МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«ГРОДНЕНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра технического обеспечения
производства и переработки
продукции животноводства

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Курс лекций

*ДЛЯ СТУДЕНТОВ
ИНЖЕНЕРНО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА*

Гродно 2010

УДК: 631. 3
ББК 22.33
Э 45

Авторы: П.Ф. Богданович, Д.А. Григорьев

Рецензенты: доктор технических наук, профессор Т.П.Троцкая
кандидат технических наук, доцент Э.В.Заяц

Электротехника: курс лекций.
Э45 Для студентов инженерно-технологического факультета /
П. Ф. Богданович. – Гродно: ГГАУ, 2010 . -197 с.

Курс лекций предназначен для студентов инженерно-технологического факультета. Излагаются теоретические основы электротехники, методы расчета и анализа линейных цепей постоянного и переменного тока. В ознакомительном плане изложены основные понятия и принципы расчета нелинейных цепей. Приведены основные сведения по электрическим машинам и аппаратам. Показаны возможности использования электротехнологии в процессах пищевых производств.

УДК 631.3
ББК 22.33

Рекомендовано методической комиссией инженерно-технологического факультета (протокол № 10 от 29.06.2010г.).

© П.Ф. Богданович, Д.А. Григорьев, 2010
© УО «ГГАУ», 2010

1. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1.1. Электрическая цепь и электрические величины

Электротехника, это отрасль науки и техники, охватывающая вопросы получения, преобразования и использования электрической энергии в практической деятельности человека. Значение электротехники определяется возможностью получения больших количеств электрической энергии, которую достаточно просто передавать на расстояние и легко преобразовывать в другие виды энергии.

Электрическая цепь – это соединенные определенным образом источники электрической энергии, приемники электрической энергии и вспомогательные элементы – проводники, измерительные приборы, коммутационные аппараты и др., обеспечивающие выполнение определенной функции.

Источники электрической энергии – это устройства, преобразующие какие – либо виды энергии в электрическую энергию. Например: электрический генератор – преобразует механическую энергию в электрическую; гальванический элемент – преобразует химическую энергию; солнечная батарея – используется энергия солнечного излучения и так далее.

Приемники электрической энергии – это устройства, преобразующие электрическую энергию в другие виды (механическую, тепловую, световую, химическую и др.). Например: электрический двигатель, электронагревательный прибор, электрический светильник и др.

Вспомогательные приборы и устройства обеспечивают: соединение элементов цепи (соединительные провода), переключения (рубильники, переключатели), измерение электрических величин и другие функции.

Электрические величины, действующие в цепи, это ток, напряжение и электродвижущая сила.

Электрический ток – это упорядоченное движение электрических зарядов в проводнике или в проводящей среде под действием электрического поля, существующего в данном проводнике или в проводящей среде. Электрический ток характеризуется направлением и величиной – силой тока.

В общем случае электрические заряды могут быть положительными и отрицательными. Принято считать положительным направле-

нием тока направление движения положительных зарядов. Это направление является обратным направлению движения отрицательно заряженных электронов в проводнике.

Сила тока измеряется в *амперах* (А). Физически сила тока I определяется величиной электрического заряда Q ,проходящего через поперечное сечение проводника за одну секунду.

$$I = \frac{Q}{t},$$

где Q - электрический заряд, *кулоны* (Кл); t – время, *секунды* (с).

На схемах электрический ток обозначают стрелкой (см. Рис. 1.1). Направление стрелки указывает положительное направление тока. При этом имеет значение и знак при буквенном обозначении. Если для случая, приведенного на рис. 1.1, будет указано значение тока – I_{12} , значит ток направлен в сторону, противоположную стрелке.

Электрическое напряжение (U) определяют как физическую величину, характеризующую электрическое поле вдоль проводника, численно равную работе, совершаемой этим полем по перемещению единичного заряда в данном проводнике от одной выбранной точки к другой. При этом величина напряжения не зависит от выбора пути между этими точками. Она будет равна разности потенциалов выбранных точек.

Основная единица измерения напряжения – *вольт* (В). На схемах напряжение обозначают аналогично, как и ток (Рис 1.1).

Электродвижущая сила (ЭДС) – это количественная мера сторонних сил источника, вырабатывающего электрическую энергию. Обозначают ЭДС буквой E. Единица измерения ЭДС – *вольт* (В). Численно она равна разности потенциалов на зажимах источника.

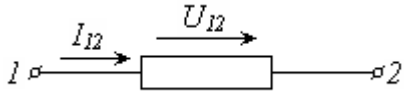


Рис. 1.1. Обозначение тока и напряжения в элементе цепи.

1.2. Схемы электрических цепей

Графическое изображение электрических цепей затруднительно, а зачастую и практически невозможно. В связи с этим реальные электрические цепи изображают в виде электрических схем. Существует несколько видов таких схем: принципиальная; функциональная; структурная; схема замещения.

Принципиальная схема – это схема, в которой электротехнические устройства изображены в виде условных графических обозначений (согласно ГОСТ), как показано на рис.1.2.

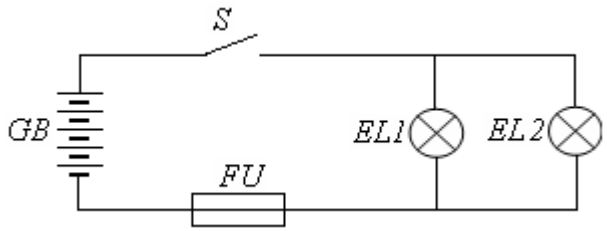


Рис. 1.2. Принципиальная схема переносного светильника:
GB – аккумуляторная батарея; *S* – выключатель;
FU – предохранитель; *EL1, EL2* – лампы накаливания.

Функциональная схема – это схема, которая несет информацию об основных функциональных элементах электрической цепи и связях между ними (Рис. 1.3). Обычно функциональные элементы изображают в виде прямоугольников с соответствующими надписями и обозначениями. Допускается изображать отдельные элементы условными графическими обозначениями, используемыми в принципиальных схемах.

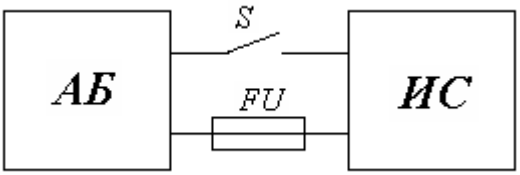


Рис 1.3. Функциональная схема переносного светильника:
АБ – аккумуляторная батарея; *S* – выключатель;
FU – предохранитель; *ИС* – источник света.

Структурная схема определяет основные функциональные части электрической цепи или электротехнического изделия, их назначение и взаимосвязи (Рис 1.4). Такие схемы разрабатывают на начальных стадиях проектирования изделий. В дальнейшем ими пользуются для общего ознакомления с изделием.

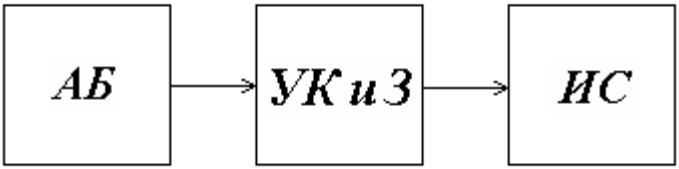


Рис 1.4. Структурная схема переносного светильника:
АБ – аккумуляторная батарея; *УК и З* – устройство коммутации и защиты; *ИС* – источник света.

Описанные выше схемы позволяют, в зависимости от потребностей, достаточно полно моделировать электрическую цепь с точки зрения принципа ее действия, назначения элементов или групп элементов и других свойств. Однако эти схемы неудобны для расчетов. Для этого используют *схему замещения электрической цепи* (ее еще называют *расчетной схемой*, см. Рис 1.5), в которой каждое устройство представляют с помощью *идеализированных элементов.* Таких элементов пять – три пассивных и два активных. О них будет идти речь в п. 1.3.

Расчетная схема характеризуется топологическими (геометрическими) параметрами, такими как: ветвь, узел и контур. Дадим их определение.

Ветвь – это участок схемы, по которому протекает один и тот же ток. В ветви могут содержаться один или большее количество элементов схемы (Рис 1.5).

Узлом называют место соединения трех и более ветвей. Различают зависимые и независимые узлы. *Независимыми* являются узлы, отличающиеся от других узлов хотя бы одной ветвью. В схеме, приведенной на рис. 1.5 имеется два узла, из которых один является независимым, первый или второй, зависит от того, какой будет выбран при расчетах.

Контур - любой замкнутый путь, проходящий по нескольким ветвям (Рис. 1.5). Различают зависимые и независимые контуры.

Независимыми считаются контуры отличающиеся от других контуров хотя бы одной ветвью. В схеме на рис. 1.5 имеется три контура, из которых только два являются независимыми. Контуры в схеме характеризуются направлением обхода, которое выбирается исходя из удобства расчетов или произвольно.

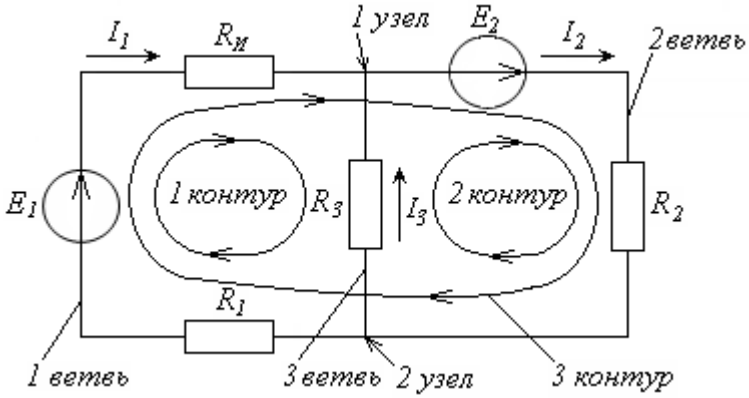


Рис 1.4. Схема замещения (расчетная схема) электрической цепи.

1.3. Элементы схем и их параметры

Пассивные элементы

К пассивным элементам относятся: активное сопротивление, емкость и индуктивность.

Активное сопротивление (*R*) – идеализированный элемент, характеризующий потери энергии. К ним относят элементы, в которых происходят необратимые процессы превращения электрической (электромагнитной) энергии в другие виды энергии, например, в тепловую, механическую, световую и другие виды.

Величина сопротивления *R* является количественной мерой потерь электрической (электромагнитной) энергии. Единицей измерения сопротивления является Ом. На практике также широко используются дольные и кратные единицы сопротивления – от единиц микроом (1 мкОм = 10^{-6} Ом) до единиц гигаом (1 ГОм = 10^{9} Ом) и больше.

Электротехническое устройство, обладающее сопротивлением и по своим свойствам наиболее близкое к активному сопротивлению (идеализированному элементу), называется *резистором.*

В схемах замещения активное сопротивление, как и резистор, изображают в виде прямоугольника с соотношением сторон 10 к 4 (Рис. 1.6). На принципиальных схемах такое условное графическое обозначение соответствует постоянному резистору.

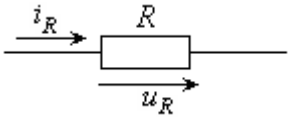


Рис. 1.6. Условное графическое обозначение активного сопротивления.

Величину, обратную активному сопротивлению, называют активной проводимостью и обозначают *Y*. Единицей измерения проводимости является *сименс* (См).

$$Y = R^{-1}, \text{ См или Ом}^{-1}.$$

На схемах проводимость обозначают также как и активное сопротивление.

Для линейных электрических цепей величина активного сопротивления постоянная ($R = const$). *Линейность* активного сопротивления означает, что его величина не зависит от протекающего тока и приложенного напряжения.

Ток и напряжение в *R* связаны линейной зависимостью:

$$u_R = R \cdot i_R . \qquad (1.1)$$

Скорость преобразования электрической энергии в активном сопротивлении характеризуется *активной мощностью p*. В общем случае ее определяют как производную по времени от рассеиваемой в *R* энергии *w*.

$$p = dw / dt . \qquad (1.2)$$

Если напряжение u_R и ток i_R в активном сопротивлении известны, то мощность *p* находят как

$$p = u_R \, i_R. \qquad (1.3)$$

Учитывая, что $u_R = R \cdot i_R$ или $i_R = u_R \cdot R^{-1}$, можно также записать, что

$$p = i_R^2 \cdot R \quad \text{или} \quad p = u_R^2 / R\,. \tag{1.4}$$

Энергия, которая выделилась в активном сопротивлении за время *t*, определяется как

$$W = \int_0^t p\,dt\,. \tag{1.5}$$

Для случая постоянного тока, когда напряжение U_R и ток I_R не изменяются во времени, что характерно для цепей постоянного тока, активная мощность будет постоянной. Ее определяют по формулам

$$P = U_R \cdot I_R\,, \quad P = I_R^2 \cdot R \quad \text{или} \quad P = U_R^2 / R. \tag{1.6}$$

Выделенная в активном сопротивлении *R* за время *t* энергия *W* постоянного тока определяется, с учетом 1.5 и 1.6, как

$$W = P \cdot t\,, \quad W = I_R^2 \cdot R \cdot t \quad \text{или} \quad P = [U_R^2 / R] \cdot t\,. \tag{1.7}$$

Индуктивность (*L*) – под которой понимают идеализированный элемент цепи (Рис 1.7), способный накапливать энергию магнитного поля. Индуктивность *L* , как параметр цепи, измеряется в *генри* (Гн) и служит количественной мерой создаваемого током *i* магнитного поля. (1 Гн = 1 В·с / А). Близким по своим свойствам к индуктивности *L* элементом цепи является катушка индуктивности.

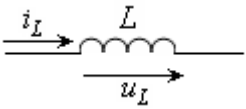


Рис. 1.7. Условное графическое обозначение индуктивности.

Величина индуктивности *L* элемента цепи, например, катушки индуктивности, определяется отношением потокосцепления самоиндукции ψ к току *i* в данном элементе.

$$L = \frac{\psi}{i_L}. \qquad (1.8)$$

Потокосцеплением самоиндукции элемента цепи называют полный магнитный поток, созданный током i_L в данном элементе. Например, если катушка состоит из w витков и все они пронизываются магнитным потоком Φ, созданным током этой катушки, то потокосцепление самоиндукции $\psi = w \cdot \Phi$.

При изменении потокосцепления ψ в катушке согласно закону электромагнитной индукции индуктируется ЭДС самоиндукции e_L. Она определяется как

$$e_L. = -\frac{d\psi}{dt}. \qquad (1.9)$$

С учетом, что $\psi = L\,i$ (см. выражение 1.8), получим

$$e_L. = -L\frac{di}{dt}. \qquad (1.10)$$

Из (1.10) следует, что ЭДС самоиндукции всегда направлена против изменения тока (правило Ленца) и определяется знаком производной тока.

Напряжение на индуктивности

$$u_L = -\ e_L. = L\frac{di}{dt}. \qquad (1.11)$$

Энергия магнитного поля индуктивности при известном токе i_L определяется как

$$W_M = \frac{L\,i_L^2}{2}. \qquad (1.12)$$

Для постоянного тока индуктивность никакого сопротивления не оказывает. В этом случае: напряжение на индуктивности $u_L = 0$, ток в индуктивности $i_L = I_L$, энергия магнитного поля

$$W_M = \frac{L\ I_L^2}{2}. \qquad (1.13)$$

Индуктивность присуща любому реальному элементу электрической цепи, если в нем протекает ток, которому всегда сопутствует магнитное поле.

Емкость (C) – как идеализированный элемент, накапливающий энергию в электрическом поле. Емкость, как и индуктивность, присутствует в любом реальном элементе электрической цепи где имеется напряжение. Наиболее близким по своим свойствам к емкости C элементом цепи является конденсатор (Рис.1.8). Емкость, как параметр цепи, является количественной мерой электрического поля, создаваемого зарядами. Единица измерения емкости – *фарад* (Ф).

1Ф = 1Кл/В или 1Ф = 1А·с/В.

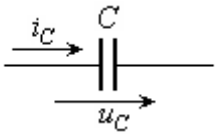


Рис. 1.8. Условное графическое обозначение емкости.

Накопленный в емкостном элементе заряд определяется величиной емкости C и напряжением u_C :

$$q = C\ u_C\,. \qquad (1.14)$$

С учетом формулы (1.14) ток в емкости

$$i_C = C\frac{du_C}{dt}\,. \qquad (1.15)$$

Энергия электрического поля линейной емкости C при напряжении u_C

$$W_Э = \frac{Cu_C^2}{2}. \qquad (1.16)$$

Емкостные элементы, как и индуктивные, в отличие от активного сопротивления энергию цепи не расходуют. Они могут накапливать энергию, забирая ее из цепи, и отдавать обратно в цепь. Их реакция на воздействие в виде тока или напряжения в электрической цепи подобна реакции пружины на механическое воздействие в каком либо механическом устройстве. В этой связи элементы *L* и *C* называют *реактивными элементами*.

Активные элементы

В электротехнике широко используются понятия идеализированных источников электрической энергии – идеального источника ЭДС и идеального источника тока.

Идеальный источник ЭДС (или просто *источник ЭДС*) это такой источник, у которого выходное напряжение не зависит от нагрузки (Рис. 1.9). Внешняя характеристика такого источника $U_И = f(I)$ определяется выражением

$$U_И = E = \text{const}. \qquad (1.17)$$

У источника ЭДС отсутствуют внутренние потери энергии. Внутреннее сопротивление у него отсутствует ($R_И = 0$).

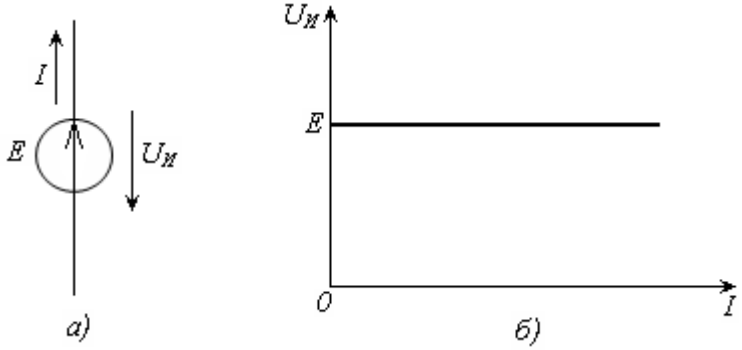


Рис. 1.9. Источник ЭДС: *а)* условное графическое изображение; *б)* внешняя характеристика.

Реальные источники электрической энергии (Рис. 1.10) обладают внутренним сопротивлением $R_И \neq 0$, что является причиной потерь энергии в самом источнике. Внешняя характеристика реального источника имеет наклон (Рис. 1.10, *б*) за счет падения напряжения на сопротивлении $R_И$.

Идеальный источник тока (или просто *источник тока*) – идеализированный источник энергии, ток которого не зависит от напряжения на его зажимах (то есть не зависит от нагрузки). Внешняя характеристика (Рис. 1.11) источника тока описывается выражением:

$$I_И = \text{const}. \qquad (1.18)$$

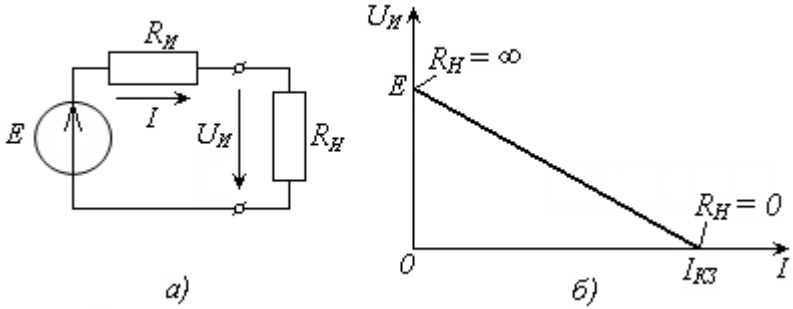


Рис. 1.10. Реальный источник: *а)* схема источника с подключенной нагрузкой; *б)* внешняя характеристика.

