возбуждения главного магнитного поля (ГМП). Практически во всех современных машинах ГМП возбуждается электромагнитным путем, для чего по обмотке возбуждения (ОВ), размещенной на сердечниках полюсов машины, пропускается ток. Все рабочие характеристики МПТ при работе, как в режиме генератора, так и в режиме двигателя зависят от способа включения цепи возбуждения по отношению к цепи якоря. Соединение этих цепей может быть параллельным, последовательным, смешанным, и цепи могут быть независимы друг от друга (рис. 6.9).

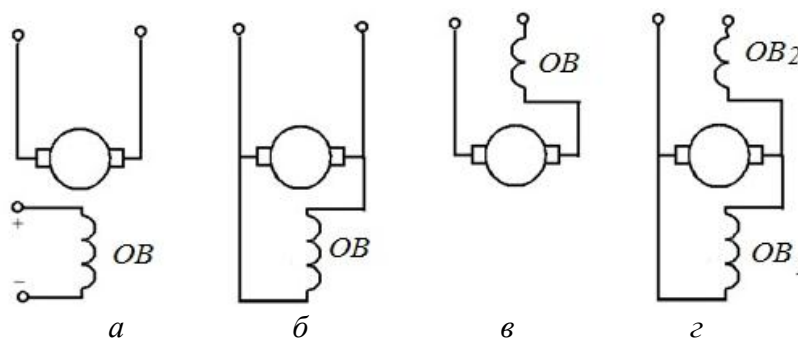


Рис. 6.9. Способы возбуждения МПТ: *а* – независимое; *б* параллельное; *в* – последовательное; *г* – смешанное (компаундное)

Основной рабочей характеристикой генераторов является зависимость выходного напряжения от тока нагрузки $U(I)$. Зависимость называется внешней характеристикой, которую снимают при постоянной частоте вращения ротора (якоря). Характер действия зависимостей напряжения от тока нагрузки определяется способом возбуждения основного поля (рис. 6.10).

У ГПТ с независимым возбуждением обмотка возбуждения ОВ подключена к постороннему источнику тока через регулировочный реостат. При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах ГПТ уменьшается из-за падения напряжения на обмотке якоря (кривая 1 на рис. 6.10) и в результате действия реакции якоря, которая уменьшает магнитный поток машины.

У ГПТ параллельным возбуждением (ГПТ с самовозбуждением): обмотку возбуждения ОВ подключают через регулировочный реостат параллельно обмотке якоря. При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора уменьшается из-за падения напряжения на обмотке якоря, что в свою очередь вызывает уменьшение тока возбуждения и ЭДС в якоре. Дальнейшее увеличение тока нагрузки приводит к такому сильному уменьшению тока возбуждения, что при коротком замыкании цепи нагрузки напряжение генератора падает до нуля (кривая 2 на рис. 6.10).

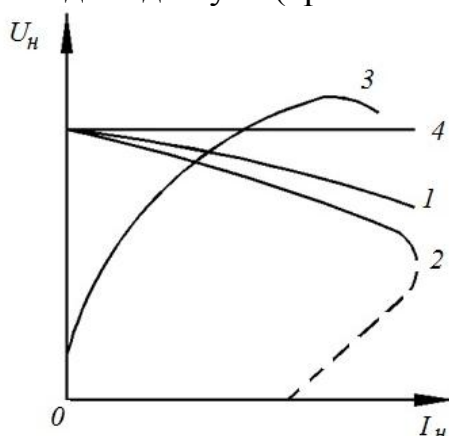


Рис. 6.10. Внешние характеристики ГПТ: 1 – ГПТ с независимым возбуждением; 2 – ГПТ с параллельным возбуждением; 3 – ГПТ с последовательным возбуждением; 4 – ГПТ со смешанным возбуждением

У ГПТ с последовательным возбуждением обмотка возбуждения ОВ включена последовательно с якорем и по обеим обмоткам протекает один и тот же ток. При увеличении тока нагрузки напряжение на зажимах генератора сначала растет до тех пор, пока не наступит насыщение магнитной системы машины, после чего оно начинает быстро уменьшаться из-за падения напряжения на сопротивлении якоря (кривая 3 на рис. 6.10).

У ГПТ со смешанным возбуждением имеется две обмотки возбуждения: ОВ1 и ОВ2 (одна включена параллельно якору, другая – последовательно). Обе обмотки создают магнитные потоки одного направления, за счет чего происходит компенсация реакции якоря. Благодаря этому напряжение на зажимах генератора остается практически постоянным (кривая 4 на рис. 6.10).

6.4.2. ЭДС обмотки якоря и электромагнитный момент

Примерная кривая распределения индукции в воздушном зазоре под одним полюсом показана на рис. 6.11. За краями наконечника полюса индукция резко уменьшается и становится равной нулю посередине между полюсами. Поток одного полюса

$$\Phi_0 = \int B ds = \int_{x=0}^{\tau} B \cdot l dx = B_{cp} \cdot l \cdot \tau, \quad (6.14)$$

где l – длина полюса в осевом направлении;

B_{cp} – среднее значение индукции в зазоре в пределах одного полюсного деления.

Среднее значение ЭДС, возникающей в проводнике, равно

$$E_{cp} = B_{cp} \cdot l \cdot v = \frac{v}{\tau} \Phi_0.$$

Если общее число проводников якоря равно N , то в одной параллельной ветви последовательно соединено $N/2a$ проводников, где a – число пар параллельных ветвей.

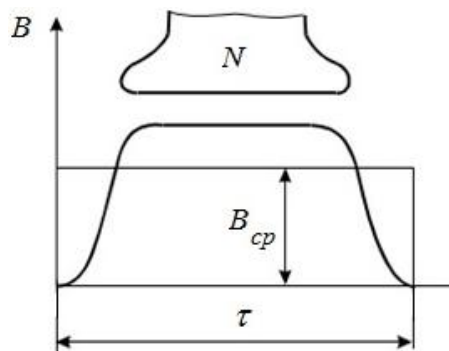


Рис. 6.11. Распределение магнитной индукции под полюсом

Поэтому ЭДС машины определяется выражением

$$E = \frac{N}{2a} E_{cp} = \frac{N}{a} \cdot \frac{v}{\tau} \cdot \Phi_0.$$

Линейную скорость v и полюсное деление τ можно выразить через диаметр якоря D :

$$v = \frac{\omega D}{2}; \quad \tau = \frac{\pi D}{2p},$$

где ω – частота вращения якоря;

p – число пар полюсов.

С учетом этих отношений получаем

$$E = \frac{p\omega}{2\pi} \cdot \frac{N}{a} \cdot \Phi_0. \quad (6.15)$$

В изготовленной машине значения p, N и a постоянны, поэтому

$$E = k\omega\Phi_0, \quad (6.16)$$

где $k = \frac{pN}{2\pi a}$ – конструктивная постоянная.

Ток i_a в любом проводнике обмотки якоря равен току в одной параллельной ветви:

$$i_a = I/2a, \quad (6.17)$$

где I – ток, потребляемый двигателем или отдаваемый генератором.

Среднее значение электромагнитной силы, действующей на проводник,

$$f_{cp} = B_{cp} \cdot l \cdot i_a.$$

Электромагнитный момент, развиваемый всеми проводниками обмотки якоря, Н·м, т. е.

$$M_{эм} = B_{cp} \cdot l \cdot i_a \cdot N \cdot \frac{D}{2} = k \cdot \Phi_0 \cdot I. \quad (6.18)$$

6.4.3. Электрические двигатели постоянного тока (ДПТ)

Если возбудить машину постоянного тока и подключить якорь к сети, она начинает работать двигателем. Двигатели работают, как правило, при неизменном напряжении сети. Лишь в специальных случаях, когда требуется регулирование скорости (частоты вращения ω) двигателя в широких пределах, напряжение на его зажимах изменяется. Так же как и в генераторах, обмотки возбуждения двигателя могут иметь последовательное, параллельное и смешанное согласное включение, а также независимое (от постороннего источника тока или постоянного магнита).

Выясним условия двигателя. На рис. 6.12 изображена зависимость статического момента сопротивления M_c на валу двигателя, возрастающего с увеличением скорости. Предположим, что электромагнитный момент $M_{эм}$ также возрастает и вращающий момент двигателя тает по мере увеличения скорости, но медленнее статического момента (сплошная линия). Точка пересечения кривых соответствует работе двигателя с постоянной скоростью, так как момент сопротивления уравновешивается электромагнитным моментом. Если по каким-либо причинам скорость двигателя увеличится, момент сопротивления станет больше электромагнитного и якорь затормозится. При уменьшении скорости электромагнитный момент превысит момент сопротивления и двигатель будет ускоряться, пока его скорость не примет прежнего значения. Работа будет устойчивой.