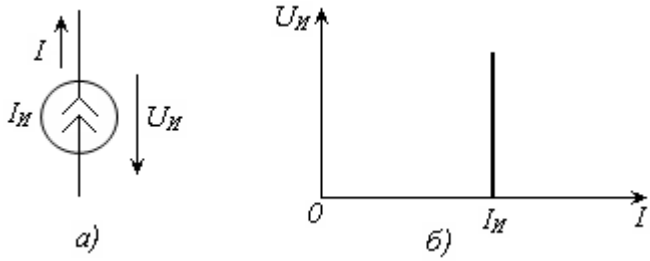


Рис. 1.11. Источник тока:
а) условное графическое изображение; *б)* внешняя характеристика.

Любой реальный источник электрической энергии можно заменить эквивалентной схемой замещения с помощью источника

тока, как показано на рис. 1.12. Значение тока $I_И$ можно определить расчетным путем предположив $R_Н = 0$.

Сравнивая схемы замещения реального источника, приведенные на Рис 1.10, *а)* и на Рис. 1.12, *а)*, можно заметить, что по отношению к нагрузке они равнозначны. Внешние характеристики для обеих схем одинаковы (см. Рис 1.10, *а* и Рис. 1.12,*б*). Для схемы замещения с источником ЭДС при $R_Н = \infty$ (холостой ход) напряжение на зажимах $U_И = U_{XX} = E$.

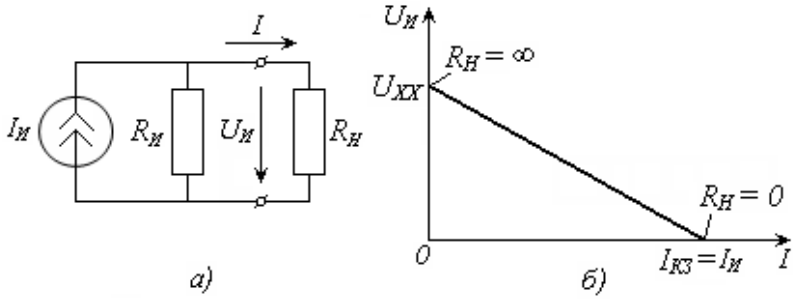


Рис. 1.12. Реальный источник:
а) схема источника с подключенной нагрузкой;
б) внешняя характеристика.

1.4. Основные законы электротехники

Закон Ома

Он устанавливает связь между током и напряжением в элементе цепи и формулируется так: *сила тока I в элементе цепи прямо пропорциональна приложенному напряжению U и обратно пропорциональна сопротивлению R данного элемента*, то есть

$$I = \frac{U}{R}. \qquad (1.18)$$

Для полной цепи закон Ома формулируется так: *сила тока в замкнутой цепи прямо пропорциональна ЭДС, действующей в этой цепи и обратно пропорциональна сопротивлению ее полному сопротивлению.* Математически это можно записать, как

$$I = \frac{E}{R_И + R_Н}, \qquad (1.19)$$

где E – ЭДС источника; $R_И$ - внутреннее сопротивление источника; $R_Н$ - сопротивление нагрузки.

Первый закон Кирхгофа

Он устанавливает баланс токов в узлах разветвленной цепи. Согласно нему: *алгебраическая сумма токов в узле равна нулю.*

$$\sum_{K=1}^{N} I_K = 0, \qquad (1.20)$$

где I_K - ток *к*-ой ветви, сходящейся в данном узле; N - количество ветвей, сходящихся в данном узле.

Второй закон Кирхгофа

Данный закон формулируется для контуров разветвленной цепи (Рис. 1.5). Он гласит: *алгебраическая сумма ЭДС в любом контуре цепи равна алгебраической сумме падений напряжения на элементах этого контура,* то есть

$$\sum_{K=1}^{N} E_K = \sum_{L=1}^{M} U_L . \qquad (1.21)$$

При обходе контура необходимо соблюдать правило: ЭДС и напряжения, совпадающие с направлением обхода, берутся с одинаковыми знаками.

Например, для первого контура цепи, изображенной на рис. 1.5, выражение (1.21) примет вид:

$$E_1 – E_2 = R_И\ I_1 – R_3\ I_3 + R_1\ I_1.$$

Контрольные вопросы

1. Что понимают под схемой электрической цепи?
2. Назовите четыре вида схем электрической цепи.
3. Что такое ветвь, узел, контур? Какие узлы (контуры) являются независимыми?
4. Что такое ток (напряжение, ЭДС) и в каких единицах они измеряются?
5. Что такое электрическая мощность и как она связана с энергией?
6. Назовите и охарактеризуйте три пассивных элемента электрической цепи, используемые в схемах замещения.
7. Дайте определение источника ЭДС и источника тока и поясните, как сих помощью можно представить реальный источник электрической энергии.
8. Почему источник ЭДС и источник тока являются идеализированными источниками?
9. Как формулируется первый закон Кирхгофа?
10. Сформулируйте второй закон Кирхгофа и запишите его в аналитическом виде.

2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

2.1. Методы измерений и погрешности

Измерение любой физической величины осуществляется путем ее сравнения с *мерой* – некоторой физической величиной, принятой за единицу измерения. Объектами электрических измерений являются электрические величины: ток, напряжение, мощность, количество электрической энергии, напряженность электрического или магнитного поля и так далее.

В зависимости от того, каким образом происходит процесс измерения, различают три основных метода – метод непосредственной оценки, косвенный метод и метод сравнения.

Метод непосредственной оценки (прямой метод). При этом методе измеряемую величину отсчитывают непосредственно по

шкале прибора, которая отградуирована в единицах измеряемой величины.

Косвенный метод, когда с помощью прибора измеряют одну или несколько электрических величин, характеризующих рабочий процесс, а величину, которую необходимо узнать получают с помощью дополнительных вычислений на основе измеренных величин.

Метод сравнения, используется главным образом в лабораторных условиях. В этом методе измеряемая величина сравнивается с эталонным образцом или величиной (мерой). Точность измерения здесь выше, чем при методе непосредственной оценки и косвенном методе.

Абсолютно точных измерительных приборов не существует. При измерении всегда имеет место некоторая погрешность. Различают три вида погрешности.

Абсолютная погрешность (ΔA) - это разность между измеренным значением ($A_{ИЗМ}$) измеряемой величины A и её действительным значением.

$$\Delta A = A_{ИЗМ} - A_{Д}\,. \qquad (2.1)$$

Значение ΔA может быть положительным и отрицательным. Поэтому при известном значении абсолютной погрешности ΔA, результат измерения записывают как

$$A = A_{ИЗМ} \pm \Delta A\,. \qquad (2.2)$$

Относительная погрешность - это отношение абсолютной погрешности ΔA к действительному значению измеряемой величины $A_{Д}$, выраженная в процентах.

$$\delta A = \frac{\Delta A}{A_{Д}} \cdot 100\%\,. \qquad (2.3)$$

Относительная погрешность имеет важное значение при оценке точности измерений. Величина $A_{Д}$ может быть получена с помощью эталонного прибора, обеспечивающего очень малую по-

грешность ΔA. В крайнем случае, для простейшей оценки принимается $A_Д \approx A_{ИЗМ}$.

Приведенная погрешность. Она равна отношению абсолютной погрешности к максимальному значению шкалы прибора $A_{МАКС}$ и выражается в процентах.

$$\beta = \frac{\Delta A}{A_{МАКС}} \cdot 100\%. \qquad (2.4)$$

Максимальная приведенная погрешность, выраженная в процентах, определяет *класс точности* данного прибора.

$$\beta_{МАКС} = \frac{\Delta A_{МАКС}}{A_{МАКС}} \cdot 100\%. \qquad (2.5)$$

Все электроизмерительные приборы подразделяются на классы точности: 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4,0. Цифра, характеризующая класс точности прибора, показывает, какую наибольшую погрешность (в процентах) может дать прибор. Наряду с этим, зная класс точности, можно определить и максимальную абсолютную погрешность измерения данным прибором.

Пример. При измерении тока амперметром класса точности 1,5, у которого шкала рассчитана на 10А, получили силу тока в цепи I = 5А. Какое значение может иметь измеренная величина с учётом погрешности измерения?

Решение.

1. Учитывая, что $\beta_{МАКС}$ = 1,5, шкала $A_{МАКС}$ = 10А, можно, согласно (2.5) записать, что:

$$1{,}5 = \frac{\Delta A_{МАКС}}{10} \cdot 100.$$

2. Максимальная абсолютная погрешность

$$\Delta A_{\max} = \frac{1{,}5 \cdot 10}{100} = 0{,}15A.$$

Ответ: I = 5 ± 0,15 А.

2.2. Электроизмерительные приборы

Электроизмерительные приборы классифицируются по различным признакам.

По *роду измеряемой величины* различают: *вольтметры* - для измерения напряжения и электродвижущей силы; *амперметры* - измеряют силу тока; *ваттметры* - для измерения активной мощности; *счётчики электрической энергии* - для измерения количества электрической энергии; *омметры* и *мегомметры* - для измерения электрического сопротивления; *частотомеры* - для измерения частоты переменного тока; *фазометры* - для измерения угла сдвига фаз и др.

По *роду тока* различают приборы: постоянного тока; переменного тока; комбинированные.

По *способу установки* приборы бывают: щитовые, стационарные и переносные.

В зависимости от принципа действия существуют различные системы приборов.

Магнитоэлектрическая система. Её работа основана на взаимодействии между магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом, и подвижной рамкой с током, установленной между полюсами постоянного магнита (Рис.2.1). Ток к обмотке рамки подводится по спиральным пружинкам. Когда по обмотке рамки течет ток, то она поворачивается на угол α, соответствующий измеряемому току (напряжению). Направление поворота рамки, а значит, и стрелки прибора зависит от направления тока в обмотке рамки. Достоинства прибора - точность показаний и линейность шкалы.

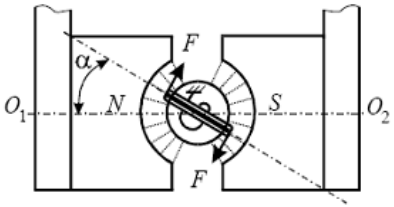


Рис.2.1. Магнитоэлектрическая система.

Электромагнитная система (Рис.2.2)**.** Её работа основана на свойстве катушки *1* с током *I* взаимодействовать с железным сердечником *2*. Вследствие этого (когда по катушке проходит ток) ферромагнитный сердечник втягивается внутрь катушки и стрелка *3* отклоняется на угол, соответствующий значению тока. Противодействие силе втягивания сердечника создается пружиной *4*. При измерении направления тока в катушке одновременно меняется и полярность намагничивающегося сердечника. Поэтому при любом направлении тока в обмотке катушки сердечник втягивается внутрь её, а стрелка отклоняется в одну и ту же сторону. Успокоение колебаний подвижной части обеспечивается демпфирующим устройством *5,6*.

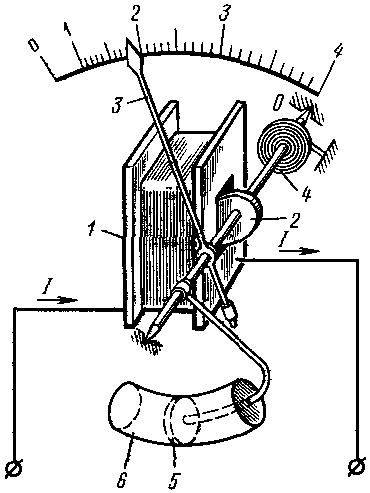


Рис.2.2. Электромагнитная система.

Основные достоинства - простота устройства, невысокая стоимость, пригодность для измерения переменного и постоянного токов, устойчивость к перегрузкам. Недостатки: невысокая точность, нелинейность шкалы.

Электродинамическая система. Принцип действия основан на взаимодействии токов, протекающих по двум катушкам, одна из которых установлена неподвижно, а вторая подвижная и может вращаться вместе с осью и указательной стрелкой (Рис.2.3). По этому принципу действуют ваттметры, вольтметры и амперметры.

Ферродинамическая система. Принцип действия приборов этой системы тот же, что и у приборов электродинамической системы. Отличие состоит в том, что внутрь неподвижной и подвижной катушек введены ферромагнитные сердечники (у подвижной катушки сердечник имеет вид цилиндрика), в результате чего значительно повышается чувствительность прибора. Однако присутствие металла в приборе снижает его класс точности.

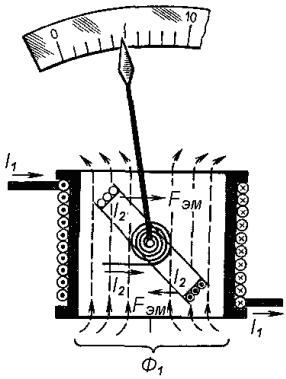


Рис. 2.3. Электродинамичская система.

Индукционная система. Принцип действия основан на взаимодействии переменных магнитных потоков, создаваемых обмотками неподвижной системы приборов, с вихревыми токами, индуктируемыми в лёгком алюминиевом диске, представляющем собой подвижную систему прибора.

Применяют также приборы вибрационной, тепловой, электростатической, электронной и других систем.

В настоящее время всё большее распространение получают *электронные цифровые* измерительные приборы (Рис. 2.4.). В своем составе они имеют аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) измеряемой физической величины и цифровой индикатор. В аналогово-цифровом преобразователе измеряемая величина A_0 преобразуется в цифровой код ($A_Ц$), и в таком виде поступает на обработку в процессор (если требуется) и на цифровой индикатор.

Рис. 2.4. Структурная схема цифрового измерительного прибора.

Достоинством таких приборов является их высокая точность. Они легко вписываются в различные схемы обработки и отображения информации, в том числе и с использованием ЭВМ.

2.3. Электрическое измерение неэлектрических величин

При решении многих практических задач измерения и контроля различных физических величин – температуры, давления, линейных и угловых перемещений, влажности материалов, уровня и др., широко используются электрические методы измерения. Структура процесса измерения в этом случае предусматривает два этапа (Рис. 2.5). Первоначально измеряемая физическая величина X_0 преобразуется в электрическую величину A – напряжение или ток. Такое преобразование осуществляется с помощью устройства - преобразователя измеряемой неэлектрической величины. Закон преобразования описывается статической характеристикой преобразователя

$$A = f(X).$$

После преобразования электрическая величина A, несущая в себе информацию о физической величине X_0, измеряется электроизмерительным прибором. По измеренному значению $A_{ИЗМ}$ электрической величины делается заключение о значении величины X_0.

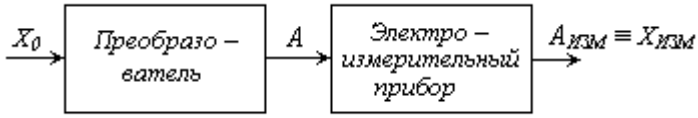


Рис. 2.5.Структурная схема измерения неэлектрической величины.

Преобразователи неэлектрических величин в электрические делятся на два класса – параметрические и генераторные.

В *параметрических преобразователях* изменяющаяся неэлектрическая величина X вызывает изменение одного из электрических параметров – активного сопротивления (проводимости), индуктивности или емкости. В *генераторных преобразователях* неэлектрическая величина преобразуется в ЭДС.

Примерами параметрических преобразователей являются: терморезисторы; термисторы; фоторезисторы; гигристоры и др.

Генераторными преобразователями являются: полупроводниковый фотоэлемент; термопара; тахогенератор и др.

Контрольные вопросы

1. Назвать и пояснить три метода электрических измерений.
2. Для измерения какой электрической величины предназначен амперметр (вольтметр, ваттметр, омметр, счётчик электрической энергии, частотомер, фазометр)?
3. Какие бывают системы приборов?
4. Что такое абсолютная (относительная) погрешность?
5. Приведенная погрешность и класс точности прибора, это одно и тоже или нет?
6. Что выражает класс точности прибора?
7. Как включается в цепь потребителя амперметр (вольтметр, ваттметр, счётчик электрической энергии)?
8. Как определить цену деления шкалы прибора (амперметра, ваттметра, многопредельного вольтметра)?
9. Как выглядит структурная схема цифрового измерительного прибора
10. Как осуществляется процесс измерения неэлектрической величины?

3. МЕТОДЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

3.1. Общие положения

Расчет электрических величин в элементах цепи и анализ процессов в цепях, обычно, сводится к задаче нахождения токов в ветвях или напряжений на элементах. При этом схема цепи задана и параметры ее элементов известны. Задаются также источники энергии – источники ЭДС и источники тока.

Различают простые и разветвленные цепи.

Простыми цепями называются цепи с одним источником электрической энергии, которые можно путем преобразований привести к одноконтурным или к схемам с двумя узлами (см. Рис. 1.10, Рис. 1.12).

Разветвленными цепями называются цепи с несколькими источниками, которые невозможно путем преобразований привести к простым цепям (см.. Рис. 1.4).

Используя законы Ома и Кирхгофа можно достаточно просто выполнять расчеты и анализировать простые цепи. Для расчета сложных (разветвленных) цепей приходится прибегать к дополнительным приемам и методам. Некоторые из них будут рассмотрены далее.

Описываемые ниже методы и приемы расчета применимы для цепей постоянного и переменного тока. Для простоты и большей наглядности изложения сути преобразований, рассмотрение этих методов удобно провести применительно к цепям постоянного тока.

3.2. Метод эквивалентных преобразований

Расчет сложной цепи очень часто упрощается, если в схеме ее замещения провести соответствующие эквивалентные преобразования, приводящие к существенному упрощению конфигурации этой схемы. Рассмотрим наиболее часто встречающиеся, простые соединения элементов цепей: последовательное, параллельное и смешанное.

Последовательное соединение элементов.

Если имеется группа последовательно соединенных элементов $R_1, R_2, \ldots R_n$ (Рис. 3.1, *а*), то ее всегда можно представить в виде одного элемента (Рис. 3.1, *б*), у которого

$$R_Э = R_1 + R_2 + \ldots + R_n.. \qquad (3.1)$$

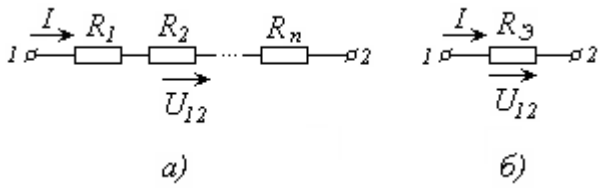


Рис. 3.1. Эквивалентная замена группы последовательно соединенных элементов *а)* одним эквивалентным *б)*.

Условием эквивалентности замены, здесь и в дальнейшем, является то, что такая замена не влияет на ток и напряжение на внешних зажимах данного участка схемы.

Параллельное соединение элементов.

Если имеется группа параллельно соединенных элементов R_1, R_2,...R_n (Рис. 3.2, *а*), то ее всегда можно представить в виде одного элемента (Рис. 3.2, *б*), у которого

$$R_Э = \frac{1}{Y_Э}, \text{ где } Y_Э = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}. \qquad (3.2)$$

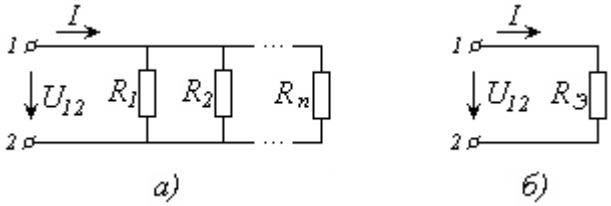


Рис. 3.2. Эквивалентная замена группы параллельно соединенных элементов *а)* одним эквивалентным *б)*.

Для двух параллельно соединенных элементов выражение (3.2) примет вид:

$$R_Э = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \qquad (3.3)$$

Смешанное соединение элементов.

Если в схеме цепи имеется группа элементов, в которой элементы соединены последовательно и параллельно (Рис. 2.3), то ее также можно привести к одному элементу, используя поэтапно преобразования (3.1) и (3.2).

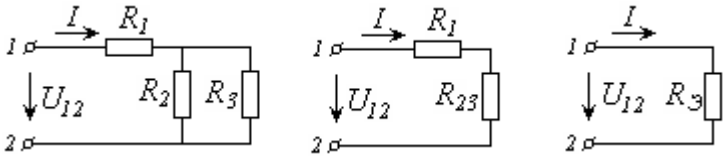


Рис. 3.2. Эквивалентная замена группы элементов при смешанном соединении.

3.3. Метод наложения

Данный метод основан на свойствах линейных цепей, которые подчиняются принципу суперпозиции (наложения решений). Это связано с тем, что для линейной цепи параметры ее элементов не зависят от действующих в них токов и напряжений. Если в линейной цепи действуют несколько ЭДС, то ток в любой ветви данной цепи может быть получен как алгебраическая сумма токов, вызываемых в этой ветви каждой из ЭДС в отдельности.

При определении частичных слагающих токов $I_3^{/}$ и $I_3^{//}$ (Рис 3.3) следует считать включенными внутренние сопротивления тех источников, ЭДС которых исключаются. Если в схеме остается один источник (Рис 3.3, *б, с*), к ней применимы преобразования, изложенные в п.3.2. Искомый ток в результате определяется как сумма частных токов.

$$I_3 = I_3^{/} + I_3^{//}.$$

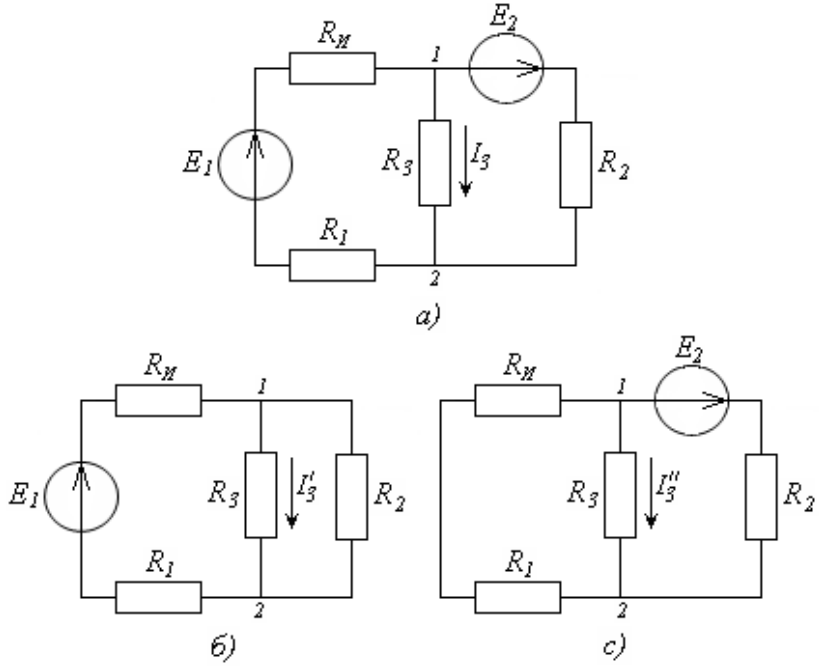


Рис. 3.3. Метод наложения.

3.4. Метод уравнений Кирхгофа

Искомые электрические величины в элементах цепи могут быть найдены путем совместного решения системы уравнений, составленных по законам Кирхгофа. При этом по первому закону Кирхгофа составляются уравнения для *независимых узлов*, по второму закону - для *независимых контуров* этой цепи. Полученная система будет содержать столько уравнений, сколько ветвей с искомыми токами содержится в расчетной схеме цепи. Решается она любым известным способом.

Пример. В качестве примера рассмотрим цепь, схема которой приведена на рис. 3.4. Она имеет два независимых контура и один независимый узел, например – первый контур.

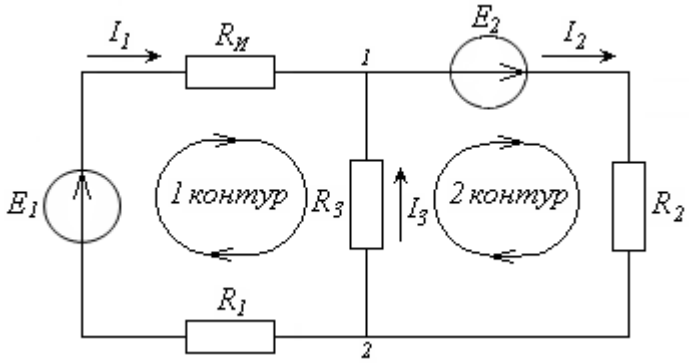


Рис. 3.4. Расчетная схема.

Система расчетных уравнений будет иметь вид:

$$
\begin{aligned}
&I_1 + I_2 + I_3 = 0;\\
&R_{И} I_1 - R_3 I_3 + R_1 I_1 + = E_1;\\
&R_2 I_2 + R_3 I_3 = E_2 .
\end{aligned}
\qquad (2.4)
$$

Система (3.4) состоит из трех уравнений, что соответствует числу неизвестных токов.

3.5 Метод контурных токов

Этот метод является одним из основных методов расчета сложных электрических цепей. Суть данного метода состоит в том, что вместо токов в ветвях на основании второго закона Кирхгофа определяют *контурные токи*, якобы циркулирующие в независимых контурах. Количество уравнений, составленных для контурных токов, равно числу независимых контуров.

В качестве примера рассмотрим уже знакомую двухконтурную схему (Рис. 3.5). Направление обхода контуров и направления контурных токов I_{11} и I_{22} можно выбрать произвольно. Однако удобнее эти направления принять одинаковыми – например по часовой стрелке, как показано на рисунке 3.5. Система уравнений, составленных согласно второму закону Кирхгофа для первого и второго контуров, будет иметь вид:

$$R_{11} I_{11} + R_{12} I_{22} = E_{11};$$
$$R_{21} I_{11} + R_{22} I_{22} = E_{22}. \qquad (3.5)$$

В системе (3.5) $R_{11} = R_{И} + R_3 + R_1$ – контурное сопротивление первого контура; $R_{22} = R_2 + R_3$ – контурное сопротивление второго контура; $R_{12} = R_{21}$ – взаимное сопротивление первого и второго контуров; E_{11} ,E_{22} – контурные ЭДС первого и второго контуров. Определимся с этими понятиями.

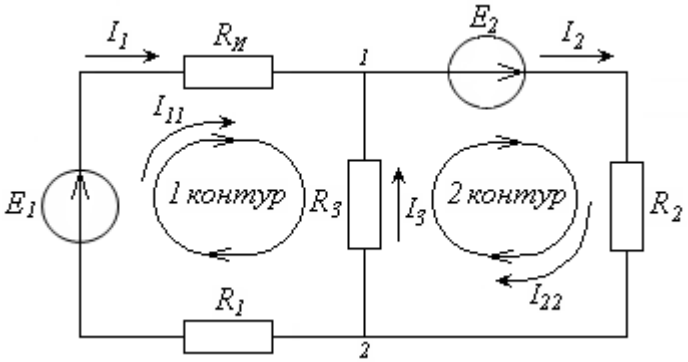


Рис. 3.5. Расчетная схема для метода контурных токов.

Контурное сопротивление – это сопротивление, получаемое путем суммирования всех сопротивлений данного контура.

Взаимное сопротивление двух контуров - это сопротивление ветви, общей для данной пары контуров. Оно в системе уравнений используется дважды, так как через него протекают два контурных тока, циркулирующих в общей для них ветви. Для обозначения взаимного сопротивления используются номера граничащих контуров. При этом $R_{12} = R_{21} = -R_3$ для схемы, приведенной на рис. 3.5. Для схем с большим числом независимых контуров будет $R_{13} = R_{31}$, $R_{23} = R_{32}$ и так далее. Взаимное сопротивление будет иметь знак «–» если направления протекающих через него контурных токов соседних контуров противоположны (как в рассмотренном примере). Если контурные токи во взаимной ветви имеют одинаковое направление, то ее сопротивление следует брать со знаком «+».

Контурные ЭДС определяются как алгебраическая сумма всех ЭДС, действующих в данном контуре.

После решения системы уравнений, используя найденные контурные токи, на основании первого закона Кирхгофа определяют токи в ветвях.

Для примера (Рис. 3.5): $I_1 = I_{11}$; $I_2 = I_{22}$; $I_3 = I_{22} - I_{11}$.

На первый взгляд данный метод кажется сложным и неудобным в использовании. Однако при анализе сложных многоконтурных схем он чрезвычайно продуктивен, так как позволяет существенно уменьшить количество расчетных уравнений.

3.6. Метод эквивалентного источника

Метод эквивалентного источника удобно использовать в случае, когда требуется определить ток только в одной ветви, например содержащей нагрузку. Этот метод также называют *методом активного двухполюсника*.

Примечание: *Двухполюсник* – это устройство или часть схемы цепи, имеющая только два выводы (полюсы), соединяющие ее с внешней цепью.

Этапы преобразований схемы цепи по методу эквивалентного источника показаны на рисунке 3.6.

Первоначально (Рис. 3.6, *а*) выделяют часть схемы относительно ветви с искомым током (это может быть ветвь нагрузки – в примере $R_H = R_3$) и определяют выводы будущего активного двух-

полюсника (зажимы *1,2*). Затем исключают ветвь с искомым током (ток I_3 на рис. 3.6, *б*) и любым методом определяют напряжение между выводами будущего двухполюсника (напряжение U_{12} на рисунке 3.6, *б*). Полученное напряжение будет равно напряжению холостого хода (U_{XX}) активного двухполюсника. В нашем примере $U_{XX} = U_{12}$.

На следующем этапе (Рис. 3.6, *в*) исключают из схемы все источники ЭДС и источники тока. При этом, вместо источника ЭДС оставляют перемычку, вместо источника тока остается разрыв. Имеющиеся в схеме внутренние сопротивления и проводимости источников остаются. После этого, используя соответствующие преобразования, со стороны выводов будущего двухполюсника определяют его эквивалентное (входное) сопротивление $R_Э$ (Рис. 3.6, *в, г*).

На заключительном этапе от исходной расчетной схемы цепи переходят к эквивалентной (Рис. 3.6, *д*). Ее представляют в виде эквивалентного источника с ЭДС $E_Э = U_{XX}$ и внутренним сопротивлением $R_Э$. После этого определяют искомый ток.

Важным обстоятельством здесь является независимость параметров эквивалентного источника от нагружающей ветви. Полученные величины $E_Э$ и $R_Э$ при изменении величины нагрузки (в примере $R_H = R_3$) изменяться не будут.

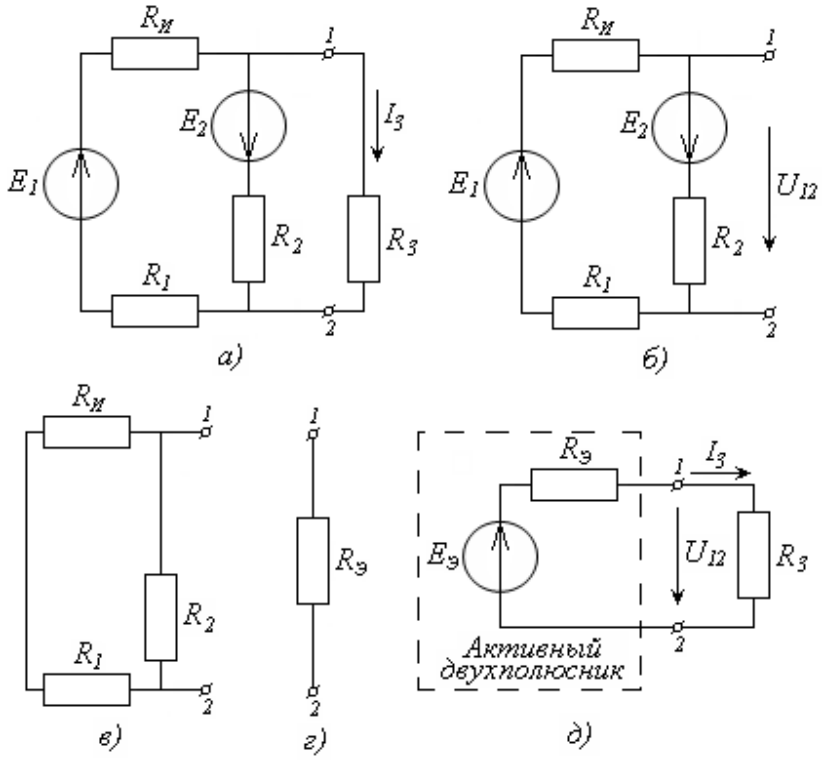


Рис. 3.6. Этапы преобразований схемы цепи по методу эквивалентного источника.

Контрольные вопросы

1. Назовите известные Вам методы расчета и анализа линейных цепей.
2. Какие цепи относятся к простым и какие к разветвленным?
3. Как вычислить общее сопротивление двух параллельно соединенных резисторов?
4. Поясните суть метода наложения.
5. Сколько уравнений необходимо составить для определения токов в ветвях схемы цепи по методу уравнений Кирхгофа?

6. Что понимают под контурным сопротивлением в методе контурных токов?
7. Как определяют величину и знак взаимных сопротивлений в методе контурных токов?
8. Какой порядок расчета тока в одной ветви по методу эквивалентного источника?
9. Как находят величину эквивалентной ЭДС и эквивалентного внутреннего сопротивления эквивалентного источника?
10. Чем может отличаться активный двухполюсник от пассивного?

4. СИНУСОИДАЛЬНЫЙ ТОК И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

Электрический ток, изменяющийся с течением времени, называют *переменным током*. Аналитически переменный ток может быть описан некоторой функцией времени $i(t)$, под которой подразумевается его значение в момент времени t, то есть его мгновенное значение. Аналогичным образом определяются переменные напряжение $u(t)$ и переменная ЭДС $e(t)$. Мгновенные значения переменных электрических величин записывают проще, как i, u, e и так далее, подразумевая их зависимость от времени.

В промышленности и в быту получил распространение переменный ток, который математически описывается синусоидальными или косинусоидальными функциями времени. Такой ток имеет существенные преимущества перед постоянным током. Электродвигатели для такого тока конструктивно проще. Его легче генерировать, просто, с помощью трансформаторов можно изменять величину напряжения и другие преимущества.

4.1. Способы представления синусоидальных электрических величин

Рассмотрим несколько способов описания синусоидальных электрических величин.

Представление в виде тригонометрических функций.

В качестве примера возьмем ток. Его мгновенное значение

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \qquad (4.1)$$

где I_m – амплитуда тока; ω – угловая частота; ψ_i - начальная фаза тока. Угловая частота $\omega = 2\pi f$, где f – циклическая частота, связанная с периодом синусоидального тока, как $f = 1/T$. Выражение в скобках, стоящее под знаком синуса в формуле (4.1) – полная фаза колебания $\Psi_i = \omega t + \psi_i$, измеряемая в радианах. Для промышленного тока частота $f = 50$ Гц, период $T = 0{,}02$ с, угловая частота $\omega = 314$ рад/с.

Величину синусоидального тока оценивают амплитудой, действующим значением и средним значением.

Амплитуда(I_m) – это наибольшее значение, положительное или отрицательное, которое ток принимает в течение периода.

Действующее значение синусоидального тока (I) отождествляют по величине с таким постоянным током, который в активном сопротивлении R за период T обеспечивает выделение такого же количества тепловой энергии, что и данный синусоидальный ток, то есть

$$R I^2 T = \int_0^T R i^2 dt, \text{ или } I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}\,.$$

Использовав для выражение (3.1) получим:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0{,}707 I_m\,. \qquad (4.2)$$

Среднее значение синусоидального тока

$$I_{CP} = \frac{1}{0{,}5T}\int_0^{0{,}5T} i\,dt = \frac{2 I_m}{\pi} \approx 0{,}637\, I_m\,. \qquad (4.3)$$

Для синусоидальных напряжения и ЭДС их действующие и средние значения определяются аналогичным образом:

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}},\ U_{CP} = \frac{2U_m}{\pi};\quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}},\ \ E_{CP} = \frac{2E_m}{\pi}.$$

Графическое представление синусоидальных электрических величин.

Любую синусоидальную величину можно отобразить в виде вращающегося вектора или в виде волновой диаграммы, представляющей собой зависимость этой величины от времени. Оба эти способа равнозначны по информативности, так как несут информацию обо всех параметрах синусоидальной величины. Пример использования векторных и волновых диаграмм для представления синусоидального тока и синусоидального напряжения в некотором элементе цепи приведен на рис. 4.1.

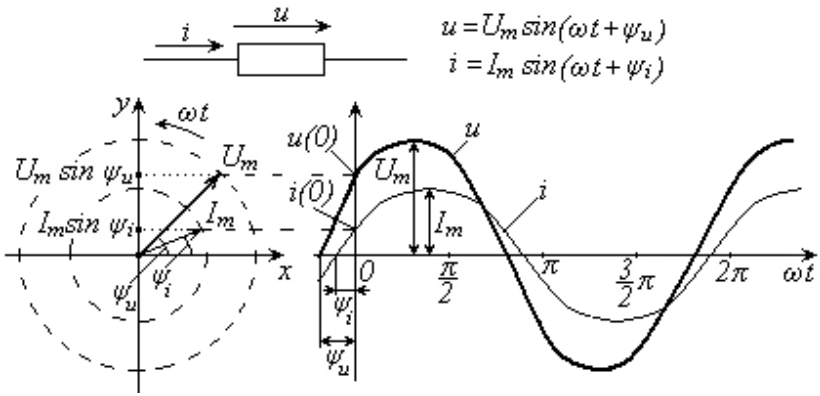


Рис. 4.1. Векторная и волновая диаграммы для тока и напряжения в элементе цепи.

На векторной диаграмме вращающиеся векторы обычно изображаются в момент начала отсчета времени, когда $t = 0$. Длина векторов принимается равной амплитуде отображаемой величины – тока, напряжения, ЭДС и так далее. Центр вращения векторов совмещается с центром используемой системы координат (на рис. 4.1 – прямоугольная система координат). За положительное направление вращения векторов принимается направление, противоположное вращению часовой стрелки.

Мгновенное значение синусоидальной величины для любого момента времени может быть определено как проекция ее вектора на вертикальную ось *Oy* (см. рисунок 4.1). Начальная фаза будет определять угловое положение вектора относительно оси *Ox*. Полная фаза синусоидальной величины будет увеличиваться с течением времени *t* как $\Psi(t) = \omega t + \psi$.

На волновой диаграмме все параметры синусоидальной величины также однозначно отображаются.

4.2. Комплексный метод представления электрических величин

От представления синусоидальных электрических величин в виде вращающихся векторов легко перейти к представлению этих величин в виде комплексных векторов на комплексной плоскости (Рис. 4.2), вращающихся с частотой ω.

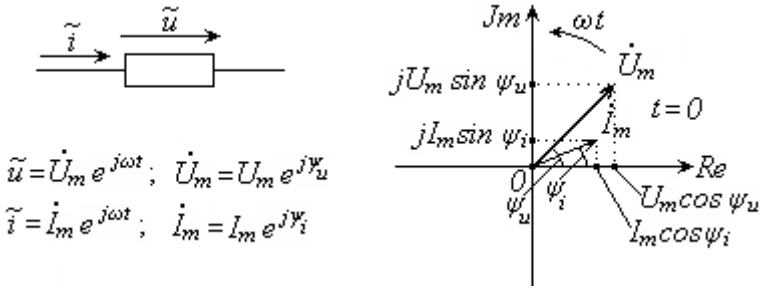


Рис. 4.2. Комплексная диаграмма для тока и напряжения в элементе цепи.