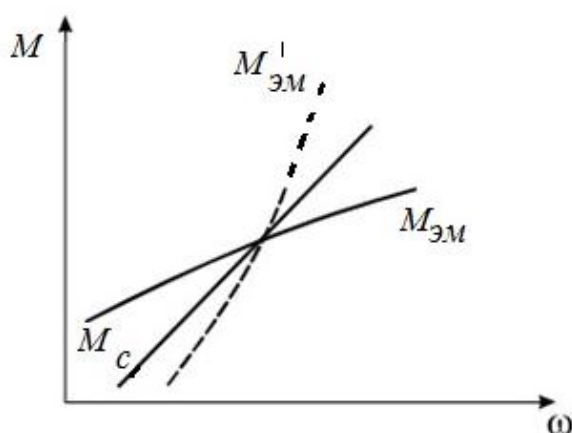


Рис. 6.12. Кривые момента сопротивления двигателя

Если электромагнитный момент (штриховая кривая $M'_{эм}$) возрастает быстрее момента сопротивления, то он может стать больше момента сопротивления и двигатель будет непрерывно разгоняться. При уменьшении электромагнитного момента преобладает момент сопротивления и двигатель затормозится. Работа будет неустойчивой.

Для устойчивой работы двигателя необходимо, чтобы электромагнитный момент возрастал медленнее момента сопротивления:

$$\frac{dM_{эм}}{d\omega} < \frac{dM_c}{d\omega}. \quad (6.19)$$

Двигатели постоянного тока обладают свойством *саморегулирования* — при изменении нагрузки автоматически устанавливается новое значение скорости, при которой двигатель работает устойчиво. Роль регулятора играет противо-ЭДС, возникающая в обмотке якоря. В установившемся режиме ($M_{эм} = M_c$) ток, потребляемый двигателем, определяется моментом на валу:

$$I = \frac{M_c}{k\Phi_0}. \quad (6.20)$$

Из основного уравнения двигателя $U = E + I \cdot r_{я} = k \cdot \omega \cdot \Phi_0 + I \cdot r_{я}$ следует, что скорость определяется электромеханической характеристикой т. е.

$$\omega = \frac{U - I \cdot r_{я}}{k \cdot \Phi_0}. \quad (6.21)$$

При подстановке выражения (6.20) в (6.21) получим следующую механическую характеристику двигателя:

$$\omega = \frac{U}{k \cdot \Phi_0} - M \cdot \frac{r_{я}}{k^2 \cdot \Phi_0^2}. \quad (6.22)$$

6.4.4. Способы регулирования скорости ДПТ

Анализ уравнения (6.22) позволяет определить способы регулирования скорости электродвигателей. Для регулирования скорости можно использовать изменение следующих параметров электродвигателя:

- изменение сопротивления якорной цепи путем введения добавочных сопротивлений;
- изменение магнитного потока путем введения дополнительного сопротивления в цепь обмотки возбуждения;
- изменение напряжения, подводимого к якорной цепи при наличии индивидуального источника питания двигателя.

Механические характеристики двигателя при постоянстве параметров $r_{я}$, Φ_0 , U представляют собой линейные зависимости

$$\omega = a - M \cdot b.$$

Механическая характеристика двигателя, полученная при отсутствии добавочных сопротивлений в якорной цепи, при номинальных значениях магнитного потока и питающего напряжения называется *естественной*.

Изменяя тот или иной параметр механической характеристики, можно для заданных значений момента сопротивления на валу двигателя получить различные скорости вращения, т. е. регулировать скорость двигателя. Полученные механические характеристики будут называться *искусственными*.

Регулирование скорости двигателя изменением сопротивления якорной цепи. Как видно на рис. 6.13 все характеристики двигателя параллель-

ного возбуждения пересекаются в точке ω_0 при $M = 0$. Эта скорость называется *скоростью идеального холостого хода* и определяется выражениями:

$$\omega_0 = \frac{U}{k \cdot \Phi_0}; \quad \Delta\omega = M \frac{r_{\text{я}} + r_{\text{Д}}}{k^2 \cdot \Phi_0^2}.$$

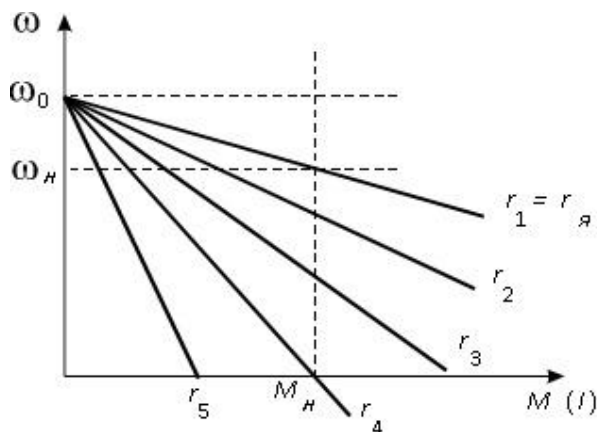
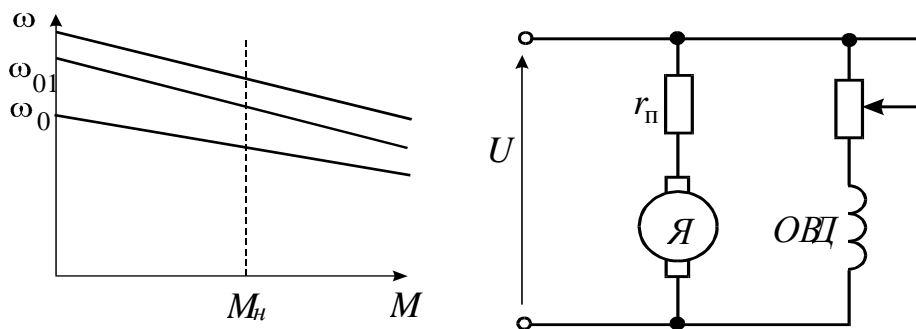


Рис. 6.13. Характеристики двигателя параллельного возбуждения

Если в цепь якоря включать дополнительные сопротивления, то механические характеристики, полученные при этом, называются *искусственными или реостатными*. Реостатные характеристики так же линейны, как и естественные, но имеют значительно больший наклон к оси моментов, т. е. обладают меньшей жесткостью. Чем больше сопротивление, тем круче характеристики и тем меньше ее жесткость.

Регулирование скорости вращения двигателя изменением магнитного потока. При включении регулировочного реостата в цепь обмотки возбуждения (рис. 6.14, а), магнитный поток Φ уменьшается, а скорость двигателя ω растет. Жесткость характеристик при изменении магнитного потока несколько ниже (рис. 6.14, б), чем у естественной. Следует обратить внимание на то, что при малых значениях тока возбуждения, или при случайном обрыве цепи возбуждения, скорость вращения двигателя резко возрастает и становится опасной для механической прочности двигателя. Двигатель идет «вразнос», поэтому при эксплуатации двигателя необходимо следить за исправностью цепи возбуждения.



a

б

Рис. 6.14. Регулирование скорости вращения двигателя: *a* – механические характеристики двигателя параллельного возбуждения; *б* – схема регулирования скорости изменением магнитного потока

Регулирование скорости вращения двигателя, изменением напряжения, подводимого к якорю двигателя (рис. 6.15). Такое регулирование возможно при наличии индивидуального источника питания двигателя. Жесткость характеристики в данном способе регулирования соответствует жесткости естественной характеристики. Раньше часто использовалась схема Г – Д (генератор-двигатель), теперь чаще применяют полупроводниковые преобразователи. Современные преобразователи позволяют получить диапазон регулирования скорости порядка 10000, т. е.

$$\frac{\omega_{\max}}{\omega_{\min}} = 10000.$$

Способ регулирования частотой вращения изменением напряжения – наиболее экономичный из всех выше перечисленных.

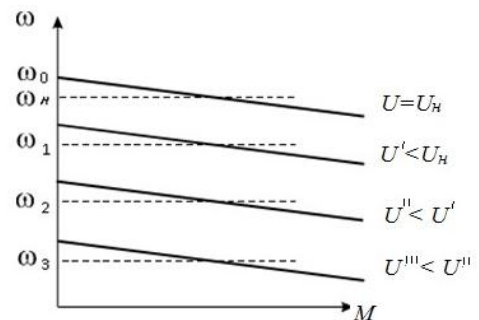


Рис. 6.15. Характеристика ДПТ при изменении напряжения U для регулирования частоты вращения

6.4.5. Пуск электродвигателей постоянного тока

Пуск двигателя постоянного тока может быть осуществлен прямым включением в сеть, введением реостата в цепь якоря или же изменением напряжения источника питания. Пуск путем непосредственного включения двигателя в сеть применяется для двигателей небольшой мощности (до 1–2 кВт). В первый момент в обмотке якоря неподвижного двигателя отсутствует противо-ЭДС и бросок тока превышает номинальное значение в 8–10 и более раз, а механический удар воздействует на детали передачи от двигателя к рабочей машине. Большие толчки тока, получающиеся при включении крупных двигателей, вредно отражаются на работе остальных потребителей, подключенных к сети. У малых двигателей разгон происходит быстро (в течение 0,1–0,3 с), обмотка якоря не успевает значительно нагреться, а толчок тока оказывается по абсолютной величине небольшим.