В математике используются три формы записи комплексных величин: показательная, тригонометрическая и алгебраическая. Применительно, например, к мгновенному значению синусоидального тока его можно записать:

в показательной форме

$$\tilde{i} = \dot{I}_m e^{j\omega t}; \tag{4.4}$$

в тригонометрической форме

$$\tilde{i} = I_m \cos(\omega t + \psi_i) + j\, I_m \sin(\omega t + \psi_i); \qquad (4.5)$$

в алгебраической форме

$$\tilde{i} = Re\{\tilde{i}\} + jJm\{\tilde{i}\}. \qquad (4.6)$$

В выражении (4.4) символ $\tilde{i}$ означает мгновенное значение синусоидального тока в комплексной форме (мгновенный комплекс тока). Волнистая линия сверху отличает его от обычного мгновенного значения. Символ $\dot{I}_m$ означает *комплексную амплитуду* тока. Причем

$$\dot{I}_m = I_m e^{j\psi_i}, \qquad (4.7)$$

где I_m – амплитуда тока; ψ_i – начальная фаза тока; $j = \sqrt{-1}$ - мнимая единица. Содержащийся в (4.4) сомножитель $e^{j\omega t}$ несет информацию о круговой частоте и зависит от времени. Его называют *оператором вращения*.

Тригонометрическая форма (4.5) содержит две проекции вращающегося вектора тока – косинусную (действительную) и синусную (мнимую), которые отображены на комплексной диаграмме (Рис. 4.2).

Символы *Re* и *Jm* в (4.6) означают, соответственно, вещественную и мнимую части комплексной величины. Для действующего значения синусоидального тока также можно записать

$$\dot{I} = \frac{\dot{I}_m}{\sqrt{2}} = I e^{j\psi_i}. \qquad (4.8)$$

Величину $\dot{I}$ называют просто - *комплексом тока*.

Аналогичным образом представляют в комплексной форме и другие синусоидальные электрические величины – напряжение, ЭДС, мгновенную мощность и так далее.

4.3. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме

Основные законы электротехники в комплексной форме для цепей синусоидального тока формулируются аналогично, как и для цепей постоянного тока (см. п. 1.4), с тем отличием, что электрические величины представляются в комплексном виде. Наиболее удобно, при этом, пользоваться действующими значениями этих величин.

Закон Ома

Комплекс тока $\dot{I}$ *в элементе цепи прямо пропорционален комплексу напряжения* $\dot{U}$ *и обратно пропорционален комплексному сопротивлению* $\dot{Z}$ *данного элемента*, то есть

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}. \qquad (4.9)$$

В выражении (4.9) $\dot{Z} = Z\,e^{j\varphi}$ - комплексное сопротивление элемента или участка цепи. Его аргумент $\varphi = \psi_u - \psi_i$, так как из (4.9) следует, что

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U\,e^{j\psi_u}}{I\,e^{j\psi_i}} = \frac{U}{I}e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z\,e^{j\varphi}. \qquad (4.10)$$

Для мгновенных значений тока и напряжения в комплексной форме также можно записать, что

$$\tilde{i} = \frac{\tilde{u}}{\dot{Z}} \quad \text{или} \quad \tilde{u} = \dot{Z}\,\tilde{i}. \qquad (4.11)$$

Для активного сопротивления $\varphi = 0$. Поэтому $\dot{Z}_R = R$.

Для индуктивности, если $\tilde{i} = \dot{I}_m e^{j\omega t}$, то напряжение

$$\tilde{u}_L = L\frac{d\tilde{i}_L}{dt} = L\frac{d}{dt}\dot{I}_m e^{j\omega t} = j\omega L\,\dot{I}_m e^{j\omega t} = \dot{Z}_L\,\tilde{i}_L.$$

Следовательно, *комплексное сопротивление индуктивности*

$$\dot{Z}_L = j\omega L = \omega L e^{j\frac{\pi}{2}}. \qquad (4.12)$$

В (4.12) учтено, что $e^{j\frac{\pi}{2}} = j$. Для индуктивности $\varphi_L = \pi / 2$.

Для емкости, если $\tilde{i} = \dot{I}_m e^{j\omega t}$, то напряжение

$$\tilde{u}_C = \frac{1}{C}\int_0^t \tilde{i}_C\, dt = \frac{1}{C}\int_0^t \dot{I}_m e^{j\omega t} dt = \frac{1}{j\omega C}\dot{I}_m e^{j\omega t} = \dot{Z}_C \tilde{i}_C .$$

Комплексное сопротивление емкости

$$\dot{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{\omega C} e^{j\frac{\pi}{2}}. \qquad (4.13)$$

В (4.13) учтено, что $1 / j = - j = e^{-j\frac{\pi}{2}}$. Для емкости $\varphi_C = - \pi / 2$.

Первый закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма комплексов токов в узле равна нулю.

$$\sum_{K=1}^{N} \dot{I}_K = 0, \qquad (4.14)$$

где: $\dot{I}_K$ - комплекс тока $к$ - ой ветви, сходящейся в данном узле; N - количество ветвей, сходящихся в данном узле.

Второй закон Кирхгофа

Алгебраическая сумма комплексов ЭДС в любом контуре цепи равна алгебраической сумме комплексов напряжений на элементах этого контура, то есть

$$\sum_{K=1}^{N} \dot{E}_K = \sum_{L=1}^{M} \dot{U}_L . \qquad (4.15)$$

Использование представления синусоидальных величин в виде комплексных функций времени (векторов на комплексной плоскости) позволяет существенно упростить действия с этими величинами. При действиях с комплексными величинами следует знать некоторые их свойства:

-модуль дробного комплексного числа равен отношению модуля числителя к модулю знаменателя;

-модуль произведения равен произведению модулей;

-аргумент (показатель степени) дробного комплексного числа равен разности аргументов числителя и знаменателя;

-аргумент произведения двух комплексных чисел равен сумме аргументов;

-дифференцированию синусоидальной функции времени соответствует ее умножение на $j\omega$;

-интегрированию синусоидальной функции времени соответствует ее деление на $j\omega$.

Контрольные вопросы

1. Какой ток называют переменным?
2. Назовите четыре способа представления синусоидальных электрических величин.
3. Какие параметры синусоидального тока (напряжения, ЭДС) отражаются на векторной диаграмме?
4. Как можно на волновой диаграмме определить сдвиг фаз меду напряжением и током?
5. Что такое амплитуда тока и как она связана с его действующим значением?
6. Как строится комплексная диаграмма тока (напряжения, ЭДС)?
7. Запишите выражение для синусоидального напряжения в показательной, в тригонометрической и в алгебраи-ческой формах.
8. Что такое мгновенный комплекс тока?
9. Сформулируйте законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме.
10. Запишите выражения для комплексных сопротивлений активного сопротивления, индуктивности и емкости.

5. АНАЛИЗ ПРОСТЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

5.1. Неразветвленные цепи синусоидального тока

В линейных цепях при действии источника синусоидальной ЭДС напряжения и токи в ее элементах также будут синусоидальными. Поэтому для анализа цепей переменного тока удобно пользоваться комплексным методом.

Рассмотрим два варианта цепи - с последовательным и с параллельным соединением элементов *R, L* и *C.*

Цепь с последовательным соединением элементов R, L и C

Схема цепи приведена на рисунке 5.1. Элементы цепи *R, L* и *C* заданы. Задана также ЭДС $\tilde{e} = \dot{E}_m e^{j\omega t}$. Требуется определить ток и напряжения на элементах цепи, полное сопротивление цепи и построить комплексную диаграмму для тока и напряжений.

Решать поставленную задачу удобнее всего для действующих значений (комплексов) тока и напряжений. Поэтому обозначим электрические величины в схеме цепи как показано на рис. 5.1.

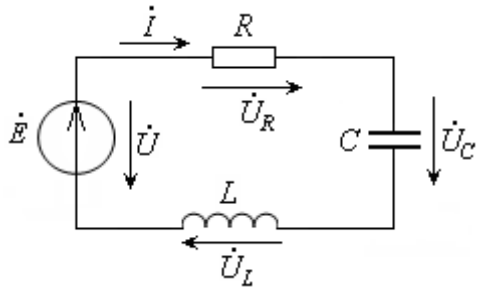


Рис. 5.1. Цепь с последовательным соединением элементов *R , L* и *C.*

Согласно второму закону Кирхгофа (4.15)

$$R\dot{I} + \frac{1}{j\omega C}\dot{I} + j\omega L\dot{I} = [R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})]\dot{I} = \dot{E}\,.$$

Комплекс тока в цепи

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{R + j(\omega L - 1/\omega C)} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}. \qquad (5.1)$$

В (5.1) $\dot{U} = U e^{j\psi_u} = \dot{E} = E e^{j\psi_e}$ - общее напряжение на входе цепи.

Общее (полное) сопротивление цепи

$$\dot{Z} = R + j(\omega L - 1/\omega C) = R + j(X_L - X_C) = R + jX. \qquad (5.2)$$

В показательной форме общее сопротивление цепи

$$\dot{Z} = Z e^{j\varphi}, \ \varphi = arctg \frac{X}{R}. \qquad (5.3)$$

Комплекс тока в цепи

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{\dot{Z}} = \frac{E}{Z} e^{j(\psi_e - \varphi)} = \frac{U}{Z} e^{j(\psi_u - \varphi)} = I e^{j\psi_i}. \qquad (5.4)$$

Мгновенный комплекс тока

$$\tilde{i} = \frac{E_m}{Z} e^{j(\psi_e - \varphi)} = \frac{U_m}{Z} e^{j(\psi_u - \varphi)} = I_m e^{j\psi_i}. \qquad (5.5)$$

Мгновенное значение тока

$$i = J_m\{\dot{I}_m e^{j\omega t}\} = I_m \sin(\omega t + \psi_i). \qquad (5.6)$$

Согласно закону Ома (4.9) комплексы напряжений на элементах цепи будут равны:

$$\dot{U}_R = R\dot{I} = R I e^{j\psi_i} = U_R e^{j\psi_i};$$

$$\dot{U}_C = -j\frac{1}{\omega C}\dot{I} = \frac{1}{\omega C} I e^{j(\psi_i - \frac{\pi}{2})} = U_C e^{j(\psi_i - \frac{\pi}{2})}; \qquad (5.7)$$

$$\dot{U}_L = j\omega L\dot{I} = \omega L I e^{j(\psi_i + \frac{\pi}{2})} = U_L e^{j(\psi_i + \frac{\pi}{2})}.$$

Выражения 5.4 и 5.7 позволяют построить для цепи комплексную диаграмму для комплексов тока и напряжений в элементах R , L и C. При X_L большем, чем X_C она будет иметь вид, как показано на рис. 5.2.

При $X_L > X_C$ сдвиг фаз между напряжением и током $\varphi > 0$ (напряжение опережает ток), что свидетельствует об активно – индуктивном характере цепи.

Если $X_L < X_C$, U_C будет больше U_L и угол $\varphi < 0$, что будет говорить об активно – емкостном характере цепи.

Когда $X_L = X_C$, то $\varphi = 0$. Ток и напряжение в цепи совпадают по фазе. Полное сопротивление цепи в этом случае

$$\dot{Z} = R + j(X_L - X_C) = R, \qquad (5.8)$$

то есть будет активным по характеру и минимальным по величине. В цепи будет иметь место *резонанс напряжений*. Признак резонанса: $\varphi = \psi_u - \psi_i = 0$. Условие резонанса: $X = X_L - X_C = 0$.

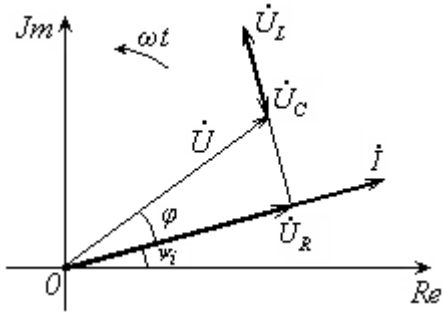


Рис. 5.2. Комплексная диаграмма тока и напряжений в элементах R , L и C при их последовательном соединении.

Однако резонанс напряжений будет иметь место только в случае, когда частота приложенного к цепи напряжения будет совпадать с *частотой собственных колебаний цепи* или *резонансной частотой*, определяемой из соотношения

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \qquad (5.9)$$

В этом случае ток $\dot{I}$ в цепи будет максимальным. Напряжения $\dot{U}_C$ и $\dot{U}_L$ будут равны по величине (по модулю) и противоположны по фазе.

На основании комплексной диаграммы (Рис. 5.1) можно построить треугольник сопротивлений анализируемой цепи. Ему будет соответствовать выражение (5.2) для полного комплексного сопротивления цепи.

Треугольник сопротивлений обычно строят на комплексной плоскости (Рис. 5.3). По вещественной оси откладывают активное сопротивление, по мнимой оси – реактивное сопротивление. Полное сопротивление получают, суммируя векторы активного и реактивного сопротивлений.

На рис. 5.3 *а)* и *б)* показаны также схемы замещения цепи с последовательным соединением элементов R , L и C для случаев, соответственно, активно – индуктивного и активно – емкостного характера цепи.

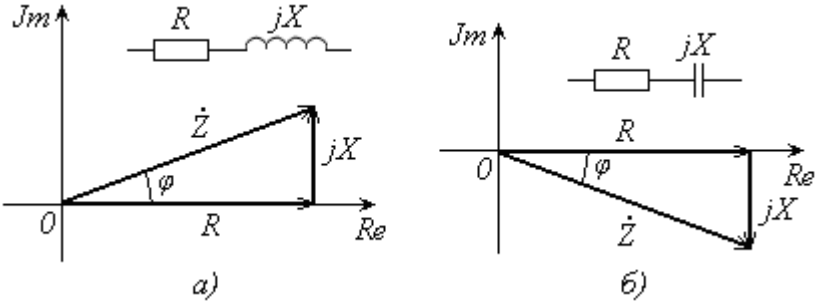


Рис. 5.3.Треугольники сопротивлений для цепи с последовательным соединением элементов R , L и C.

Треугольник сопротивлений можно также построить и в прямоугольной системе координат. В этом случае сопротивления необходимо изображать в виде отрезков: активное – на оси абсцисс; реактивное, с соответствующим знаком, вдоль оси ординат как катет прямоугольного треугольника; полное сопротивление – в виде гипотенузы данного треугольника.

Цепь с параллельным соединением элементов R, L и C

Схема цепи приведена на рис. 5.4. . Элементы цепи *R, L* и *C* заданы. Задана также ЭДС $\tilde{e} = \dot{E}_m e^{j\omega t}$. Требуется определить напряжение на входе цепи и токи в элементах цепи, полное сопротивление цепи и построить комплексную диаграмму для напряжения и токов.

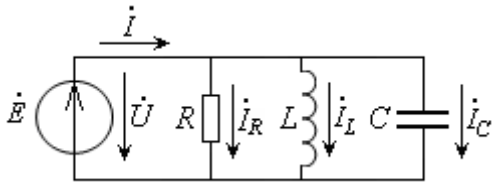


Рис. 5.4. Схема цепи с параллельным соединением элементов *R, L* и *C.*

Если ЭДС задана, то напряжение на входе цепи $\dot{U} = \dot{E} = E\,e^{j\psi_e} = U e^{j\psi_u}$.

Токи в элементах цепи определим по закону Ома:

$$\dot{I}_R = \frac{\dot{U}}{R}; \quad \dot{I}_L = \frac{\dot{U}}{j\omega L}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}}{1/\,j\omega C} = \dot{U}\ j\omega C. \qquad (5.10)$$

Согласно первому закону Кирхгофа общий ток

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L + \dot{I}_C.$$

Используя значения токов из (4.10), получим:

$$\dot{I} = \dot{U}\left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C\right) = \dot{U}\,[G - j(B_L - B_C)] = \dot{U}\,\dot{Y}, \qquad (5.11)$$

где: $\dot{Y} = 1/\dot{Z}$ - комплексная проводимость цепи; G – активная проводимость; $B_L = 1/\omega L$ – индуктивная проводимость; $B_C = \omega C$ – емкостная проводимость. Полная комплексная проводимость цепи

$$\dot{Y} = G - j(B_L - B_C) = G - jB = Y\,e^{-j\varphi}. \qquad (5.12)$$

В формуле (5.12) $B = B_L - B_C$ - реактивная проводимость цепи.

Согласно выражениям (5.11) и (5.12) ток в общей ветви

$$\dot{I} = U e^{j\psi_u} Y e^{-j\varphi} = I e^{j(\psi_u - \varphi)}. \qquad (5.13)$$

Токи в элементах цепи, записанные в показательной форме, будут иметь вид:

$$\dot{I}_R = \dot{U}G = UGe^{j\psi_u} = I_R e^{j\psi_u};$$

$$\dot{I}_L = \dot{U}(-jB_L) = UBe^{j(\psi_u - \frac{\pi}{2})} = I_L e^{j(\psi_u - \frac{\pi}{2})}; \qquad (5.14)$$

$$\dot{I}_C = \dot{U}\,jB_C = UBe^{j(\psi_u + \frac{\pi}{2})} = I_C\,e^{j(\psi_u + \frac{\pi}{2})}.$$

Выражения 5.11 и 5.14 позволяют построить для цепи комплексную диаграмму для комплексов напряжения и токов в элементах R , L и C. При емкостной проводимости B_C большей чем индуктивная проводимость B_L диаграмма будет иметь вид, как показано на рис. 5.5.

На основании комплексной диаграммы можно построить треугольник проводимостей анализируемой цепи. Ему будет соответствовать выражение (5.12) для полной комплексной проводимости этой цепи.

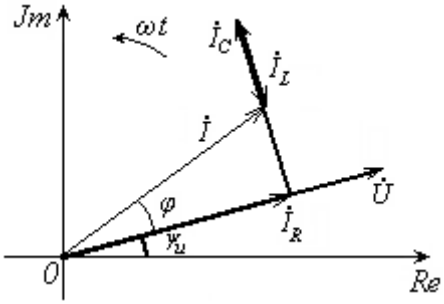


Рис. 5.5. Комплексная диаграмма напряжения и токов в цепи при параллельном соединении элементов *R* , *L* и *C*.

На рис.5.6 *а)* и *б)* приведены треугольники проводимостей и схемы замещения цепи с параллельным соединением элементов *R* , *L* и *C* для случаев, соответственно, активно – емкостного и активно – индуктивного характера полной проводимости этой цепи.

Если $B_C > B_L$ (Рис.5.6, *а*), то ток $\dot{I}_C > \dot{I}_L$, и суммарный реактивный ток $\dot{I}_B = \dot{I}_C - \dot{I}_L$ будет опережать напряжение на угол $\pi / 2$. Разность фаз $\varphi = \psi_u - \psi_i < 0$.

При $B_C < B_L$ (Рис.5.6, *б*), ток в емкости $\dot{I}_C$ будет меньше тока индуктивности $\dot{I}_L$. Суммарный реактивный ток $\dot{I}_B = \dot{I}_L - \dot{I}_C$ будет отставать от напряжения на угол $\pi / 2$. Разность фаз φ будет положительной.

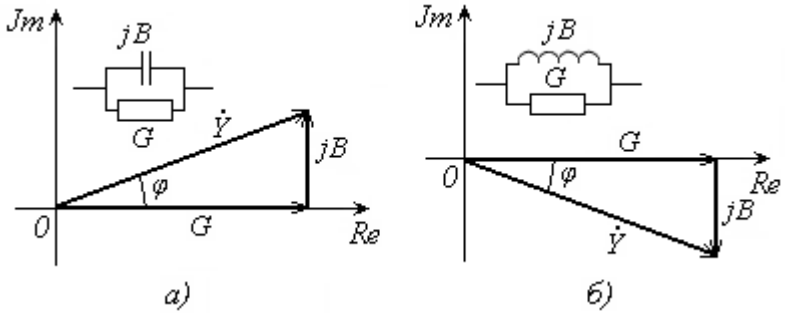


Рис.5.6. Треугольники проводимостей и схемы замещения цепи с параллельным соединением элементов *R* , *L* и *C*.

Когда $B_C = B_L$, ток $\dot{I}_C = \dot{I}_L$, $\varphi = 0$. В цепи будет иметь место *резонанс токов*. Условие резонанса $B_C = B_L$. Сопротивление $\dot{Z} = 1/\dot{Y}$ цепи будет максимальным, а ток $\dot{I} = \dot{U}/\dot{Z}$ примет минимальное значение.

Эквивалентные схемы замещения пассивного двухполюсника

Если для пассивного двухполюсника известно напряжение $\dot{U}$ и ток $\dot{I}$, то его можно представить в виде схемы с последовательным соединением активного и реактивного сопротивлений или в виде параллельного соединения активной и реактивной проводимостей.

Первый вариант: схема замещения с последовательным соединением активного и реактивного сопротивлений (Рис.5.6).

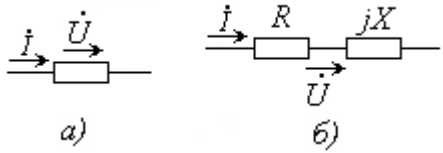


Рис.5.6. *а)* пассивный двухполюсник; *б)* эквивалентная схема замещения.

Комплексное сопротивление двухполюсника

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U}{I} e^{j(\psi_u - \psi_i)} = Z\, e^{j\varphi} = R + jX, \qquad (5.15)$$

где: $R = Z\cos\varphi$; $X = Z\sin\varphi$.

Второй вариант: схема замещения с параллельным соединением активной и реактивной проводимостей (Рис.5.7).

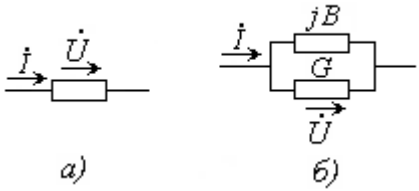


Рис.5.7. *а)* пассивный двухполюсник; *б)* эквивалентная схема замещения.

Комплексная проводимость двухполюсника

$$\dot{Y} = \frac{\dot{I}}{\dot{U}} = \frac{I}{U} e^{j(\psi_i - \psi_u)} = Y e^{-j\varphi} = G - jB, \qquad (4.16)$$

где: $G = Y\cos\varphi$; $B = Y\sin\varphi$.

Здесь необходимо иметь в виду, что хотя $\dot{Y} = 1/\dot{Z}$ и $\dot{Z} = 1/\dot{Y}$, $R \neq 1/G$ и $X \neq 1/B$. Переход от последовательного соединения (Рис.5.7, *б*) к параллельному соединению (Рис.5.6, *б*) возможен, если элементы выразить как:

$$G = \frac{R}{R^2 + X^2}; \quad B = \frac{X}{R^2 + X^2}. \qquad (5.17)$$

Для перехода от параллельного соединения к последовательному необходимо пользоваться соотношениями:

$$R = \frac{G}{G^2 + B^2}; \quad X = \frac{B}{G^2 + B^2}. \qquad (5.18)$$

5.2. Энергетические соотношения в пассивном двухполюснике

Если к пассивному двухполюснику приложено напряжение $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ и в нем протекает ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$, то мгновенная мощность

$$p = ui = U_m I_m \sin(\omega t + \psi_u)\sin(\omega t + \psi_i) =$$
$$= \frac{U_m I_m}{2}[\cos(\psi_u - \psi_i) + \cos(2\omega t + \psi_u + \psi_i)]. \qquad (5.19)$$

Средняя мощность за период T

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p dt = \frac{U_m I_m}{2}\cos(\psi_u - \psi_i) = U I \cos\varphi. \qquad (5.20)$$

Формула (5.20) определяет *активную мощность P*, характеризующую энергию, потребляемую двухполюсником от источника. Активная мощность измеряется в ваттах (Вт).

Произведение $U \cdot I$ определяют как *полную мощность S*. Для ее измерения используется единица *вольт-ампер* (ВА).

$$S = U \cdot I\,. \qquad (5.21)$$

Наличие в двухполюснике реактивных элементов обуславливает процесс обмена энергией между источником и двухполюсником, характеризуемый *реактивной мощностью Q*. Ее величину определяют как

$$Q = U \cdot I \sin\varphi. \qquad (5.22)$$

Измеряют реактивную мощность в *вольт-амперах реактивных* (ВАр).

Для пассивного двухполюсника все три виды мощностей можно наглядно представить в виде треугольника мощностей. Для этого используем треугольники сопротивлений, например, для цепи с последовательным соединением элементов R и X (см. рис. 5.3, *а* и *б*). Умножив стороны треугольников на I^2, получим треугольники мощностей для активно-индуктивного и активно-емкостного характера сопротивления двухполюсника (Рис. 5.8).

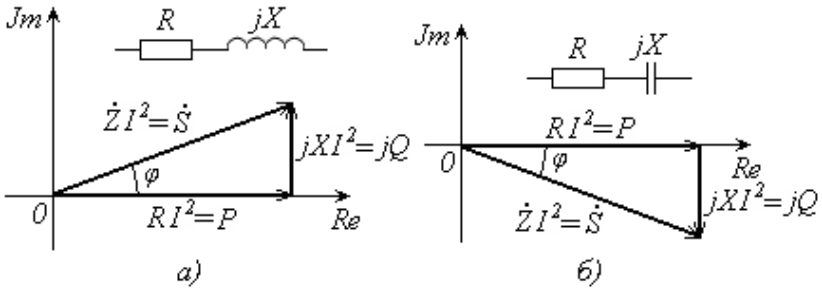


Рис. 5.8. Треугольники мощностей для:
а) - активно-индуктивного и *б)* - активно-емкостного характера сопротивления двухполюсника.

Стороны треугольника мощности связаны между собой зависимостями:

$$\dot{S} = P + jQ. \tag{5.23}$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \tag{5.24}$$

Аналитическое выражение для комплексной мощности имеет вид:

$$\dot{S} = \dot{U}\dot{I}^* = UIe^{j(\psi_u - \psi_i)} = Se^{j\varphi}, \tag{5.25}$$

где $\dot{I}^* = I^{-j\psi_i}$ - комплексное сопряженное значение тока.

Коэффициент мощности

В формуле (5.20) присутствует сомножитель $\cos\varphi$, который называют *коэффициентом мощности.* Он показывает, какая доля активной мощности содержится в полной, подводимой к потребителю мощности *S*, то есть $\cos\varphi = P / S$.

На практике, при передаче электрической энергии от источника к потребителю, стремятся обеспечить максимальное значение коэффициента мощности, чтобы $\cos\varphi \to 1$. Причиной уменьшения $\cos\varphi$ является наличие в потребителе реактивных сопротивлений, в основном индуктивного характера, обуславливающих появление

сдвига фаз φ между напряжением и током и появление реактивной составляющей тока. Из-за этого появляется реактивная мощность, которая приводит к неполному использованию генераторов, линий передачи электрической энергии, трансформаторных подстанций и другого электротехнического оборудования. Все это приводит к увеличению потерь электроэнергии.

Для увеличения $cos\varphi$ используют различные способы компенсации сдвига фаз φ. Наиболее простым из них является подключение параллельно нагрузке батареи конденсаторов. При этом, если емкостная проводимость конденсаторов будет равна индуктивной проводимости потребителя, они взаимно компенсируются. Реактивная составляющая общего тока в подводящей линии передачи электрической энергии снижается, и сдвиг фаз φ между напряжением и током приближается к нулю. Коэффициент мощности будет близок к единице.

5.3. Баланс мощности в цепи синусоидального тока

В электрической цепи в любой момент времени алгебраическая сумма мгновенных мощностей источников энергии $p_И$ равна алгебраической сумме мгновенных мощностей приемников энергии $p_П$, то есть

$$\sum_{\kappa=1}^{n} p_{И\kappa} = \sum_{l=1}^{m} p_{Пl}. \qquad (5.26)$$

Это утверждение вытекает из закона сохранения энергии.

Для цепей синусоидального тока баланс мощностей удобно формулировать в комплексной форме:

$$\sum_{k=1}^{n} \dot{S}_{Ик} = \sum_{l=1}^{m} \dot{S}_{Пl}. \qquad (5.27)$$

В (5.27) для любого источника $\dot{S}_И = \dot{E}\dot{I}_И^*$ и любого потребителя $\dot{S}_П = \dot{U}_П \dot{I}_П^*$.

Для активных и реактивных мощностей также будет иметь место баланс:

$$\sum_{k=1}^{n} P_{И\,k} = \sum_{l=1}^{m} P_{П\,l}; \qquad (5.28)$$

$$\sum_{k=1}^{n} Q_{И\,k} = \sum_{l=1}^{m} Q_{П\,l}. \qquad (5.29)$$

Знаки слагаемых мощностей всех видов определяются направлением токов и напряжений или ЭДС. Если направления перемножаемых величин совпадают, ставится знак плюс. В противном случае ставится знак минус.

Для цепей постоянного тока:

$$\sum_{k=1}^{n} E_k I_k = \sum_{l=1}^{m} U_l I_l. \qquad (5.30)$$

В (5.30) $E_k\, I_k$ – мощность k – го источника из всех n источников, а $U_l\, I_l$ – мощность l – го потребителя из всех m потребителей данной цепи.

Контрольные вопросы

1. Изобразите для цепи с последовательным соединением элементов R , L и C комплексную диаграмму тока и напряжений.
2. Как на основании комплексной диаграммы для цепи с последовательным соединением элементов R , L и C можно построить треугольник сопротивлений?
3. Что такое резонанс напряжений?
4. Для цепи с параллельным соединением элементов R , L и C изобразите комплексную диаграмму токов и напряжения.
5. Что такое резонанс токов и при каком условии он будет иметь место?
6. Какие схемы замещения могут использоваться для пассивного двухполюсника?
7. Какие виды мощности существуют в цепях переменного тока?
8. Как найти полную комплексную мощность?

9. Что такое коэффициент мощности?
10. Как в комплексной форме формулируется баланс мощностей?

6. ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

6.1. Описание трехфазных цепей

Трехфазная система состоит из источника тока, линии электропередачи и приемников электрической энергии. Она представляет совокупность трех однофазных цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые по фазе друг относительно друга на угол 2π/3.

Передача электрической энергии на дальние расстояния по трехфазным цепям более выгодна, чем передача энергии по однофазным цепям. Кроме того, трехфазные синхронные генераторы, трехфазные асинхронные двигатели и трансформаторы более просты в производстве, экономичны и надежны в эксплуатации. В трехфазных системах достаточно просто получить вращающееся магнитное поле, воздействие которого на проводники с током положено в основу принципа работы асинхронных и синхронных электродвигателей.

Источником электрической энергии в трехфазной цепи является генератор, в трех обмотках которого, конструктивно сдвинутых друг относительно друга на угол 2π/3 и называемых *фазами,* индуцируются три ЭДС, начальные фазы которых, в свою очередь, также сдвинуты относительно друг друга на угол 2π/3 (Рис. 6.1, 6.2).

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 2\pi/3); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + 2\pi/3). \end{aligned} \qquad (6.1)$$

Кроме трехфазных генераторов на электростанциях в качестве источников, формирующих трехфазную ЭДС (6.1), выступают также трехфазные трансформаторы на электрических подстанциях.

Электрические приемники, то есть устройства, потребляющие электрическую энергию, могут быть однофазными и трех-

фазными. Однофазными приемниками являются: бытовые осветительные и нагревательные приборы, однофазные электродвигатели, сварочные трансформаторы, холодильники и другие устройства. К трехфазным электроприемникам относятся: трехфазные электродвигатели, электрокалориферы, электроводонагреватели, мощные выпрямители и другие потребители электроэнергии.

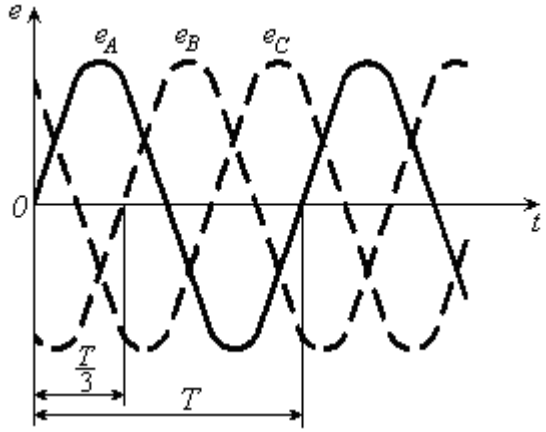
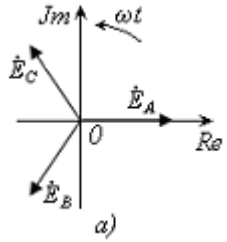


Рис. 6.1. Волновые диаграммы ЭДС в трехфазной цепи.



$$\dot{E}_A = E\,; \quad \dot{E}_B = E e^{-j\frac{2}{3}\pi}; \quad \dot{E}_C = E e^{j\frac{2}{3}\pi}. \qquad (6.2)$$

б)

Рис. 6.2. Трехфазная система ЭДС: *а)* комплексная диаграмма; *б)* комплексы ЭДС.

Важным преимуществом трехфазной цепи является то, что от нее возможно питать как трехфазные так и однофазные потребители электрической энергии.

5.2. Способы соединения фаз источника и приемника

Для получения трехфазной системы необходимо определенным образом соединить фазы источника и фазы потребителя электрической энергии. В промышленности получила распространение *четырех-проводная трехфазная система* электроснабжения, в которой фазы источника и фазы потребителя (фазы нагрузки) соединены *звездой*, как показано на рис. 6.2. При таком соединении все концы фаз источника соединяются в один узел *N*. Аналогичным образом в узле *n* объединяются концы или начала фаз нагрузки. Узлы *N* и *n*, называемые *нейтралями*, соединяются одним проводом, который называют *нейтральным проводом*. Свободные выводы фаз соединяют *линейными проводами*. На рис. 6.2 это провода *Аа, Вв* и *Сс*.

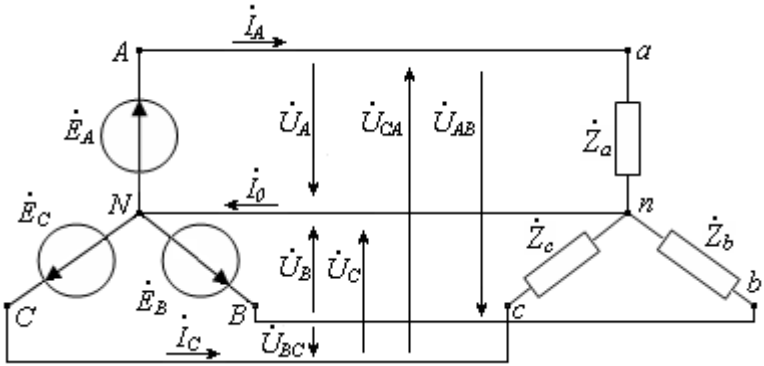


Рис. 6.2. Соединение фаз источника и приемника звездой.

Напряжения, действующие между нейтральным проводом и линейными проводами фаз, называются *фазными напряжениями*. На рисунке 6.2 это напряжения $\dot{U}_A, \dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$.

Если нагрузка симметричная, то есть $\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C$, действующие значения фазных напряжений будут одинаковы, то есть $\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C$.

Токи в фазах источника и нагрузки $\dot{I}_A, \dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ называются *фазными токами*. При их суммировании получим ток в нулевом

проводе $\dot{I}_0$. Для случая симметричной нагрузки $\dot{I}_0 = 0,$ и нулевого провода может не быть.

Напряжения между линейными проводами называются *линейными*. Соотношения между фазными ($U_Ф$) и линейными ($U_Л$) напряжениями показаны на рис. 6.3. При сложении векторов образуются три равнобедренных треугольника с углом у вершины равном 120 градусов и боковыми углами по 30 градусов.

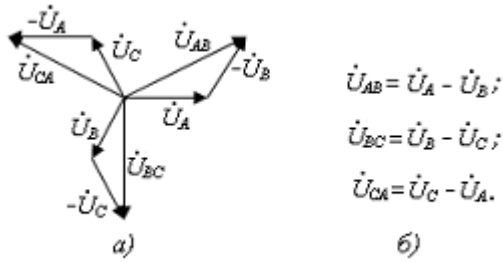


Рис. 6.3. Соотношения между фазными и линейными напряжениями: *а)* векторные; *б)* аналитические.

Из треугольников напряжений следует, что

$$U_Л = 2U_Ф \cos 30^0 = \sqrt{3}U_Ф. \qquad (6.3)$$

Соотношение (6.3) является важным для определения соотношения действующих в четырехпроводной трехфазной сети напряжений. Если фазное напряжение $U_Ф$ = 220 В, то линейное напряжение $U_Л$ = 380 В. При напряжении $U_Л$ = 220 В фазное напряжение $U_Ф$ = 127 В. В данной системе *линейные токи,* под которыми подразумевают токи в линейных проводах, равны фазным токам, то есть $\dot{I}_Л = \dot{I}_Ф$.

При несимметричной нагрузке, когда $\dot{Z}_A \neq \dot{Z}_B \neq \dot{Z}_C$, ток нулевого провода $\dot{I}_0 \neq 0$. Соотношение (6.3) справедливо и в этом случае. Наличие нулевого провода, при этом, обязательно. При его отсутствии, например обрыве, происходит изменение величин фазных напряжений. В одних фазах напряжение может возрасти, в других - понизиться. Такая ситуация приведет к нарушению нормального

режима работы приемника (нагрузки). По этой причине запрещена установка в цепь нулевого провода предохранителей.

При передаче электрической энергии используется также *трехпроводная трехфазная система*, у которой фазы соединены *треугольником* (Рис. 6.4). Алгебраическая сумма ЭДС источника будет равна нулю и при любых соотношениях сопротивлений фаз нагрузки дополнительные провода не требуются. *Линейные напряжения* в такой системе равны *фазным*.

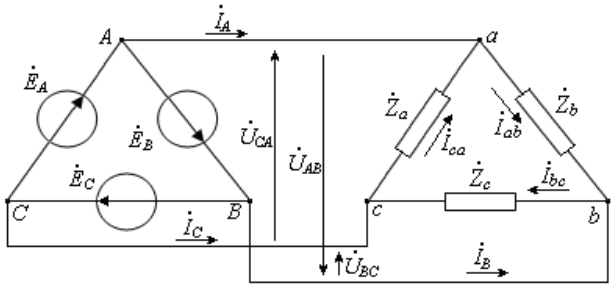


Рис. 6.4. Соединение фаз источника и приемника треугольником.

Векторная диаграмма напряжений и токов показана на рис.6.5. Для простоты построения взята симметричная нагрузка:

$$\dot{Z}_A = \dot{Z}_B = \dot{Z}_C = Z\,e^{j\varphi} \qquad (6.4)$$

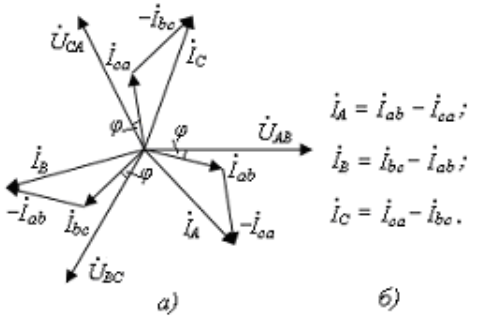


Рис. 6.5. Векторная диаграмма напряжений и токов в трехпроводной трехфазной системе при симметричной нагрузке.

Выполнив алгебраическое сложение векторов токов фаз нагрузки получим векторы линейных токов (Рис.6.5, *а*). Рассмотрев треугольники токов, получим, аналогично как в предыдущем случае для напряжений в четырехпроводной системе, что каждый из линейных токов

$$I_Л = 2 I_Ф \cos 30^\circ = \sqrt{3}\, I_Ф. \qquad (6.5)$$

6.3. Мощность трехфазного тока

Мощность трехфазной системы равна сумме мощностей трех отдельных фаз. В симметричной системе активная мощность системы $P = 3P_Ф$. При комплексной нагрузке

$$P_Ф = U_Ф I_Ф \cos\varphi\ , \qquad (6.6)$$

где φ – угол сдвига фаз между напряжением $U_Ф$ и током $I_Ф$ в нагрузках фаз. При соединении звездой $I_Ф = I_Л$, $U_Л = \sqrt{3} U_Ф$ или $U_Ф = U_Л / \sqrt{3}.$

Тогда активная мощность системы

$$P = 3\frac{U_Л}{\sqrt{3}} I_Л \cos\varphi = \sqrt{3}\, U_Л I_Л \cos\varphi. \qquad (6.7)$$

При соединении треугольником $I_Ф = I_Л / \sqrt{3},\ U_Ф = U_Л$.