Для ограничения пускового тока в цепь якоря двигателя включают специальный пусковой реостат, сопротивление которого $r_{\text{п}}$ по мере разгона

двигателя постепенно полностью выводится. Значение начального пускового тока

$$I_{\Pi} = \frac{U}{r_{я} + r_{\Pi}}. \quad (6.23)$$

Обычно сопротивление r_{Π} выбирается так, чтобы пусковой ток был несколько больше номинального: $\frac{I_{\Pi}}{I_{НОМ}} = 1,5 \dots 2,0$. Пусковой реостат не предназначен для длительной работы в цепи якоря. Поэтому по окончании пуска необходимо убедиться, что он полностью отключен, иначе оставшаяся включенной его часть перегреется и будет повреждена.

В процессе разгона в обмотке якоря появляется противо-ЭДС. Ток в какой-либо момент времени определяется выражением

$$I_n = \frac{U - E}{r_{я} + r_n}. \quad (6.24)$$

По мере увеличения скорости возрастания ЭДС E и при неизменном значении r_{Π} уменьшаются ток в якоре и момент, развиваемый двигателем. Когда этот момент станет равным моменту сопротивления на валу, возрастание скорости прекратится. При уменьшении сопротивления r_{Π} увеличатся ток и вращающий момент, который станет больше момента сопротивления, что приведет к дальнейшему возрастанию скорости. Обычно пусковой реостат имеет несколько ступеней, выводимых последовательно одна за другой.

Пуск происходит быстро и легко, когда двигатель развивает значительный момент, превышающий момент сопротивления на валу. Поэтому пуск производится при максимальном значении потока, для чего перед пуском необходимо вывести полностью сопротивление регулировочного реостата в цепи возбуждения. Схема двигателя должна быть собрана так, чтобы ток возбуждения не зависел от тока в якоре и не изменялся при манипуляциях с пусковым реостатом, поэтому цепь возбуждения всегда получает питание от независимого источника. При остановке двигателя и отключении его от сети следует ввести полностью пусковое сопротивление и вывести регулировочное сопротивление в цепи возбуждения, т. е. подготовить двигатель к последующему пуску.

Лекция 7. Электропривод

Электропривод – электромеханическое устройство, предназначенное для электрификации и автоматизации рабочих процессов, состоящее из электродвигателя, передаточных механизмов, соединяющих электродвигатель с исполнительными механизмами, и аппаратов управления.

Электропривод включает в себя системы преобразования передачи и распределения энергии, и управление этими процессами бывает *групповым, индивидуальным и взаимосвязанным*.

В *групповом* приводе один электродвигатель приводит в движение с помощью разветвленной передачи группу механизмов или группу рабочих органов одного механизма (несколько станков или различные рабочие органы одного станка). Кинематическая схема такого привода получается сложной, а сам привод неэкономичный. В настоящее время применение его ограничено.

Привод, в котором электродвигатель приводит в движение только один рабочий орган, называется *индивидуальным* (различный электроинструмент: электродрель, электроточило и т. п.). У такого привода более простая кинематическая схема, повышена экономичность и есть возможность встраивать электродвигатель непосредственно в механизм, что уменьшает его металлоемкость.

Взаимосвязанным называют привод, в котором рабочие органы одного механизма приводятся в движение несколькими электродвигателями. Такой электропривод может состоять из нескольких индивидуальных электроприводов, которые участвуют в общем технологическом процессе и установлены на одном производственном комплекте (в металлорежущих станках устанавливают отдельные приводы главного движения заготовки режущего инструмента и приводы подачи). В таком электроприводе возможна работа нескольких электродвигателей на один рабочий орган, что снижает усилия в рабочем органе и передаче, распределяет их в механизме более равномерно, предотвращает перекос и т. п.

Основная функция электропривода – приводить в движение рабочий механизм и изменять его режим работы в соответствии с требованиями технологического процесса. От свойств электропривода зависят механические характеристики рабочего механизма и электродвигателя. Различают два режима работы электропривода: *установившийся* (статический) и *переходный* (динамический).

При *установившемся* режиме момент или усилие нагрузки не изменяются. При *переходном* – усилие или момент нагрузки изменяются в течение времени. При этом двигатель работает с ускорением или замедлением (разгоняется при пуске, замедляется при торможении). Выбор электро-

двигателя определяется условиями работы и требованиями производственного механизма.

В напряженных режимах работы привода с большой частотой включений, где требуется повышенный или ограниченный пусковой момент, а также регулирование частоты в узких пределах, применяют асинхронные двигатели с контактными кольцами.

Для нерегулируемых приводов средней и большой мощности, работающих в продолжительном режиме с редкими пусками, рекомендуют применять синхронные двигатели. Они отличаются постоянством скорости вращения вала, более высоким КПД и допускают регулирование коэффициента мощности за счет компенсации реактивной мощности (компрессоры, вентиляторы, преобразовательные установки).

При необходимости в широких пределах регулирования скорости и при большой частоте включений применяются двигатели постоянного тока. Обычно применяются двигатели постоянного тока независимого возбуждения с использованием преобразователей переменного тока в регулируемый постоянный. Двигатели постоянного тока последовательного возбуждения служат для электропривода подъемно-транспортных механизмов, т. к. имеют повышенные перегрузочный момент и механическую прочность.

При проектировании электропривода одним из ответственных этапов является выбор электродвигателя. Электродвигатель должен быть наиболее простым по управлению, надежным в эксплуатации и иметь наименьшую стоимость, массу и габариты, а также высокие энергетические показатели.

В любом случае выбирают следующие параметры электродвигателя: род тока, номинальное напряжение, мощность и частоту вращения, способ регулирования, режим работы и конструктивное исполнение.

Для удобства выбора электродвигателя момент или усилие, создаваемые рабочим органом, и потери в передачах приводят к моменту на валу двигателя. Мощность на валу электродвигателя P и момент M определяют с учетом КПД передачи $\eta_{\text{пер}}$:

$$P = P_{\text{р.о.}}/\eta_{\text{пер}}; \quad M = M_{\text{р.о.}}/\eta_{\text{пер}}, \quad (7.1)$$

где $P_{\text{р.о}}$ – сумма мощности рабочего органа;

$M_{\text{р.о}}$ – момент, создаваемый рабочим органом.

7.1. Выбор мощности электродвигателя для длительного режима работы с постоянной мощностью

Для производственных механизмов, предназначенных для работы в длительном неизменном режиме (рис. 7.1), мощность выбирается по каталогу исходя из значений мощности, необходимой для приведения в движение механизма.

$$P_{\text{ном.дв.}} \geq P_{\text{мех.}} \quad (7.2)$$

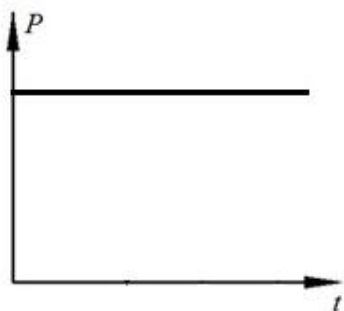


Рис. 7.1. Нагрузочная диаграмма электродвигателя для длительного режима с постоянной мощностью

В данном случае нет необходимости проверки электрического двигателя по нагреву, т. к. при номинальной нагрузке его нагрев всегда в допустимых пределах. Проверку на перегрузку также не выполняют, т. к. нагрузка неизменна.

Пример. Металлорежущий станок работает с постоянной мощностью, определяемой по формуле

$$P_{\text{мех}} = KFv,$$

где K – коэффициент, учитывающий КПД станка и передачи от двигателя станку;

F – сила резания, Н;

v – линейная скорость, м/сек.

Определив $P_{\text{мех}}$, выбирают двигатель по каталогу с учетом формулы (7.2).

7.2. Выбор мощности электродвигателя для длительной переменной нагрузки

При длительной переменной нагрузке меняется и момент на валу электродвигателя. Соответственно такой характер нагрузки приводит к изменению величины тока, потребляемого двигателем из сети, следовательно, к изменению тепловых потерь в нем, что приводит к изменению его нагрева во времени.

Изменение нагрузки на валу характеризует изменение момента, мощности или тока потребляемого электродвигателем из сети. Для определения

нагрузки в таких случаях строятся нагрузочные диаграммы (рис. 7.2) – зависимости развиваемых двигателем момента, мощности или тока от времени $M(t)$, $P(t)$ и $I(t)$.