Получим аналогично

$$P = 3U_Л \frac{I_Л}{\sqrt{3}} \cos\varphi = \sqrt{3}\, U_Л I_Л \cos\varphi. \qquad (6.8)$$

Сравнивая соотношения (6.7) и (6.8) видим, что активная мощность трехфазной системы при симметричной нагрузке не зависит от способа соединения фаз.

Аналогичным образом придем к выражению для реактивной мощности системы:

$$Q = \sqrt{3}\, U_Л I_Л \sin\varphi. \qquad (6.9)$$

Полная мощность симметричной трехфазной системы

$$S = \sqrt{3} U_Л I_Л . \qquad (6.10)$$

Комплексная мощность

$$\dot{S} = P + jQ = \sqrt{3} U_Л I_Л (\cos\varphi + j \sin\varphi). \qquad (6.11)$$

Для несимметричной трехфазной системы все виды мощностей следует определять путем суммирования мощностей отдельных фаз.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под трехфазной системой?
2. Что такое фаза?
3. Чему равен угол сдвига фаз между ЭДС соседних фаз?
4. Что означает термин *симметричная нагрузка*?
5. Изобразите схему соединения трехфазной системы звездой (треугольником).
6. Какое напряжение является фазным при соединении трехфазной системы звездой?
7. Какова роль нейтрального провода в трехфазной системе при соединении звездой?
8. Какое напряжение в трехфазной системе является линейным и как оно связано с фазным напряжением при соединении звездой и при соединении треугольником?
9. Как определить полную мощность трехфазной системы при симметричной нагрузке?
10. Как определить полную мощность трехфазной системы при несимметричной нагрузке?

7. ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА. ФИЛЬТРЫ

7.1. Периодические несинусоидальные электрические величины

Во многих электротехнических устройствах, в устройствах автоматики, в устройствах связи, в вычислительной технике используются периодические напряжения и токи, форма которых отличается от синусоидальной. По этой причине знакомство с элементами теории несинусоидальных электрических величин необходимо для понимания принципа действия многих видов различной аппаратуры и новой техники. Периодические напряжения и токи аналитически представляют в виде периодических функций времени.

В общем виде, под *периодической функцией* понимают функцию

$$f(t) = f(t + kT), \tag{7.1}$$

где: T – период функции; k – целое число.

На рис. 7.1 показаны примеры периодических функций.

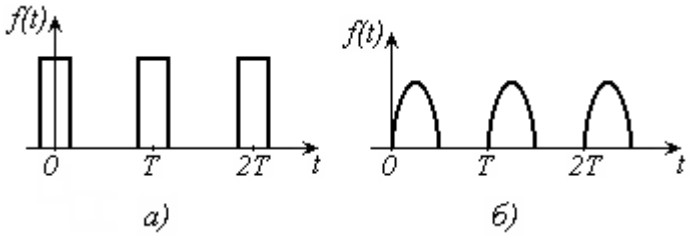


Рис.7.1. Примеры периодических последовательностей импульсов: *а)* – прямоугольных импульсов; *б)* – синусоидальных импульсов.

Из курса математики известно, что п*ериодическая функция времени может быть представлена в виде ряда Фурье*, в общем случае – в виде суммы бесконечного числа гармонических колебаний (гармоник).

Пусть функция $f(t)$ – ток $i(t)$. Тогда, пользуясь этим утверждением можно записать:

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{n} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_{ik}), \qquad (7.2)$$

где: $I_0 = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)\,dt$ - постоянная составляющая (колебание с частотой $\omega = 0$); $I_{km} = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ - амплитуда k - ой гармоники тока; $\psi_{ik} = arctg\, a_k/b_k$ – начальная фаза k - ой гармоники тока.

Входящие в выражения для амплитуд и начальных фаз гармоник тока коэффициенты a_k и b_k определяются как

$$a_k = \frac{2}{T}\int_0^T i(t)\cos k\omega t\, dt; \qquad (7.3)$$

$$b_k = \frac{2}{T}\int_0^T i(t)\sin k\omega t\, dt. \qquad (7.4)$$

Аналогичным образом можно представить и другие периодические электрические величины: напряжение, ЭДС, мгновенную мощность и так далее.

Выражение (7.2) для периодического колебания называют *частотным спектром* этого колебания.

На рис. 7.2 показано распределение амплитуд гармонических колебаний спектра периодической последовательности импульсов тока прямоугольной формы. Такое распределение называют *амплитудно-частотным спектром* (АЧС).

Для ряда задач удобной оказывается комплексная форма ряда Фурье:

$$\tilde{i}(t) = \frac{1}{2}\sum_{k=-\infty}^{\infty} \dot{I}_{km} e^{jk\omega t}, \qquad (7.5)$$

где: $\dot{I}_{km} = I_{km} e^{j\psi_{ik}}$ - комплексная амплитуда k-ой гармоники.

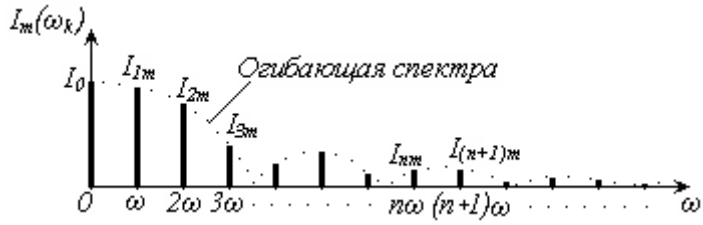


Рис. 7.2. Примерный вид амплитудно-частотного спектра периодической последовательности импульсов тока прямоугольной формы.

От выражения (7.5) к обычному представлению (выражение 7.2) можно перейти взяв, например, мнимую часть мгновенного комплекса тока.

$$i(t) = Jm\{\tilde{i}(t)\} = \frac{1}{2}\sum_{k=-\infty}^{\infty} Jm\{\dot{I}_{km} e^{jk\omega t}\}. \qquad (7.6)$$

Теоретически спектр периодической несинусоидальной электрической величины состоит из бесконечного количества гармонических колебаний. Однако в большинстве практических задач можно обходиться их конечным количеством. При этом, для расчета режима линейной цепи периодического несинусоидального тока применим *метод наложения*. Каждую из гармонических составляющих спектра, в том числе и постоянную составляющую, можно определить, применив любой из известных методов расчета.

Действующее значение периодических несинусоидальных величин

На практике, при анализе и расчете электротехнических устройств, в которых действуют периодические электрические величины (напряжения, токи, ЭДС), пользуются их действующими значениями.

Например, для периодического тока, независимо от его формы в пределах периода, действующее значение

$$I = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T i^2 dt}. \qquad (7.7)$$

Подставив в (7.7) значение тока из формулы (7.2) и выполнив все математические преобразования, получим, что

$$I = \sqrt{I_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k^2}, \qquad (7.8)$$

где: I_0 - постоянная составляющая периодического тока; I_k – действующее значение k-ой гармоники спектра периодического тока. Таким образом, *действующее значение периодического несинусоидального тока равно корню квадратному из суммы квадрата постоянной составляющей и квадратов действующих значений гармоник спектра*.

Аналогично определяются действующие значения напряжения и ЭДС.

Мощность периодического несинусоидального тока

Активная мощность периодического тока равна средней за период его мгновенной мощности, то есть

$$P = \frac{1}{T}\int_0^T p\,dt = \frac{1}{T}\int_0^T u\,i\,dt. \qquad (7.9)$$

Выразив напряжение u и ток i через их частотные спектры согласно формуле (7.2) и подставив в (7.9) получим, после математических преобразований, что активная мощность

$$P = P_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \cos\varphi_k, \qquad (7.10)$$

где: P_{0k} – мощность постоянной составляющей ($P_0 = U_k I_k$);
$U_k\ I_k\ cos\varphi_k$ – активная мощность k-ой гармоники; $\varphi_k = \psi_u - \psi_i$.- сдвиг фаз между напряжением и током для k-ой гармоники.

Очевидно, будет справедлива запись:

$$P = P_0 + \sum_{k=1}^{\infty} P_k . \qquad (7.11)$$

Активная мощность периодического несинусоидального тока равна сумме мощности постоянной составляющей и активных мощностей всех гармонических составляющих его спектра. Выражение (7.11) представляет собой энергетический спектр периодического колебания.

Реактивная мощность периодического колебания

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin\varphi_k . \qquad (7.12)$$

Полная мощность периодического несинусоидального колебания

$$S = U \cdot I.$$

Однако в цепях периодического несинусоидального тока, известное для цепей синусоидального тока, равенство не выполняется:

$$S \neq \sqrt{P^2 + Q^2} . \qquad (7.13)$$

7.2. Четырехполюсники

Четырехполюсником называют часть электрической цепи, рассматриваемая по отношению к двум парам ее зажимов (Рис. 7.3). В качестве четырехполюсника могут быть представлены линия передачи электроэнергии, трансформатор, усилитель электрического сигнала, электрический фильтр и другое электротехническое устройство, включенное между источником и приемником электрической энергии, когда необходимо определить напряжения и токи на этих зажимах, а не внутри самого четырехполюсника.

В зависимости от того, какова схема четырехполюсника и какие элементы она включает, четырехполюсник может быть линейным или нелинейным, активным или пассивным, симметричным или несимметричным и так далее. Кратко остановимся на *линейных* четырехполюсниках. Линейный четырехполюсник не содержит нелинейных элементов.

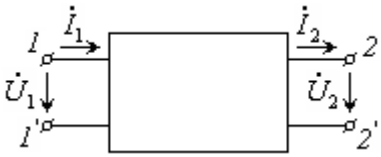


Рис. 7.3. Четырехполюсник.

Аналитически четырехполюсники описывают с помощью искусственно введенных параметров. Существует шесть способов такого описания. Рассмотрим два – через $\dot{Z}$ - параметры и через $\dot{Y}$ - параметры.

При использовании $\dot{Z}$ - параметров для входного и выходного контуров схемы четырехполюсника (Рис. 7.3), записывают систему уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{Z}_{11}\dot{I}_1 + \dot{Z}_{12}\dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 &= \dot{Z}_{21}\dot{I}_1 + \dot{Z}_{22}\dot{I}_2. \end{aligned} \qquad (7.14)$$

Смысл $\dot{Z}$ - параметров можно определить с помощью опытов холостого хода на входе четырехполюсника ($\dot{I}_1 = 0$) и на его выходе ($\dot{I}_2 = 0$). Тогда:

при $\dot{I}_1 = 0$ $\quad \dot{Z}_{22} = \dfrac{\dot{U}_2}{\dot{I}_2}$ - выходное сопротивление,

$\dot{Z}_{12} = \dfrac{\dot{U}_1}{\dot{I}_2}$ - передаточное сопротивление от входа к выходу;

при $\dot{I}_2 = 0$ $\quad \dot{Z}_{11} = \dfrac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}$ - входное сопротивление,

$\dot{Z}_{21} = \dfrac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$ - передаточное сопротивление от выхода к входу.

При использовании $\dot{Y}$ - параметров система уравнений для четырехполюсника имеет вид:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \dot{Y}_{11}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{12}\dot{U}_2; \\ \dot{I}_2 &= \dot{Y}_{21}\dot{U}_1 + \dot{Y}_{22}\dot{U}_2. \end{aligned} \qquad (7.15)$$

Смысл $\dot{Y}$ - параметров можно определить с помощью опытов короткого замыкания на входе и на выходе четырехполюсника ($\dot{U}_1 = 0; \dot{U}_2 = 0$). Тогда:

при $\dot{U}_1 = 0$ $\quad \dot{Y}_{22} = \dfrac{\dot{I}_2}{\dot{U}_2}$ - выходная проводимость,

$\dot{Y}_{12} = \dfrac{\dot{I}_1}{\dot{U}_2}$ - передаточная проводимость от выхода к входу;

при $\dot{U}_2 = 0$ $\quad \dot{Y}_{11} = \dfrac{\dot{I}_1}{\dot{U}_1}$ - входная проводимость,

$\dot{Y}_{21} = \dfrac{\dot{I}_2}{\dot{U}_1}$ - передаточная проводимость от входа к выходу.

Для пассивных линейных четырехполюсников

$$\dot{Z}_{12} = \dot{Z}_{21}; \;\; \dot{Y}_{12} = \dot{Y}_{21}.$$

Пользуясь соотношениями (7.14) и (7.15), можно построить схемы замещения (эквивалентные схемы) четырехполюсников, соответствующие $\dot{Z}$ - параметрам и $\dot{Y}$ - параметрам (Рис. 7.4).

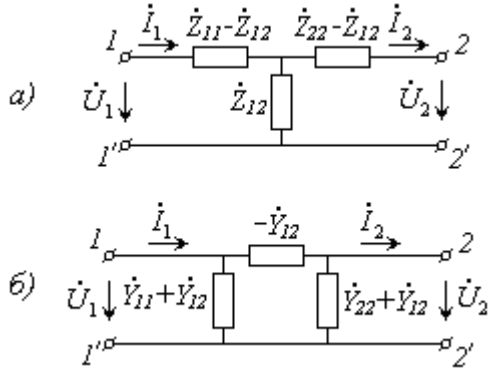


Рис. 7.4. Схемы замещения четырехполюсников:
а) Т – образная; *б)* П – образная.

Передаточная функция четырехполюсника

При прохождении электрического колебания через четырехполюсник параметры этого колебания (амплитуда, начальная фаза) будут изменяться. Оценить количественно эти изменения позволяет передаточная функция.

Передаточной функцией называется отношение комплексной амплитуды (комплекса) электрической величины на выходе четырехполюсника к комплексной амплитуде (комплексу) электрической величины, действующей на его входе.

Передаточные функции, отношению одноименных электрических величин называют *комплексным коэффициентом передачи*.

Комплексный коэффициент передачи по напряжению

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_2}{U_1} e^{j(\psi_{U2} - \psi_{U1})} = K_U e^{j\varphi_U}. \qquad (7.16)$$

Комплексный коэффициент передачи по току

$$\dot{K}_I = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_1} = \frac{I_2}{I_1} e^{j(\psi_{I1} - \psi_{I2})} = K_I e^{j\varphi_I}. \qquad (7.17)$$

Из (7.16) и (7.17) видно, что $\dot{K}_U$ и $\dot{K}_I$ являются безразмерными величинами. Они, в общем случае, зависят от частоты, так

как четырехполюсник может содержать реактивные элементы – индуктивности и емкости, у которых сопротивление зависит от частоты. С учетом этого будет справедливой запись для комплексного коэффициента передачи по напряжению

$$\dot{K}_U = K_U(j\omega) = K_U(\omega)e^{j\varphi_U(\omega)}, \qquad (7.18)$$

и по току

$$\dot{K}_I = K_I(j\omega) = K_I(\omega)e^{j\varphi_I(\omega)}. \qquad (7.19)$$

Модуль комплексного коэффициента передачи $K_U(\omega)$ или $K_I(\omega)$ называют амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) четырехполюсника, аргумент - $\varphi_U(\omega)$ или $\varphi_I(\omega)$ его фазочастотной характеристикой (ФЧХ).

Очевидно, что эти характеристики важны для случаев воздействия на четырехполюсник периодических несинусоидальных колебаний, спектр которых состоит из гармонических колебаний различных частот, АЧХ позволяет определять амплитуды выходных колебаний при известных амплитудах и частотах входных колебаний, а ФЧХ показывает величину изменения фазы колебаний в зависимости от их частот.

7. 3. Электрические фильтры

Электрический фильтр это четырехполюсник, пропускающий гармонические колебания в некоторой полосе частот с малым затуханием. Для колебаний с частотами вне этой полосы затухание велико. Полоса частот, при которых затухание мало, называется *полосой пропускания* фильтра. Остальная область частот составляет *полосу задерживания* (или *полосу затухания*) фильтра.

Свойство фильтра по разному влиять на колебания с различными частотами называется *частотной избирательностью*.

Принцип работы электрических фильтров основан на зависимости сопротивления их реактивных элементов от частоты. Частотные свойства фильтров очень удобно описывать с помощью

соотношений (7.16) - (7.19), которые позволяют получить их АЧХ и ФЧХ.

В зависимости от вида АЧХ различают следующие виды фильтров: фильтры нижних частот, фильтры высоких частот, полосовые фильтры и заграждающие фильтры.

Фильтры нижних частот (ФНЧ) пропускают с малым затуханием колебания в полосе частот $\Delta\omega = 0\ldots\omega_{гр}$. Примерный вид АЧХ ФНЧ приведен на рис. 6.5. Частоту $\omega_{гр}$, которая ограничивает полосу пропускания ФНЧ сверху, называют *граничной частотой* и определяют на уровне $K_{MAX}/\sqrt{2}$ или в данном случае на уровне $K(0)/\sqrt{2}$, как показано на рисунке.

ФНЧ, обычно, используются в качестве сглаживающих фильтров при выпрямлении переменного тока или для подавления колебаний высших частот в периодическом синусоидальном колебании основной частоты. Примеры схем ФНЧ приведены на рис. 7.6. *LC* – фильтры обеспечивают более крутой спад АЧХ вне полосы пропускания – при $\omega > \omega_{гр}$ чем *RC* – фильтры.

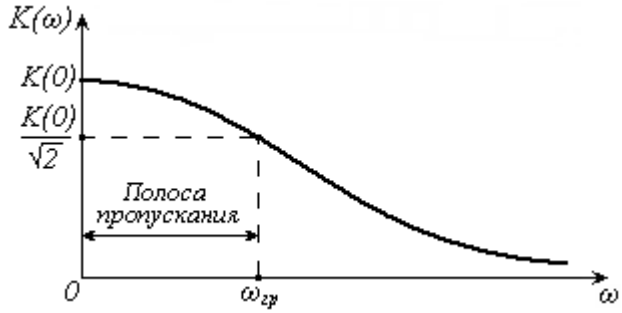


Рис. 7.5. АЧХ фильтра нижних частот.

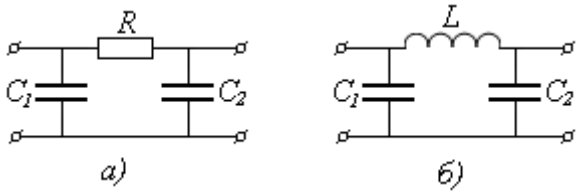


Рис. 7.6. Примеры схем ФНЧ: *а) RC* – фильтр; *б) LC* – фильтр.

Фильтры высоких частот (ФВЧ) пропускают с малым затуханием колебания с частотами $\omega > \omega_{гр}$. Примерный вид АЧХ ФВЧ приведен на рис. 7.7. Полоса пропускания этого фильтра простирается от частоты $\omega_{гр}$ до бесконечности. Примеры реализации схем ФВЧ приведены на рис. 7.8.

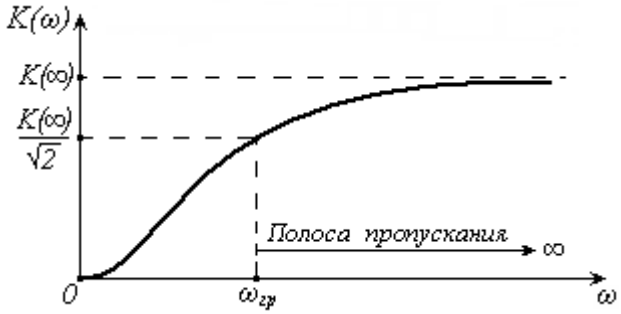


Рис. 7.7. АЧХ фильтра нижних частот.

Такого рода фильтры используются для подавления постоянной составляющей и колебаний с низкими частотами. Они находят широкое применение в электронных схемах автоматики, в усилителях, в системах связи и в других устройствах.