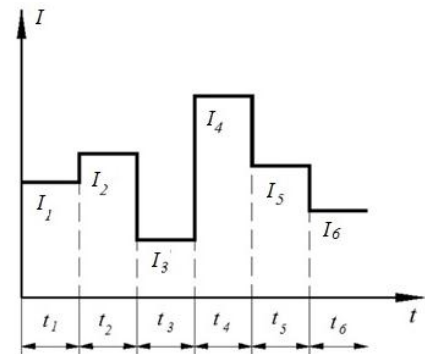


Рис. 7.2. Нагрузочная диаграмма электродвигателя при длительной переменной нагрузке

Для расчета мощности применяют методы эквивалентных величин: тока, момента и мощности.

Метод эквивалентного тока дает возможность выбрать электродвигатель при наличии графика изменения тока во времени (рис. 7.2). Этот метод основан на замене действительного изменяющегося во времени по величине значения тока, потребляемого двигателем, эквивалентным током, при котором потери в нагрузке соответствуют средним потерям в нем при переменном режиме работы. При выборе мощности электродвигателя по этому методу учитываются условия его охлаждения в процессе работы.

При работе двигателя за время работы $t_1 \dots t_n$ выделяемое тепло $Q_1 \dots Q_n$ согласно закону Джоуля-Ленца. За время работы $T = t_1 + t_2 \dots t_n$ можно определить общее количество тепла, а именно:

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0,24I_1^2 R t_1 + 0,24I_2^2 R t_2 + \dots + 0,24I_n^2 R t_n. \quad (7.3)$$

Проходящие по обмотке якоря двигателя в отдельные отрезки времени токи $I_1, I_2 \dots I_n$ можно заменить эквивалентным током, который, проходя по обмотке двигателя, выделял бы такое количество тепла, если бы по нему проходили действительные токи. Тогда, преобразовав уравнение (7.3), получим

$$0,24I_1^2 R t_1 + 0,24I_2^2 R t_2 + \dots + 0,24I_n^2 R t_n = 0,24I_9^2 R T. \quad (7.4)$$

И, сократив (7.4) на 0,24, получим выражение эквивалентного значения тока при длительной переменной нагрузке:

$$I_9 = \sqrt{\frac{I_n^2 t_n + I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots + I_T^2 t_T}{K_1(t_n + t_T) + t_1 + t_2 + \dots + K_2 t_0}}, \quad (7.5)$$

где $t_1, t_2, t_3 \dots$ – промежутки времени, соответствующие неизменной нагрузке;

- $I_1, I_2, I_3 \dots$ – значения токов, потребляемых двигателем в соответствующие промежутки времени;
 I_n, I_T – средние значения тока, потребляемого при пуске и торможении;
 t_n, t_T, t_0 – время пуска, торможения и паузы;
 K_1 – коэффициент, учитывающий уменьшение теплоотдачи электродвигателя при пуске и торможении;
 K_2 – коэффициент, учитывающий ухудшение условий охлаждения за время паузы.

Для периодов пуска и торможения значение коэффициента $K_1 = 0,75$ для электродвигателей постоянного тока и $K_1 = 0,5$ для асинхронных двигателей, а для остановки (паузы) $K_2 = 0,5$ и $K_2 = 0,25$ соответственно.

Если время работы двигателя превышает в 50–60 раз суммарное время пуска и торможения, то эквивалентный ток

$$I_{\text{э}} = \sqrt{\frac{1}{t_{\text{ц}}}(I_n^2 t_n + I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \dots)}, \quad (7.6)$$

где $t_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 + \dots$ – время цикла работы двигателя.

Определив ток по каталогу, подбирается электродвигатель с номинальным значением тока, равным или больше эквивалентного тока $I_{\text{ном}} \geq I_{\text{э}}$.

После выбора двигателя он должен быть проверен по допустимой нагрузке по току и удовлетворять следующему условию:

$$\lambda \geq \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{ном}}}, \quad (7.7)$$

где λ – допустимый коэффициент перегрузки электродвигателя по току (определяется по каталогу);

I_{max} – наибольший ток рабочего режима (находится из графика нагрузки электродвигателя).

Если выбранный по условиям нагрева электродвигатель не удовлетворяет вышеуказанному условию, необходимо выбрать по каталогу электродвигатель большей мощности, чтобы при этом он проходил и по условиям перегрузочной способности. Проверку асинхронных и синхронных электродвигателей на перегрузку по моменту проводят исходя из условия

$$K_{\text{доп.}} \lambda_{\text{max}} M_{\text{ном.}} \geq M_{\text{max ст.}}, \quad (7.8)$$

где $K_{\text{доп.}}$ – коэффициент допустимой перегрузки (принимается равным 0,8...0,85);

$\lambda \geq \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном.}}}$ – кратность максимального момента электродвигателя (определяется по каталогу);

$M_{\text{ном.}}$ – номинальный момент электродвигателя;

$M_{\text{макст.}}$ – максимальный момент нагрузки (находится по нагрузочной диаграмме).

Асинхронный двигатель проверяется также по достаточности развиваемого им пускового момента

$$\lambda_{\text{пуск}} M_{\text{ном.}} \geq K_{\text{п}} M_{\text{с}}, \quad (7.9)$$

где $\lambda_{\text{пуск}} \geq \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{ном.}}}$ – кратность пускового момента двигателя при пуске;

$M_{\text{с}}$ – момент сопротивления на валу двигателя при пуске;

$K_{\text{п}} = 1,2 \dots 1,3$ – коэффициент запаса пускового момента.

Метод эквивалентного тока *не применяется* в случаях если:

- необходимо учитывать изменения потерь в стали и потерь на трение в процессе работы;
- есть значительные изменения активного сопротивления обмоток в процессе работы электродвигателя (асинхронные электродвигатели с глубоким пазом и с двойной клеткой в пусковых и тормозных режимах).

В перечисленных случаях применяют методы, основанные на непосредственном определении потерь в электродвигателе.

При определении мощности электродвигателя на практике рассматривают чаще нагрузочные моменты, поэтому используют *метод эквивалентного момента*. Этот метод вытекает непосредственно из метода эквивалентного тока, т. к. момент двигателя пропорционален току при постоянном магнитном потоке ($\Phi = \text{const}$). Соответственно эквивалентный момент на валу электродвигателя определяется аналогично эквивалентному току (7.4):

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_n^2 t_n + M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \dots + M_T^2 t_T}{K_1(t_n + t_T) + t_1 + t_2 + \dots + K_2 t_0}}, \quad (7.10)$$

где M_n, M_T, M_1, M_2 – текущие значения момента нагрузки на валу электродвигателя;

t_n, t_T, t_1, t_2 – промежутки времени, соответствующие моментам M_n, M_T, M_1, M_2 и т. д.

Без учета влияния на нагрев электродвигателя торможения, разгона и останова момент определяют

$$M_{\text{э}} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + M_3^2 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}. \quad (7.11)$$

По полученному значению $M_{\text{Э}}$ по каталогу выбирается необходимый электродвигатель, исходя из условия

$$P_{\text{ном.}} \geq \frac{M_{\text{Э}} n_{\text{ном.}}}{9550} \text{ кВт}, \quad (7.12)$$

где $n_{\text{ном}}$ – номинальная скорость вращения электродвигателя.

Далее проводят проверку выбранного двигателя по условиям перегрузки $\lambda \geq \frac{M_{\text{max.нагр.}}}{M_{\text{ном.дв.}}}$ и по кратности пуска $\frac{M_{\text{пуск.}}}{M_{\text{ном.}}}$.

Метод эквивалентного момента не применяется для двигателей постоянного тока последовательного возбуждения, асинхронных короткозамкнутых двигателей при работе в тормозных и пусковых режимах. В этом случае магнитный поток электродвигателя в процессе работы не остается постоянным, т. к. при этом между током и моментом электродвигателя нарушается пропорциональность.

Более удобным при выборе мощности электродвигателя является *метод эквивалентной мощности*. Этот метод предполагает постоянство значений КПД для ДПТ, а для двигателей переменного тока и коэффициента мощности в процессе работы. Особенно этот метод удобен при наличии нагрузочной диаграммы исполнительного механизма по мощности. В этом случае мощность электродвигателя определяется

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{P_n^2 t_n + P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + \dots + P_T^2 t_T}{K_1(t_n + t_T) + t_1 + t_2 + \dots + K_2 t_0}}. \quad (7.13)$$

Если не учитывается влияние пуска, торможения и работа без нагрузки, то мощность электродвигателя

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + \dots}{t_1 + t_2 + t_3 + \dots}}. \quad (7.14)$$

По полученному значению (7.12 или 7.13) выбирается электродвигатель при условии $P_{\text{ном.}} \geq P_{\text{Э}}$ по каталогу (учитывая $n_{\text{ном.}}$).