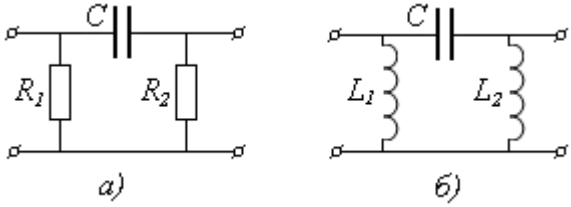


Рис. 7.8. Примеры схем ФВЧ: *а) RC* – фильтр; *б) LC* – фильтр.

Полосовые фильтры (ПФ) и *заграждающие фильтры* (ЗФ) имеют две граничные частоты - $\omega_{гр1}$ и $\omega_{гр2}$ (Рис. 7.9). Полоса пропускания ПФ $\Delta\omega = \omega_{гр2} - \omega_{гр1}$

Для ЗФ диапазон частот $\Delta\omega = \omega_{гр2} - \omega_{гр1}$ определяет *полосу подавления*, в пределах которой колебания, проходящие через фильтр, будут ослабляться.

На рисунке 7.10 приведены примеры реализации полосового и заграждающего фильтров. На схемах обоих фильтров к выходам подсоединена нагрузка, которая не входит в состав их элементов

однако оказывает влияние на их свойства. Полосовой фильтр (Рис. 7.9, *а*) представляет собой последовательный колебательный контур.

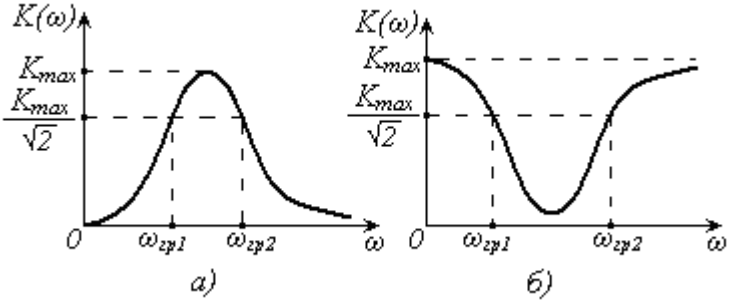


Рис. 7.9. АЧХ полосового *а)* и заграждающего *б)* фильтров.

Вблизи резонансной частоты его сопротивление минимально. Поэтому он будет в этой области частот оказывать минимальное сопротивление для гармонических колебаний, частоты которых попадают в пределы его полосы пропускания $\Delta\omega = \omega_{гр2} - \omega_{гр1}$

Заграждающий фильтр (Рис. 7.9, *б*) представляет собой параллельный колебательный контур. Вблизи резонансной частоты его сопротивление максимально. За счет этого он будет в этой области частот оказывать очень большое сопротивление для гармонических колебаний, частоты которых попадают в пределы его полосы подавления $\Delta\omega = \omega_{гр2} - \omega_{гр1}$

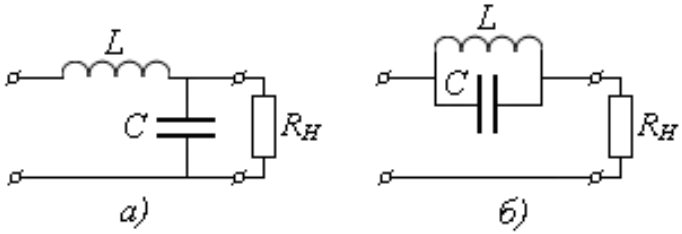


Рис. 7.8. Примеры схем реализации фильтров: *а)* полосового; *б)* заграждающего.

Приведенные здесь схемы всех видов фильтров являются только простейшими примерами. Возможны и другие варианты схем фильтров, более сложных и обладающих лучшими характеристиками.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под периодической несинусоидальной величиной?
2. Каким образом периодическая функция времени может быть представлена в виде ряда Фурье?
3. Что понимают под спектром периодического сигнала?
4. Как определяется мощность периодического несинусоидального тока?
5. Что такое четырехполюсник и как его можно описать математически?
6. Какие схемы замещения четырехполюсника Вы можете назвать и изобразить?
7. Что такое комплексный коэффициент передачи четырехполюсника?
8. Что понимают под АЧХ И ФЧХ четырехполюсника?
9 .Что понимают под электрическим фильтром и какие его основные характеристики?
10.Какой вид имеет АЧХ для ФНЧ, (ФВЧ, ПФ, ЗФ)?

8. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

8.1. Возникновение переходных процессов и их описание

Режим работы электрической цепи, когда величины всех токов, напряжений и ЭДС или постоянны или периодически изменяются, называют *установившимся режимом*. Однако наступление некоторого установившегося режима, отличающегося от предыдущего, происходит, как правило, не сразу. Должен состояться *переходный процесс*. Причиной переходного процесса является коммутация. Под *коммутацией* понимают быстрое изменение параметров цепи или режима ее работы. Для осуществления переходного процесса обычно требуется время. Для чисто электрических устройств это связано с изменением запасов энергии в реактивных элементах L и C. Величина энергии в индуктивности, как и в емкости, не может изменяться мгновенно.

В электромеханических системах и устройствах на время переходного процесса влияют обладающие определенной инерцией элементы, скорость перемещения или скорость вращения которых после коммутации изменяется. Это - электрические двигатели, приводящие в движение рабочие органы производственных агрегатов, сердечники реле и контакторов и другие устройства.

В электрических схемах во время переходных процессов могут возникать очень большие величины токов и напряжений, связанных большими скоростями изменения запасов энергии в элементах. В связи с этим переходные процессы могут быть желательны – как в системе зажигания двигателя внутреннего сгорания, или нежелательны – как, например, возникновение искрового разряда в выключателях.

Математически описать и произвести анализ линейной цепи в любых режимах можно с помощью линейных дифференциальных уравнений. Метод анализа цепей с помощью дифференциальных уравнений называют *классическим методом*. Для линейной цепи порядок линейного дифференциального уравнения (ЛДУ) определяется количеством содержащихся в ней реактивных элементов. Для цепи, в которой нет источников электрической энергии, описывающее ее дифференциальное уравнение будет однородным, то есть в правой части будет стоять ноль (ОЛДУ). Если цепь содержит источники ЭДС или тока, то она будет описываться неоднородным дифференциальным уравнением (НЛДУ).

Для решения ЛДУ используют различные методы: классический, операторный, метод интеграла Фурье и временной метод (метод интеграла Дюамеля).

В рамках данного вопроса остановимся на рассмотрении *классического метода*. Реализуется данный метод в несколько этапов.

1. На основе законов Ома и Кирхгофа составляется система уравнений, связывающая искомую величину, например ток $i(t)$ в элементах цепи с воздействующим напряжением $u(t)$ или ЭДС $e(t)$ и получают ЛДУ цепи. В общем случае ЛДУ будет неоднородным и иметь вид:

$$a_0 i^{(n)}(t) + a_1 i^{(n-1)}(t) + \ldots + a^{n-1} i'(t) + a_n i(t) =$$

$$= b_0 u^{(m)}(t) + b_1 u^{(m-1)}(t) + \ldots + b_{m-1} u'(t) + b_m u(t) \qquad (8.1)$$

где $a_0 \ldots a_n$ - коэффициенты, характеризующие параметры системы; $b_0 \ldots b_m$ – коэффициенты, определяющие параметры входного воздействия, причем $m \le n$.

2. Определяют *начальные условия*, которые для анализируемой цепи будут означать напряжения на емкостях и токи в индуктивностях в момент коммутации, то есть на начало переходного процесса.

3. Выражение для искомой величины находят в виде суммы общего (свободного) и частного (принужденного) решений. Если искомая величина ток, то

$$i(t) = i_{св}(t) + i_{пр}(t)\ . \qquad (8.2)$$

Свободное решение $i_{св}(t)$ описывает свободный процесс в цепи (без источников), то есть является решением ОЛДУ цепи (выражение 8.1, когда правая часть равна нулю).

Принужденное решение $i_{пр}(t)$ описывает установившийся режим работы цепи после окончания переходного процесса, то есть когда прошло большое время после коммутации (полагают $t \to \infty$) .

4. Определяют постоянные интегрирования в общем решении. Для этого используют начальные условия.

8.2. Законы коммутации и начальные условия

Для определения начальных условий используют два закона коммутации.

Первый закон коммутации.

Мгновенное изменение тока в индуктивности невозможно.

Формулировка закона вытекает из того обстоятельства, что средняя скорость изменения энергии в индуктивности не может быть бесконечно большой. Действительно, если

$$\frac{\Delta W_L}{\Delta t} = \frac{L\left[i_L^2(t_2) - i_L^2(t_1)\right]}{2(t_2 - t_1)}, \qquad (8.3)$$

то при $\Delta t = t_2 - t_1 \to 0$ разность токов, при $i_L^2(t_2) \ne i_L^2(t_1)$, будет иметь конечное значение и соотношение (8.3) будет стремиться к

бесконечности. Это значит, для поддержания этой разности токов в индуктивности необходим источник бесконечно большой мощности. Так как таких источников в природе не существует, то мгновенное или скачкообразное изменение тока в индуктивности невозможно. Аналитически первый закон коммутации записывают в следующем виде:

$$i_L(t_-) = i_L(t_+)\,. \tag{8.4}$$

В формуле (8.4) под t следует понимать момент времени, в который произошла коммутация.

Второй закон коммутации.

Мгновенное изменение напряжения на емкости невозможно. В этом легко убедиться, проанализировав процесс изменения запаса энергии в емкости. Если средняя мощность изменения энергии электрического поля

$$\frac{\Delta W_C}{\Delta t} = \frac{C\left[u_C^2(t_2) - u_C^2(t_1)\right]}{2(t_2 - t_1)}, \tag{8.5}$$

то при $\Delta t = t_2 - t_1 \to 0$ разность напряжений $u_1 - u_2$, при $u_C^2(t_2) - u_C^2(t_1)$, будет конечной, а соотношение (8.5) будет стремиться к бесконечности. Это значит, для поддержания такой разности напряжений в емкости необходим источник электрической энергии бесконечно большой мощности. Так как таких источников в природе не существует, то мгновенное или скачкообразное изменение напряжения на емкости невозможно.

Аналитическая запись второго закона коммутации имеет вид:

$$u_C(t_-) = u_C(t_+)\,. \tag{8.6}$$

Токи в индуктивностях и напряжения на емкостях непосредственно перед коммутацией называются начальными условиями. Если коммутация происходит в момент времени $t = 0$, тогда их определяют как $i_L(0_-)$ и $u_C(0_-)$.

Если $i_L(t_-) = 0$ и $u_C(t_-) = 0$, то *начальные условия нулевые*.

8.3. Переходные процессы в простых цепях

Рассмотрим несколько примеров переходных процессов в простых цепях, содержащих один реактивный, обладающий инерцией, реактивный элемент.

Подключение источника ЭДС к катушке индуктивности.

Проанализируем переходный процесс в цепи с индуктивностью (Рис. 8.1,*а*) после замыкания выключателя *SB*. Воспользуемся классическим методом.

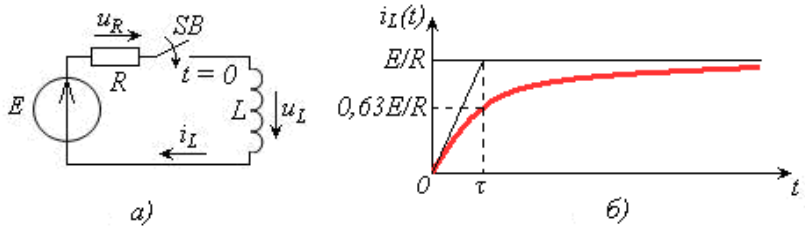


Рис. 8.1. Переходный процесс в цепи с индуктивностью.

1. При заданных направлениях тока и напряжений на элементах составим уравнения, описывающие состояние цепи. Направление обхода цепи удобно выбрать по часовой стрелке.

Согласно второму закону Кирхгофа

$$u_R + u_L = E.$$

При этом $u_L = Ldi/dt$; $u_R = R{\cdot}i$. Подставив в исходное уравнение значения напряжений получим дифференциальное уравнение цепи:

$$Ldi/dt + Ri = E. \qquad (8.7)$$

Полученное уравнение является неоднородным дифференциальным уравнением (НЛДУ) первого порядка.

2. Для решения полученного уравнения определим начальные условия. Из рассмотрения схемы цепи (Рис. 8.1) следует, что при $t = 0_-$ ток $i_L(0_-) = 0$. До коммутации запаса энергии в индуктивности нет.

3. Общее решение НЛДУ найдем как сумму общего (свободного) и частного (принужденного) решений, то есть в виде

$$i_L(t) = i_{Lсв}(t) + i_{Lпр}(t) .$$

Принужденное решение получим, предположив, что переходный процесс закончился. Для этого положим $t \to \infty$. Тогда ток

$$i_{Lпр}(t) = E/R.$$

Свободное решение находим из решения ОЛДУ в виде

$$i_{Lсв}(t) = Ae^{pt},$$

где $p = -R/L$ – корень характеристического уравнения

$$Lp + R = 0.$$

4. Постоянная интегрирования A находится из общего решения НЛДУ

$$i_L(t) = i_{Lсв}(t) + i_{Lпр}(t) = Ae^{-\frac{L}{R}t} + \frac{E}{R}$$

с учетом начальных условий. При $t = 0_-$

$$i_L(0_-) = 0 = A + \frac{E}{R}.$$

Откуда получаем, что $A = -E/R$. Окончательно записываем выражение для тока в индуктивности:

$$i_L(t) = \frac{E}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \qquad (8.8)$$

где $\tau = L/R$ – *постоянная времени* цепи. Размерность постоянной времени [τ] = Гн/Ом = Ом·с/Ом = с.

Постоянная времени τ определяет максимальную скорость изменения тока. Она равна времени, за которое ток $i_L(t)$ достиг бы максимального значения E/R, если бы скорость его изменения оставалась максимальной.

Такую скорость изменения ток $i_L(t)$ имеет при $t = 0$. В этом легко убедиться продифференцировав выражение (8.8).

График тока $i_L(t)$ приведен на рис.8.1,*б*.

Для простых цепей длительность переходного процесса считают равной (3…5)*τ*. За такой промежуток времени величина разрядного тока индуктивности или напряжения на емкости уменьшается до уровня 0,03…0,05 от начального значения или возрастает до уровня 0,95…0,97 от установившегося значения.

Подключение источника ЭДС к емкости

Проанализируем переходный процесс в цепи с емкостью (Рис. 8.2, *а*) после замыкания выключателя *SB*. Начальное условие $u_C(0_-) = 0$. До коммутации запаса энергии в емкости нет.

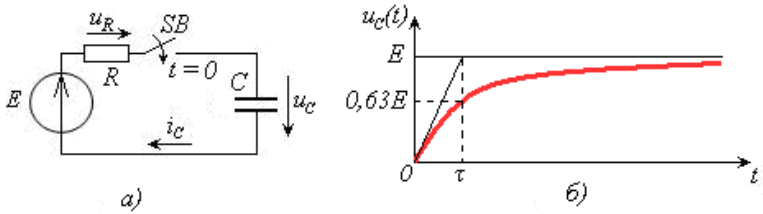


Рис. 8.2. Переходный процесс в цепи с емкостью.

Как и в предыдущем примере воспользуемся классическим методом. На основании второго закона Кирхгофа и закона Ома ($u_R = R \cdot i$), с учетом что $i_C = C du_C / dt$, получим ЛДУ цепи:

$$u_R + u_C = E \quad \text{или} \quad RCu'_C + u_C = E. \qquad (8.9)$$

Общее решение

$$u_C(t) = u_{Cсв}(t) + u_{Cпр}(t) .$$

В установившемся режиме $u_{Cпр}(t=\infty)=E$.
Составляющая $u_{Cсв}(t)$ соответствует решению ОЛДУ $RCu'_C + u_C = E$ и равна $u_{Cсв}(t) = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$. Тогда общее решение

$$u_C(t) = E + Ae^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $\tau = RC$. Подставив $t = 0$, получим значение постоянной интегрирования A: $u_C(0_-) = u_C(0_+) = 0 = E + A$. Отсюда $A = -E$. Тогда окончательно можно записать, что напряжение на емкости после замыкания выключателя *SB* будет изменяться во времени, как

$$u_C(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}). \qquad (8.10)$$

Как и в примере с индуктивностью τ имеет размерность времени ($[\tau] = RC$ = Ом·Ф = Ом·А·с/В = с) и является постоянной времени рассмотренной цепи. График зависимости $u_C(t)$ приведен на рис. 8.2, *б*.

Отключение индуктивной нагрузки от источника ЭДС

Данный случай переходного процесса часто встречается в практических схемах. Схема электрической цепи и параметры элементов приведены на рис. 8.3. Требуется определить, как будут изменяться ток в катушке индуктивности с параметрами R_K ,L_K и напряжение на нагрузке R_H после коммутации.

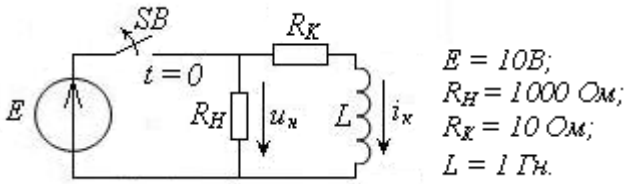


Рис. 8.3. Отключение источника ЭДС от цепи с индуктивностью.

Из рассмотрения схемы цепи следует, что после коммутации согласно второму закону Кирхгофа

$$L i'_L + i_L R_H + i_L R_K = 0 \text{ или } L i'_L + (R_H + R_K) i_к = 0. \quad (8.11)$$

Перед коммутацией ($t = 0_-$) напряжение $u_и$ = 10В и ток в катушке индуктивности $i_к = E/R_K$ = 1А. В данном случае начальные условия не являются нулевыми. Уравнение (8.11) является ОЛДУ первого порядка. Его общее решение будет содержать только свободную составляющую вида

$$i_{ксв} = Ae^{pt},$$

где p – корень уравнения $Lp + R_H + R_K = 0$.

$$p = -\frac{R_H + R_K}{L} = -\frac{1}{\tau}. \quad (8.12)$$

Постоянная времени τ = 1/(1000+10) = 10^{-3}/1,01·с = 0,99 мс.

Постоянная интегрирования A, с учетом начального условия $i_к(0_-) = i_к(0_+)$ = 1А получим из равенства $1 = Ae^{p0}$.

A = 1ампер. Окончательно для тока катушки индуктивности можно записать:

$$i_к(t) = 1e^{-1,01 \cdot 10^3 t} A, \text{ при } t > 0. \quad (8.13)$$

Напряжение на сопротивлении R_H согласно закону Ома и с учетом направления тока $i_к$

$$u_H = -R_H i_K = -1000 e^{-1,01 \cdot 10^3 t}, B \text{ при } t > 0. \quad (8.14)$$

Графики тока в индуктивности и напряжения на сопротивлении R_H приведены на рис. 8.4.

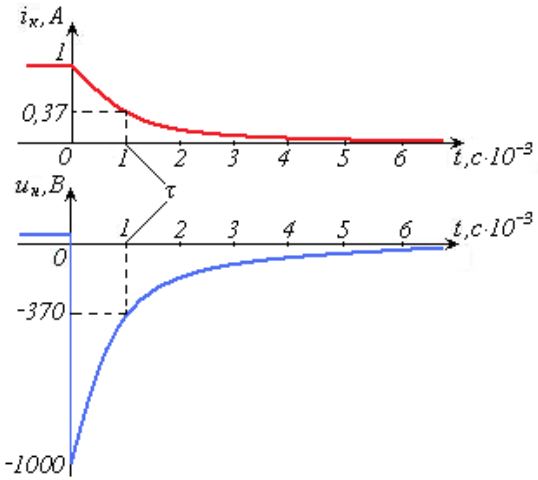


Рис. 8.4. Свободный переходный процесс в цепи с индуктивностью.