Затем обязательно двигатель проверяется на перегрузочную способность и по кратности пускового момента.

$$M_{\text{ном.}} = \frac{9550 P_{\text{ном.дв.}}}{n_{\text{ном.}}}, \quad M_{\text{max.дв.}} = \lambda M_{\text{ном.}}, \quad M_{\text{max.нагр.}} = \frac{9550 P_{\text{max.}}}{n}.$$

7.3. Выбор мощности электродвигателя для кратковременного режима работы

По условиям технологического процесса некоторые исполнительные механизмы работают короткие промежутки времени после длительных пауз, измеряемых часами или десятками часов. Такой режим характерен для приводов шлюзов, вспомогательных механизмов электротермических установок, зажимов колонн металлорежущих станков и др. В каждом конкретном случае график нагрузки может иметь одну или несколько ступеней (рис. 7.3).

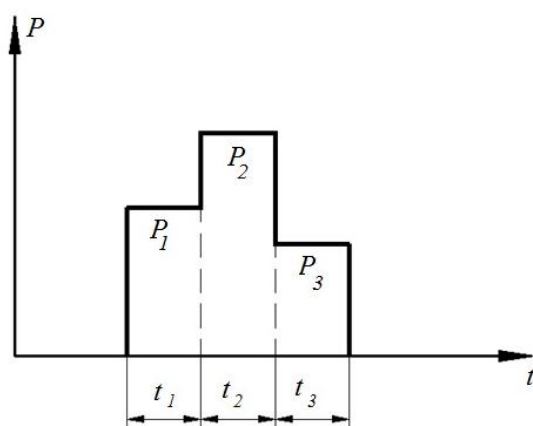


Рис. 7.3. Нагрузочная диаграмма электродвигателя при кратковременно ступенчатом режиме работы

При этом принимается, что в пределах каждой ступени нагрузка электродвигателя постоянна или приблизительно постоянна.

При кратковременном режиме электродвигатель может быть нагружен в большей степени, чем в длительном режиме. Это объясняется тем, что за короткое время работы электродвигатель не успевает нагреться до максимального значения температуры, допустимой для изоляции данного класса (т. е. не будет полностью использован по нагреву). А если пауза в работе велика, то электродвигатель успевает охладиться до температуры окружающей среды и начнет работать с холодного состояния.

Промышленность выпускает электродвигатели специально для кратковременного режима на стандартную продолжительность работы – 15, 30 и 60 мин. Выбор мощности в этом случае не сложен. По заданному значению мощности при кратковременном режиме и времени работы выбирается требуемый электродвигатель, учитывая условия – мощность должна быть равна или несколько больше заданного значения мощности.

Если нагрузочная диаграмма ступенчатого характера (рис. 7.3), то при выборе мощности используется метод эквивалентной мощности, эквивалентного тока или эквивалентного момента по приведенной выше

методике. При этом должны соблюдаться условия $P_{ном.} \geq P_{\text{Э}}$; $M_{ном.} \geq M_{\text{Э}}$; $I_{ном.} \geq I_{\text{Э}}$.

7.4. Выбор мощности электродвигателя для повторно-кратковременного режима работы

Для повторно-кратковременного режима характерно периодическое чередование небольших периодов работы и пауз (рис. 7.4).

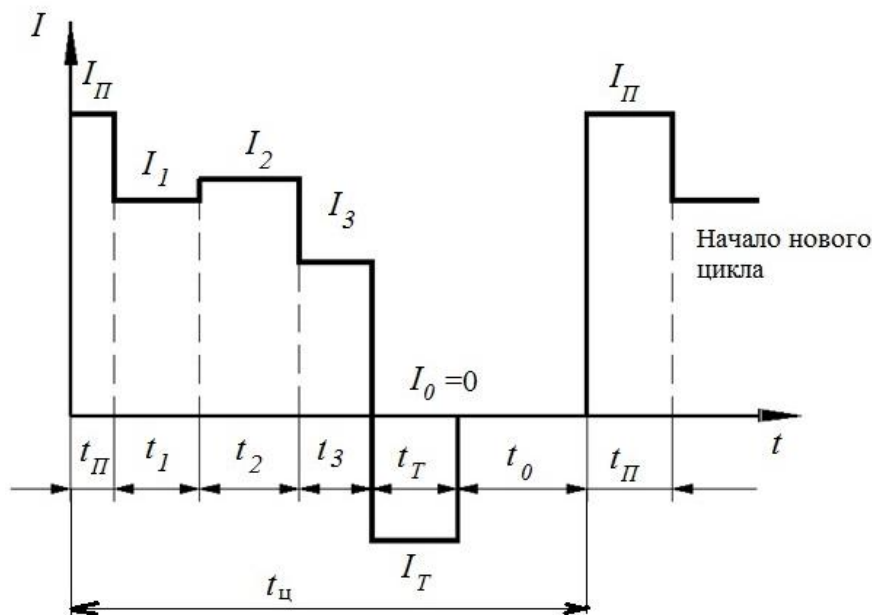


Рис. 7.4. Нагрузочная диаграмма электродвигателя при повторно-кратковременном ступенчатом режиме двигателя

Из нагрузочной диаграммы видно, что за время одного периода работы электродвигатель не нагреется до установившегося своего значения, а за время одной паузы не успеет охладиться до температуры окружающей среды.

При таком режиме может быть использован электродвигатель любого исполнения. Но для более полного использования электродвигателя промышленность выпускает двигатели, специально предназначенные для повторно-кратковременного режима работы. Такие двигатели *характеризуются продолжительностью включения (ПВ)*:

$$ПВ = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} 100 \%, \quad (7.15)$$

где t_p – время работы двигателя под нагрузкой;

$t_{\text{ц}} = t_p + t_0$ – время цикла, равное суммарному времени работы и паузы электродвигателя.

Время цикла при повторно-кратковременном режиме не должно превышать 10 минут. В противном случае электродвигатель выбирается для длительного режима работы. Для повторно-кратковременного режима выпускают специальные двигатели, рассчитанные на стандартные значения продолжительности включения:

$$ПВ \% = 15, 25, 40 \text{ и } 60 \%$$

На эти значения ориентируются при выборе электродвигателя.

Если $ПВ > 60 \%$, то электродвигатель выбирается для длительного режима работы. Выбор мощности электродвигателя можно произвести по методу эквивалентного тока, эквивалентному моменту и эквивалентной мощности. В расчетах мощности по этим методам для повторно-кратковременного режима *время паузы не включается*, т. к. оно уже учитывается продолжительностью включения. Для выбранного двигателя должны соблюдаться условия

$$P_{\text{ном.}} \leq P_{\text{э}}; M_{\text{ном.}} \leq M_{\text{э}}; I_{\text{ном.}} \leq I_{\text{э}},$$

т. к. по каталогу при заданном значении $ПВ \% = ПВ_{\text{ном.}} \%$ должен быть выбран электродвигатель с номинальной мощностью, которая соответствует его нагрузке.

Если фактическая продолжительность включения $ПВ \%$ отличается от номинального $ПВ_{\text{ном.}} \%$, то фактический эквивалентный ток $I'_{\text{э}}$, эквивалентный момент $M'_{\text{э}}$ или эквивалентная мощность $P'_{\text{э}}$ пересчитывают на ближайшую (большую или меньшую) номинальную продолжительность включения:

$$I'_{\text{э}} = I_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{\text{ном.}}}}; P'_{\text{э}} = P_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{\text{ном.}}}}; M'_{\text{э}} = M_{\text{э}} \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{\text{ном.}}}}, \quad (7.16)$$

где $I_{\text{э}}$, $P_{\text{э}}$, $M_{\text{э}}$ – соответственно эквивалентный ток, эквивалентная мощность и эквивалентный момент (пересчитанные значения на ближайшее $ПВ \%$, предлагаемое каталогом).

Если при работе электродвигателя наблюдаются резкие колебания нагрузки, то следует проверить перегрузочную способность электродвигателя – $M_{\text{кр.}}/M_{\text{ном.}}$ (критический момент – $M_{\text{кр.}}$, номинальный момент – $M_{\text{ном.}}$).

Пример. Определить мощность двигателя для привода механизма, режим работы которого задан нагрузочной диаграммой (рис. 7.5).

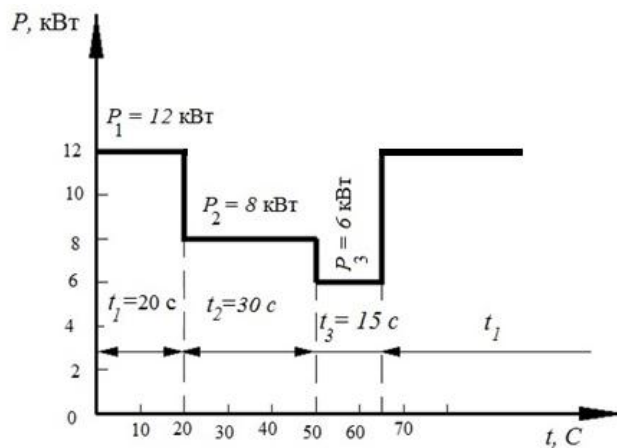


Рис. 7.5. Нагрузочная диаграмма

По технологическим условиям следует использовать трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с частотой вращения $n_2 = 960 \text{ мин}^{-1}$. Помещение, где будет установлен двигатель, – сухое, без пыли и грязи.

Решение. Исходя из нагрузочной диаграммы видно, что режим работы – длительная переменная нагрузка. Рассчитаем эквивалентную мощность

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^n (P_K^2 t_K)}{t_{\text{ц}}}},$$

где $t_{\text{ц}}$ – время цикла работы.

$$t_{\text{ц}} = t_1 + t_2 + t_3 = 20 + 30 + 15 = 68 \text{ с};$$

$$P_{\text{Э}} = \sqrt{\frac{12^2 \cdot 20 + 8^2 \cdot 30 + 6^2 \cdot 15}{68}} = 9,05 \text{ кВт}.$$

По каталогу в качестве приводного двигателя можно выбрать короткозамкнутый двигатель в защищенном исполнении типа АЧ-61-6 с характеристиками: 380/220 В; $P_{\text{ном.}} = 10 \text{ кВт}$; $n_{\text{ном.}} = 965 \text{ мин}^{-1}$; $\eta_{\text{ном.}} = 0,87$; $M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном.}} = 1,2$; $M_{\text{max}}/M_{\text{ном.}} = 1,8$.

После выбора двигателя необходимо обязательно проверить его по перегрузочной способности.

1. Определяем номинальный момент двигателя

$$M_{\text{ном.}} = \frac{9550 P_{\text{ном.}}}{n_{\text{ном.}}} = \frac{9550 \cdot 10}{965} = 99 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2. Определяем максимальный (критический) момент

$$M_{\max} = 1,8 \cdot M_{\text{ном.}} = 1,8 \cdot 99 = 178 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

3. Определяем максимальный момент нагрузки (по диаграмме)

$$M_{\text{макс.ст.}} = \frac{9550 \cdot 12}{960} = 119 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

После выполненных расчетов видно, что по перегрузочной способности двигатель подходит, т. к. выполняется условие – $M_{\max} > M_{\text{макс.ст.}}$, $178 > 119$.

Лекция 8. Основы промышленной электроники

8.1. Общие сведения

Промышленная электроника – наука о применении электронных приборов и устройств в промышленности. В промышленной электронике можно выделить три области: информационную электронику (ИЭ), энергетическую электронику (ЭЭ), электронную технологию (ЭТ).

Информационная электроника является основой электронно-вычислительной, информационно-измерительной техники и автоматизации производства.

Энергетическая электроника является основой устройств и систем преобразования электрической энергии средней и большой мощностей. Сюда относятся выпрямители, инверторы, мощные преобразователи частоты и др.

Электронная технология включает в себя методы и устройства, используемые в технологических процессах, основанные на действии электрического тока и электромагнитных волн различной длины (высокочастотный нагрев и плавка, ультразвуковая резка и сварка и т. д.), электронных и ионных пучков (электронная плавка, сварка и т. д.).

Главные свойства электронных устройств (ЭУ):

- высокая чувствительность;
- быстродействие;
- универсальность.

Чувствительность электронных устройств – это абсолютное значение входной величины, при котором электронное устройство начинает работать. Чувствительность современных электронных устройств составляет 10^{-17} А по току, 10^{-13} В по напряжению, 10^{-24} Вт по мощности.

Быстродействие электронных устройств обуславливает их широкое применение в автоматическом регулировании, контроле и управлении быстропротекающими процессами, достигающими долей микросекунды.

Универсальность заключается в том, что в электронных устройствах используется электрическая энергия, которая сравнительно легко получается из различных видов энергии и легко преобразуется в другие виды энергии, что очень важно, т. к. в промышленности используются все виды энергии. В настоящее время широкое применение в промышленной электронике находят полупроводниковые приборы, т. к. они имеют важные достоинства:

- высокий КПД;
- долговечность;
- надежность;
- малые масса и габариты.

Одним из главных направлений развития полупроводниковой электроники в последние десятилетия являлась **интегральная микроэлектроника**.

В последние годы широкое применение получили полупроводниковые интегральные *микросхемы* (ИС).

Микросхема – микроминиатюрный функциональный узел электронной аппаратуры, в котором элементы и соединительные провода изготавливаются в едином технологическом цикле на поверхности или в объеме полупроводника и имеют общую герметическую оболочку.

В больших интегральных схемах (БИС) количество элементов (резисторов, диодов, конденсаторов, транзисторов и т. д.) достигает нескольких сотен тысяч, а их минимальные размеры составляют 2...3 мкм. Быстродействию БИС привело к созданию микропроцессоров и микрокомпьютеров.

В последнее время широкое развитие получил новый раздел науки и техники – **оптоэлектроника**. Физическую основу оптоэлектроники составляют процессы преобразования электрических сигналов в оптические и обратно, а также процессы распространения излучения в различных средах.

Оптоэлектроника открывает реальные пути преодоления противоречия между интегральной полупроводниковой электроникой и традиционными электрорадиокомпонентами (резисторы переменные, кабели, разъемы, ЭЛТ, лампы накаливания и т. д.).

Преимуществом оптоэлектроники являются неисчерпаемые возможности повышения рабочих частот и использование принципа параллельной обработки информации.

8.2. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковый диод (ПД) – прибор с одним $p - n$ переходом и двумя выводами. Он хорошо пропускает ток одного направления и плохо пропускает ток противоположного направления. Эти токи и соответствующие им напряжения между выводами полупроводникового диода называются прямыми $I_{пр.}$ и обратными $I_{обр.}$ токами, прямыми $U_{пр.}$ и обратными $U_{обр.}$ напряжениями.

На рис. 8.1 приведено условное изображение полупроводникового диода в схемах электрических цепей и его идеализированная вольтамперная характеристика (ВАХ).

Прямой ток $I_{пр.}$ в ПД направлен от одного вывода (анода) к другому (катоде). Анализ ВАХ ПД позволяет сделать вывод, что ПД – нелинейный элемент и сопротивление его зависит от величины и направления тока.

Так, прямое сопротивление ПД составляет обычно не выше нескольких десятков Ом, а обратное сопротивление не ниже нескольких сотен кОм.

Вольтамперная характеристика ПД имеет ярко выраженные три участка, которые называются прямой (I), обратной (II) ветвями и ветвью стабилизации (III).

Полупроводниковые диоды, у которых рабочим участком является участок стабилизации III, называются *стабилитронами*. Они имеют значительное обратное сопротивление и применяются в схемах стабилизации напряжения.

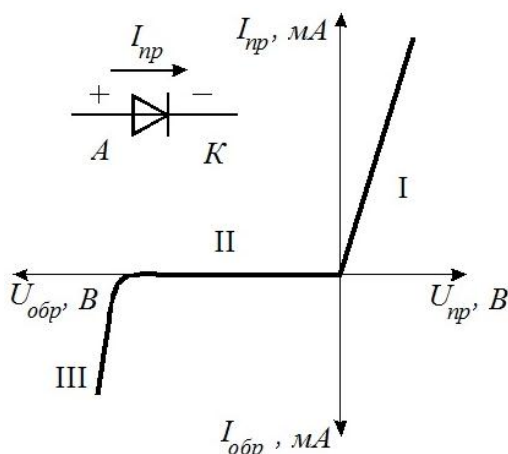


Рис. 8.1. Вольтамперная характеристика ПД и его условное обозначение

8.3. Выпрямители на полупроводниковых диодах

Наиболее часто источники постоянного напряжения получают путем преобразования синусоидального (переменного) напряжения в постоянное напряжение. Устройства, осуществляющие такое преобразование, называются *выпрямителями*.

В большинстве случаев для выпрямления переменного напряжения применяются выпрямители на ПД, поскольку они хорошо проводят ток в прямом направлении и плохо в обратном.

Простейшая схема выпрямителя показана на рис. 8.2, а. В ней последовательно соединены источник переменной ЭДС (e), диод D и нагрузочный резистор R_H . Эта схема называется *однополупериодной*. Часто ее называют однофазной однопериодной, т. к. источник переменной ЭДС является однофазным и ток проходит через него в одном направлении один раз за период (один такт за период).

В качестве источника синусоидальной ЭДС обычно служит силовой трансформатор, включенный в электрическую сеть (рис. 8.2, б).

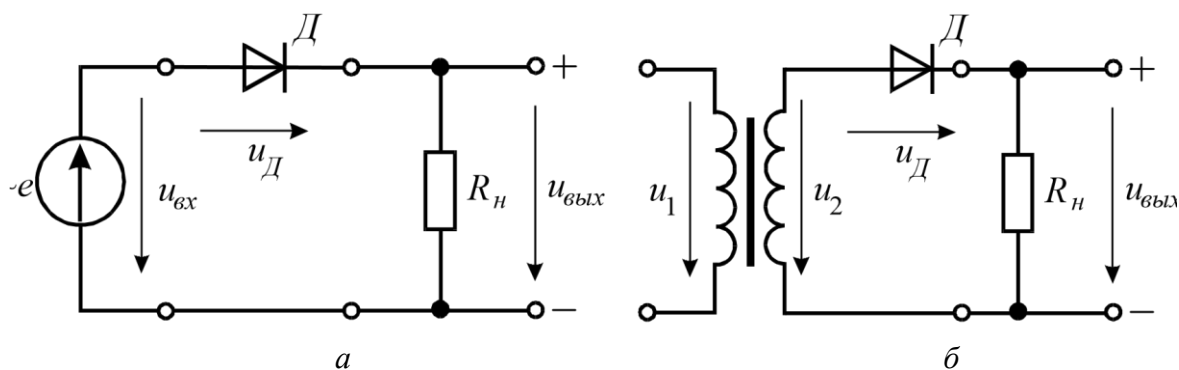
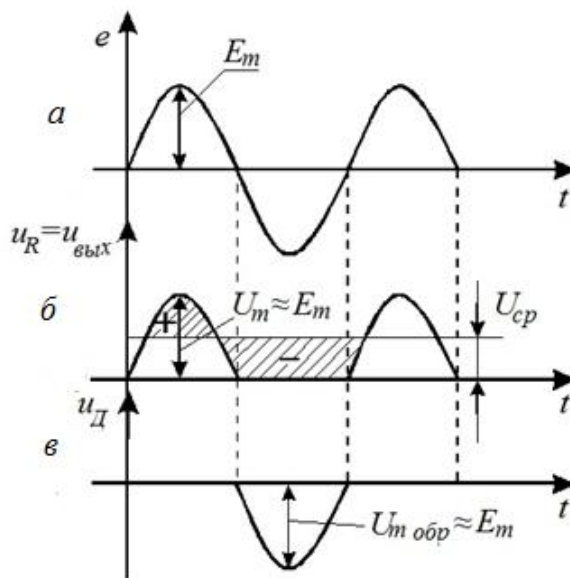


Рис. 8.2. Схемы выпрямителей на ПД: а – простейшая схема; б – трансформатор включенный в простейшую сеть

Графики на рис. 8.3 иллюстрируют процессы в выпрямителе. ЭДС генератора изображена синусоидой с амплитудой E_m (рис. 8.3, а).

Рис. 8.3. Графики напряжений выпрямителя, поясняющие их работу



В течение положительного полупериода ЭДС e напряжение для диода является прямым, сопротивление его мало и проходит ток i , создающий на резисторе R_n падение напряжения $u_R = u_{\text{вых}}$. В течение следующего полупериода напряжение является обратным, тока практически нет из-за большого сопротивления диода ($R_D \gg R_n$) и $u_R = u_{\text{вых}} = 0$.

Таким образом, через диод D , нагрузочный резистор R_n и генератор проходит пульсирующий ток в виде импульсов, длящихся полупериода и разделенных промежутками также в полупериода. Этот ток называют *выпрямленным током*. Он создает на резисторе R_n пульсирующее выпрямленное напряжение, полярность которого со стороны катода получается плюс, а со стороны анода – минус.

Полезной частью выпрямленного напряжения является его *постоянная составляющая*, или *среднее значение*, $U_{\text{ср}}$, которое за весь период равно

$$U_{\text{ср.}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt = \frac{U_m}{\pi} \approx 0.318U_m.$$

Вычитая из пульсирующего напряжения его среднее значение, получим переменную составляющую U , которая имеет несинусоидальную форму. Для нее нулевой осью является прямая линия, изображающая постоянную составляющую. Полуволны переменной составляющей U заштрихованы (рис. 8.3, б).

Переменная составляющая является «вредной» частью выпрямленного напряжения. Для ее уменьшения в нагрузочном резисторе и в выходном напряжении, т. е. для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения, применяют *сглаживающие фильтры* (СФ). Простейшим СФ является конденсатор большой емкости, через который ответвляется переменная составляющая тока, чтобы возможно меньшая часть ее проходила в нагрузку.

Конденсатор хорошо сглаживает пульсации, если его емкость $C_{\text{ф}}$ такова, что выполняется условие

$$\frac{1}{\omega \cdot C_{\text{ф}}} \ll R_{\text{н}}.$$

При наличии конденсатора большой емкости $U_{\text{ср.}}$ приближается к U_m и может быть равным $(0,8 - 0,95)U_m$ и даже выше.

Основными электрическими параметрами однополупериодного выпрямителя являются:

- средние значения выпрямленного тока и напряжения $I_{\text{ср.}}, U_{\text{ср.}}$;
- мощность нагрузки $P_{\text{ср.}} = I_{\text{ср.}} \cdot U_{\text{ср.}}$;
- амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения $\sim U_m$;
- коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения $p = \frac{U_m}{U_{\text{ср}}}$
- действующие значения тока и напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора I_1, U_1 и I_2, U_2 ;
- типовая мощность трансформатора $S_{\text{тр}} = 0,5(S_1 + S_2)$, где $S_1 = U_1 \cdot I_1$, $S_2 = U_2 \cdot I_2$;
- коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{\text{ср.}}}{(P_{\text{ср.}} + P_{\text{тр.}} + P_{\text{д}})},$$

где $P_{\text{тр.}}$ – потери в трансформаторе;

$P_{\text{д}}$ – потери в диодах.

Однополупериодный выпрямитель применяют обычно для питания высокоомных нагрузочных устройств малой мощности (электроннолучевых трубок и др.), допускающих повышенную пульсацию.

Наибольшее распространение получил *двухполупериодный мостовой выпрямитель* (рис. 8.4). Он состоит из трансформатора Tp и четырех диодов $D1, D2, D3, D4$, подключенных к вторичной обмотке трансформатора по мостовой схеме. К одной из диагоналей моста подсоединяется обмотка Tp , а к другой – нагрузочный резистор R_n . Каждая пара диодов $D1, D3, D2, D4$ работает поочередно.

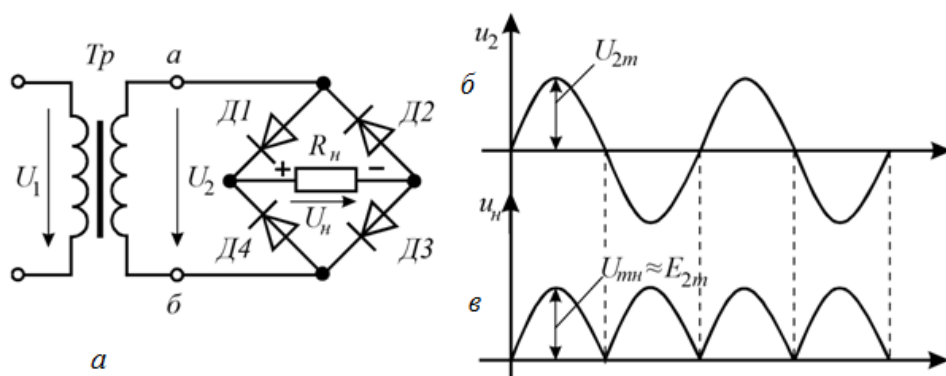


Рис. 8.4. Двухполупериодный мостовой выпрямитель: a – схема; b, c – временные диаграммы напряжений

Диоды $D1, D3$ открыты в I полупериод напряжения u_2 , когда потенциал точки a выше потенциала точки b . В следующий полупериод напряжения u_2 потенциал точки b выше потенциала точки a , диоды $D2, D4$ открыты, а диоды $D1, D3$ закрыты. В оба полупериода, как видно из рис. 8.4, ток через нагрузочный резистор R_n имеет одно и то же направление.

Выражения для средних значений, выпрямленных напряжения и тока имеют вид:

$$U_{\text{нсп.}} = \frac{1}{\left(\frac{T}{2}\right)} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{2m} \sin \omega t dt = \frac{2U_{2m}}{\pi};$$

$$I_{\text{нсп.}} = \frac{U_{\text{нсп.}}}{R_n}.$$

Анализ приведенных соотношений показывает, что при одинаковых значениях параметров трансформаторов и сопротивлений R_n мостовой выпрямитель по сравнению с однополупериодным имеет следующие преимущества:

- средние значения выпрямленного тока $I_{\text{нсп.}}$ и напряжения $U_{\text{нсп.}}$ в два раза больше;

- пульсации значительно меньше;
- частота пульсаций в два раза выше, что уменьшает габариты фильтра.

8.4. Транзисторы

8.4.1. Общие сведения

Транзисторы (Т) – полупроводниковые приборы, служащие для усиления мощности электрических сигналов. По принципу действия транзисторы делятся на биполярные и полевые (униполярные).

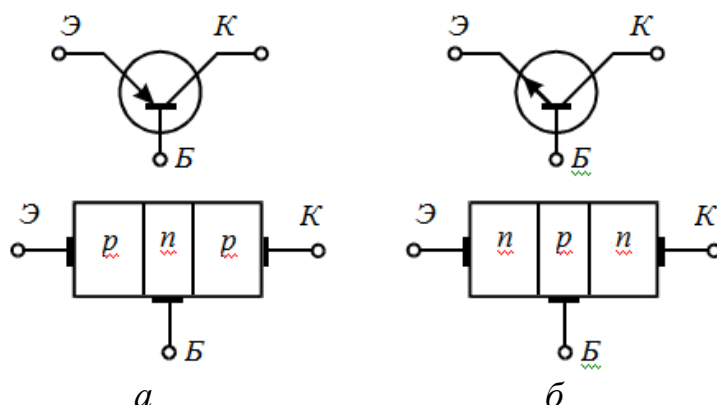


Рис. 8.5. Транзисторы и их условные обозначения: *а* – структура биполярного транзистора типов $p-n-p$, *б* – структура биполярного транзистора типов $n-p-n$

Биполярный транзистор (БТ) представляет собой трехслойную структуру (рис. 8.5). В зависимости от способа чередования слоев БТ называются транзисторами типа $p-n-p$ или типа $n-p-n$ (рис. 8.5, *а*, *б*).

Транзистор называется биполярным, если физические процессы в нем связаны с движением носителей обоих знаков (свободных электронов и дырок).

В биполярном транзисторе средний слой называется *базой* (Б), один крайний слой – *коллектором* (К), а другой крайний слой – *эмиттером* (Э). Каждый слой имеет свой вывод, с помощью которого биполярный транзистор подключается в цепь.

Структура и условное обозначение одного из видов полевых транзисторов показаны на рис. 8.6. У полевых транзисторов и биполярных имеется три электрода, называемые *истоком*, *стоком* и *затвором*.

Истоком (И) называется электрод, из которого в центральную область ПТ (канал) входят основные носители заряда n или p -типов.

Сток (С) – электрод, через который основные носители уходят из канала.

Затвор ($З$) – электрод, управляющий потоком носителей заряда.

Поскольку в полевом транзисторе ток определяется движением носителей только одного знака p или n -типов, эти транзисторы называют также *униполярными, n -область (затвор)*.

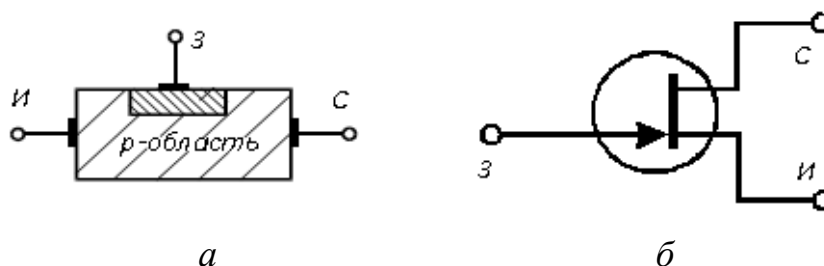


Рис. 8.6. Структура и условное обозначение полевого транзистора с каналом p -типа

8.4.2. Усилители на транзисторах

Усиление электрических сигналов необходимо при приеме радиосигналов, контроле и автоматизации технологических процессов, при измерении электрических и неэлектрических величин и т. д.

Простейшим усилителем является *усилительный каскад* (рис. 8.7), содержащий нелинейный управляемый элемент УЭ, как правило, биполярный или полевой транзистор, резистор R и источник электрической энергии E . Усилительный каскад имеет *входную цепь*, к которой подводится входное напряжение $U_{вх}$ (усиливаемый сигнал) и *выходная цепь*, с которой снимается выходное напряжение $U_{вых}$ (усиленный сигнал).

Усиленный сигнал имеет значительно большую мощность по сравнению с входным сигналом. Увеличение мощности сигнала происходит за счет источника электрической энергии. Процесс усиления осуществляется посредством изменения сопротивления управляемого элемента, а следовательно, и тока в выходной цепи под воздействием входного напряжения или тока.

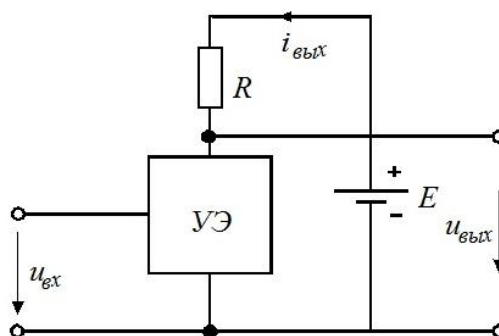


Рис. 8.7. Структурная схема усилительного каскада

Выходное напряжение снимается с управляемого элемента или резистора R . Таким образом, усиление основано на преобразовании электриче-

ской энергии источника постоянной ЭДС E в энергию выходного сигнала за счет изменения сопротивления управляемого элемента по закону, задаваемому входным сигналом.

Основными параметрами усилительного каскада являются:

- коэффициент усиления по напряжению $K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ.}}}{U_{\text{ВХ.}}}$;
- коэффициент усиления по току $K_i = \frac{I_{\text{ВЫХ.}}}{I_{\text{ВХ.}}}$;
- коэффициент усиления по мощности $K_p = \frac{P_{\text{ВЫХ.}}}{P_{\text{ВХ.}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ.}}}{U_{\text{ВХ.}}} \cdot \frac{I_{\text{ВЫХ.}}}{I_{\text{ВХ.}}} = K_u \cdot K_i$.

Усилительный каскад имеет коэффициент усиления по напряжению K_u , равный нескольким десяткам.

Для получения больших значений K_u , достигающих многих тысяч и более, используют *многоступенчатые усилители*, в которых каждый последующий каскад подсоединен к выходу предыдущего (рис. 8.8).

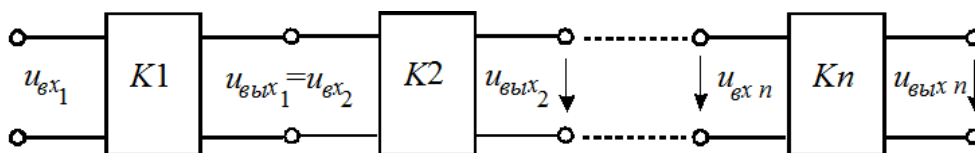


Рис. 8.8. Структурная схема многокаскадного усилителя

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}n}}{U_{\text{ВХ}1}} = K_1 \cdot K_2 \cdot \dots \cdot K_n,$$

где K_1, K_2, \dots, K_n – коэффициенты усиления первого, второго и n -го каскада.

Список использованных источников

1. *Касаткин А.С.* Электротехника: учебное пособие для неэлектротехн. спец. вузов / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. – 4-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 440 с.
2. *Лавров В.М.* Электротехника и электроника: конспект лекций для студентов АСФ / В.М. Лавров. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2004. – 98 с.
3. *Прохоров С.Г.* Электрические машины: учебное пособие / С.Г. Прохоров, Р.А. Хуснутдинов – Ростов н/Д: Феникс, 2012. – 409 с.
4. *Борисов Ю.М.* Электротехника: учебник для вузов / Ю.М. Борисов. – 2-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 335 с.
5. *Блажкин А.Т. и др.* Общая электротехника: учебн. пособ. для неэлектротехн. спец. вузов. / А.Т. Блажкин, В.А. Бесекерский и др. – 4-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 159 с.
6. *Глазенко Т.А.* Электротехника и основы электроники / Т.А. Глазенко. – М.: Высшая школа, 1996. – 356 с.
7. *Основы промышленной электроники* / под ред. В.В. Герасимова. – М.: Высшая школа, 1986. – 572 с.
8. *Бондарь И.М.* Электротехника и электроника: учебное пособие для техникумов / И.М. Бондарь. – М.: ИКЦ «МарТ» Ростов н/Д, 2005. — 336 с.

Учебное издание

Ольга Борисовна **Пушкарева**
Нелли Романовна **Шабалина**
Сергей Михайлович **Шанчуров**

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОНИКА
И ЭЛЕКТРОПРИВОД**

Электронное издание

ISBN 978-5-94984-576-9



9 785949 845769

Редактор Н.В. Рощина

Подписано в печать 13.07.2016

Формат 60×84 1/16

Уч.-изд. л. 4,99

Усл. печ. л. 5,81

Тираж 50 экз.

Заказ №

ФГБОУ ВО «Уральский государственный лесотехнический университет»

620100, Екатеринбург, Сибирский тракт, 37

Тел.: 8(343)262-96-10. Редакционно-издательский отдел

Типография ООО «ИЗДАТЕЛЬСТВО УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЙ ЦЕНТР УПИ»

620062, РФ, Свердловская область, Екатеринбург, ул. Гагарина, 3