Анализируя полученные результаты можно констатировать, что во время переходного процесса ток катушки индуктивности плавно, не изменяя направления, уменьшается до нуля. Напряжение на сопротивлении R_H скачком меняет направление и существенно изменяется по величине. В момент времени $t = 0_+$ это напряжение по абсолютной величине в 100 раз превосходит напряжение источника. Данное свойство индуктивности используется в технике для получения импульсов напряжения большой амплитуды (в системах зажигания двигателей внутреннего сгорания; в светильниках люминесцентных ламп, оборудованных электромагнитными пускорегулирующими аппаратами; в телевизионных устройствах и в других случаях).

Контрольные вопросы

1. Что понимают под переходным процессом?
2. Чем характеризуется установившийся режим работы цепи?
3. Когда возникают переходные процессы в электрических цепях?
4. Что такое коммутация?
5. В чем заключается суть классического метода анализа линейных цепей?
6. В каком виде получают решение НЛДУ цепи?

7. Что понимают под начальными условиями при анализе переходного процесса?
8. Сформулируйте законы коммутации и поясните их физический смысл?
9. Что такое постоянная времени цепи и каков ее физический смысл?
10. Какой вид имеет переходный процесс при заряде индуктивности (емкости) при ее подключении к источнику постоянного напряжения?

9. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА

9.1. Общие сведения о нелинейных цепях

Параметры элементов линейных цепей – *R, L* и *C* не зависят от электрических величин – тока и напряжения. Однако на практике большинство электротехнических устройств содержат элементы, параметры которых в большей или меньшей степени зависят от токов и напряжений в этих элементах, то есть *R(i)* или *R(u), L(i)* и *C(u)* (Рис. 9.1). Если в линейных элементах ток и напряжение связаны линейными зависимостями

$$u_R = R \cdot i_R, \quad u_L = \frac{di_L}{dt}, \quad u_C = \frac{1}{C}\int_0^t i_C\, dt,$$

то для нелинейных элементов эти соотношения не будут выполняться.

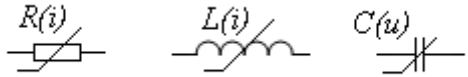


Рис. 9.1. Нелинейные элементы.

Свойства нелинейных элементов могут быть определены из их характеристик: *вольтамперной* $i_R = f(u_R)$ для нелинейного активного сопротивления, *вебер-амперной* $\Psi_L = f(i_L)$ для нелинейной индуктивности и *кулон-вольтной* $q_C = f(u_C)$ для нелинейной емкости.

Нелинейные элементы могут быть управляемыми и неуправляемыми. Неуправляемый нелинейный элемент описывается одной характеристикой. Примерами таких элементов являются: терморезистор, катушка индуктивности с ферромагнитным сердечником, полупроводниковый диод , лампа накаливания. Управляемые нелинейные элементы, у которых характеристики зависят от управляющего фактора, описывается семейством характеристик. Такими элементами являются: транзистор, тиристор, операционный усилитель (как элемент цепи).

Электрическая цепь называется *нелинейной*, если она содержит хотя бы один нелинейный элемент. Процессы в нелинейных элементах и в нелинейных цепях описываются нелинейными алгебраическими и дифференциальными уравнениями. Для нелинейных цепей неприменимы методы расчета, основанные на принципе суперпозиции (наложения): метод наложения, метод контурных токов, метод эквивалентного генератора.

9.2. Нелинейные цепи постоянного тока

Простые нелинейные цепи удобно рассчитывать *графическим методом*. Для примера рассмотрим цепь, содержащую нелинейный резистивный элемент *R(u)*, вольтамперная характеристика (ВАХ) которого задана (Рис. 9.1. *а, б*). Электрическая цепь относительно элемента *R(u)* может быть задана в виде активного двухполюсника, как это показано в п.3.6.

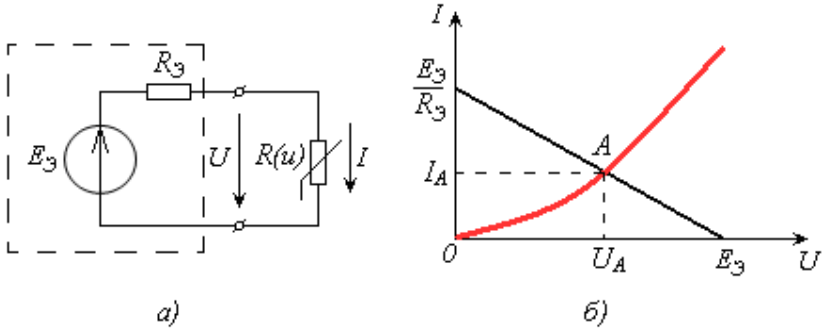


Рис. 9.2. Графический метод расчета цепи, содержащей один нелинейный элемент.

Согласно второму закону Кирхгофа для цепи, изображенной на рис. 9.1.*а)* можно записать:

$$IR_Э + I\,R(u) = E_Э\,, \text{ где } I\,R(u) = U. \qquad (9.1)$$

Ток в нелинейном элементе *R(u),* выраженный из (9.1), запишем в виде:

$$I = \frac{E_Э - U}{R_Э}. \qquad (9.2)$$

Из выражения (9.2) следует, что при напряжении $U = 0$, когда $R(u) = 0$, ток будет равен $E_Э/R_Э$ (см. рис. 9.1.*б*). Если напряжение $U = E_И$ ток $I = 0$. Полученные две точки соединим прямой линией. Эта линия будет являться *внешней (нагрузочной) характеристикой* активного двухполюсника, нагруженного на нелинейное активное сопротивление *R(u).* Выражение (9.2) является аналитической записью нагрузочной характеристики. Она пересекается с ВАХ элемента *R(u)* в точке ***A***, которую называют рабочей точкой данного элемента. Она определяет рабочий режим нелинейной цепи, содержащей один нелинейный элемент.

Графический метод расчета нелинейной цепи с применением нагрузочной характеристики эквивалентного двухполюсника называется *методом нагрузочной характеристики*.

Данный метод пригоден также в случаях, когда в цепи содержатся последовательно или параллельно соединенные нелинейные элементы с известными ВАХ. В таких случаях необходимо, путем сложения отдельных ВАХ, получить результирующую ВАХ и для нее использовать метод нагрузочной характеристики.

При последовательном соединении нелинейных элементов (Рис. 9.3, *а*) ВАХ этих элементов графически суммируются по напряжению, как показано на рис. 9.3, *б.* Результирующая ВАХ будет описывать свойства нелинейного двухполюсника, составленного из двух нелинейных элементов путем их последовательного соединения. Далее, пользуясь методом нагрузочной характеристики, на результирующей ВАХ определяют рабочую точку, находят ток. Напряжение на каждом элементе определяют с помощью ВАХ этого элемента.

При параллельном соединении нелинейных элементов (Рис. 9.4, *а*) ВАХ этих элементов графически складывают по току и получают результирующую ВАХ, как показано на рис. 9.4, *б*. Пользуясь методом нагрузочной характеристики, на результирующей ВАХ определяют рабочую точку, находят общее напряжение и, для каждого элемента по его ВАХ, определяют ток в каждом из элементов.

Аналогичным образом рассчитывают цепи, содержащие смешанное соединение нелинейных элементов.

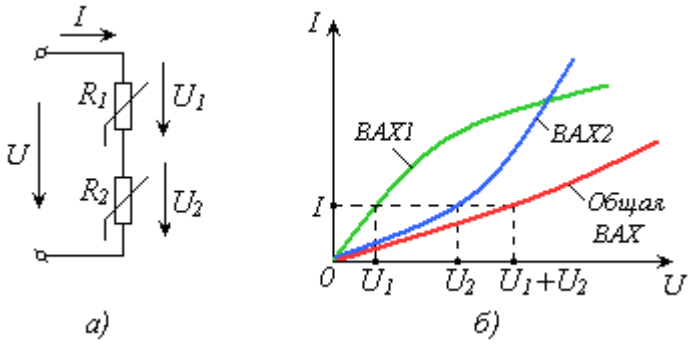


Рис. 9.3. Последовательное соединение нелинейных элементов.

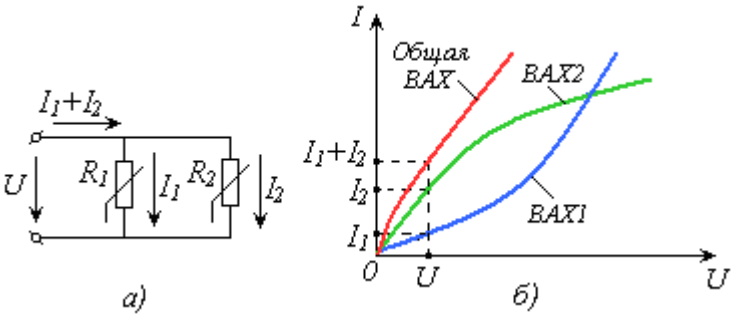


Рис. 9.4. Параллельное соединение нелинейных элементов.

9.3. Нелинейные цепи переменного тока

Для простоты понимания особенностей анализа и расчета нелинейной цепи, находящейся под воздействием переменной ЭДС, рассмотрим цепь с нелинейным резистивным элементом (Рис. 9.5).

Пусть переменная ЭДС будет задана в виде гармонического колебания

$$e_Э = E_m \sin(\omega t - \Psi_1), . \qquad (9.3)$$

где E_m – амплитуда, ω – круговая частота, $\Psi_1 = \omega t_1$ – начальная фаза. Если в формуле (9.3) раскрыть скобки, то получим другую запись: $e_Э = E_m \sin \omega(t - t_1)$.

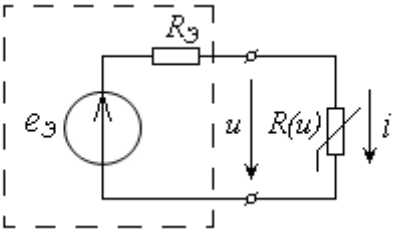


Рис. 9.5. Электрическая цепь задана относительно элемента $R(u)$ в виде активного двухполюсника.

Уравнение нагрузочной характеристики для данной цепи будет выражаться соотношением

$$i = \frac{e_Э - u}{R_Э}. \qquad (9.4)$$

Графически, нагрузочная характеристика будет представлять собой прямую линию, проходящую через точки $u = e_Э = E_m \sin \omega(t - t_1)$ на оси абсцисс и точки $e_Э / R$ на оси ординат. На рис. 9.6 показаны крайние положения нагрузочной характеристики, когда $e_Э = \pm E_m$ и ток $i = \pm E_m/R$. Положение нагрузочной характеристики будет зависеть от времени t определяющего точку пересечения с осью абсцисс. С течением времени будет перемещаться по ВАХ нелинейного элемента и рабочая точка A из положения A_1 в положение A_2 и обратно.

Каждому положению рабочей точки на ВАХ будет соответствовать определенное значение тока i через нелинейный элемент (Рис. 9.6). Форма тока отличается от формы переменной ЭДС, дей-

ствующей в цепи. Это отличие обусловлено нелинейностью ВАХ элемента *R(u)*, параметр которого (активное сопротивление) зависит от напряжения *u* . Ток *i* не является гармоническим, то есть колебанием одной частоты. Он будет являться периодическим несинусоидальным колебанием с периодом $T = 2\pi/\omega$. Частотный спектр тока будет содержать гармонические колебания с частотами, кратными частоте переменной ЭДС (см. п. 7 данного пособия).

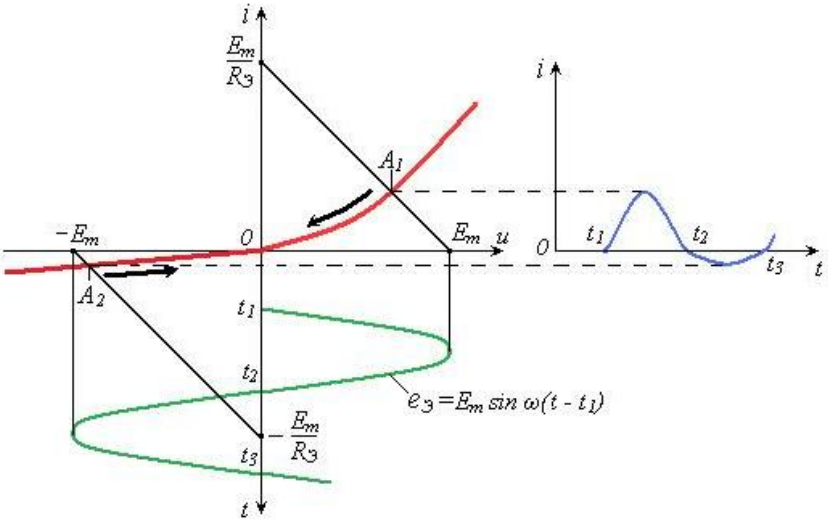


Рис. 9.6. Графики, поясняющие процессы в нелинейной цепи.

Рассмотрим пример воздействия на нелинейную цепь суммы постоянной ЭДС и переменной ЭДС

$$e_Э = E_0 + E_m \sin \omega t \,. \qquad (9.5)$$

В этом случае для определения тока через нелинейный элемент также можно воспользоваться графическим методом. Однако, при $E_m < E_0$ можно считать, что положение рабочей точки A_0 на ВАХ нелинейного элемента определяется величиной постоянной ЭДС E_0 , а участок ВАХ возле рабочей точки является практически линейным (Рис. 9.6). Переменная составляющая ЭДС будет вызывать смещение рабочей точки на ВАХ на отрезке $A_1 \ldots A_2$. Положением рабочей точки на ВАХ будет определяться значение постоянной составляющей тока нелинейного элемента I_0 (см. рис. 9.7). Ам-

плитуда переменной составляющей тока нелинейного элемента будет зависеть от *крутизны* ВАХ нелинейного элемента в районе рабочей точки A_0, определяемой как

$$S_A = \frac{di_A}{du_A}. \tag{9.6}$$

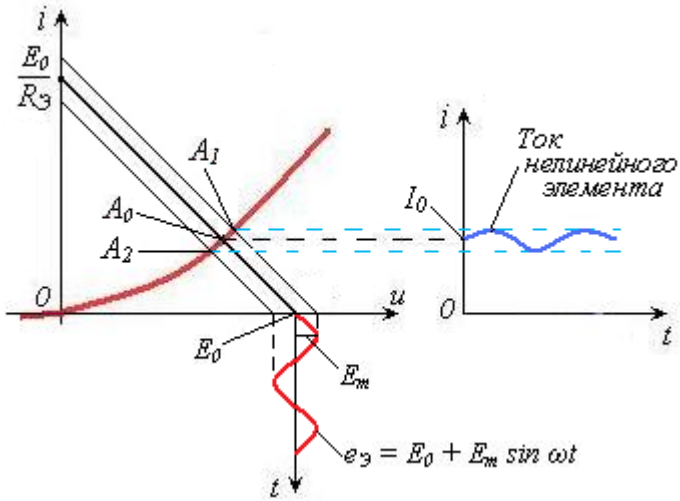


Рис. 9.7. Воздействие на нелинейную цепь суммы постоянной и переменной ЭДС.

Величина, обратная крутизне S_A, является сопротивлением нелинейного элемента в данной точке ВАХ.

$$R_A = \frac{du_A}{di_A} = R(u). \tag{9.7}$$

Изменяя величину постоянной ЭДС E_0 можно перемещать рабочую точку по ВАХ нелинейного элемента. При этом будет изменяться крутизна S_A ВАХ (или сопротивление $R(u)$ нелинейного элемента), что приведет к изменению амплитуды переменной составляющей тока нелинейного элемента. Конечно, при этом изменится и постоянная составляющая тока I_0.

Свойства нелинейных элементов используются при различных преобразованиях электрических колебаний, таких как: выпрямление переменного тока, генерирование и усиление, преобразование формы колебаний, регистрация и измерение неэлектрических величин (см. п. 2.3) и так далее.

9.4. Выпрямление переменного тока

Выпрямители – это электротехнические устройства, которые служат для преобразования синусоидального напряжения и тока в постоянное напряжение и ток.

По числу фаз источника синусоидального напряжения различают *однофазные* и *трехфазные* выпрямители.

Если в выпрямителе предусмотрена возможность регулирования величины выпрямленного напряжения, его называют *регулируемым*. В нерегулируемых выпрямителях в качестве основных элементов, обеспечивающих процесс выпрямления, используются полупроводниковые диоды.

Для уяснения принципа работы выпрямителя рассмотрим схему, приведенную на рис. 9.8. Напряжение на входе схемы

$$u = U_m \sin \omega t \,. \qquad (9.8)$$

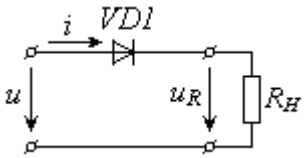


Рис. 9.8. Простейшая схема выпрямления переменного тока.

Амплитуда входного напряжения U_m велика. ВАХ полупроводниковых диодов для режима работы при большом входном колебании может быть заменена отрезками прямых линий (кусочно - линейная аппроксимация), как показано на рис. 9.9. Аналитически такую ВАХ записывают в виде:

$$i = 0 \text{ при } u < 0; \quad i = S_0 u \text{ при } u > 0, \qquad (9.9)$$

где S_0 – крутизна ВАХ, постоянная на заданном участке изменения напряжения u. Величина S_0 – имеет размерность проводимости, то есть А/В или 1/Ом. Аналитическая запись ВАХ (9.9) отражает главное свойство полупроводникового диода – его одностороннюю проводимость. При прямом включении ($u > 0$) его проводимость равна S_0 , при обратном включении ($u < 0$), проводимость диода равна нулю. Графическое отображение процесса протекания тока $i(t)$ через диод $VD1$ в простейшем выпрямителе представлено на рис. 9.9. Благодаря односторонней проводимости диода через него проходят только положительные полуволны тока. Форма тока существенно отличается от формы приложенного напряжения. Ток представляет периодическую последовательность импульсов синусоидальной формы. Аналогичную форму будет иметь напряжение на сопротивлении нагрузки R_H.

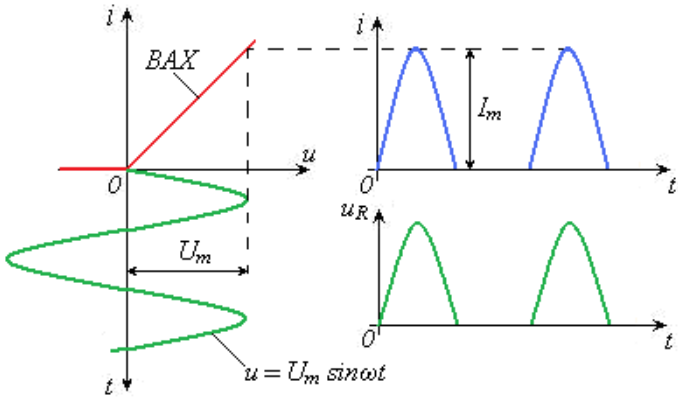


Рис. 9.9. Графическое отображение процесса выпрямления переменного тока.

Исходя из предыдущих рассуждений, можно заключить, что качество выпрямления переменного тока в простейшей схеме выпрямления (Рис. 9.8) низкое. Ток и напряжение на сопротивлении нагрузки R_H нельзя назвать постоянными.

Как улучшить качество выпрямления?

Ответ на данный вопрос позволит найти рассмотрение частотного спектра тока (п. 7 данного пособия). Частотный спектр периодической последовательности импульсов тока синусоидальной формы можно представить в виде ряда

$$i(t) = I_0 + \sum_{k=1}^{n} I_{km} \sin(k\omega t + \psi_{ik}), \qquad (9.10)$$

где: $I_0 = \frac{1}{T}\int_0^T i(t)\,dt = \frac{I_m}{\pi} = 0{,}637\, I_m$ - постоянная составляющая тока (колебание с частотой $\omega = 0$). В спектре тока будут также присутствовать колебания с частотами, кратными частоте повторения импульсов: ω, $2\,\omega$, $3\,\omega$ и так далее (9.10). Наличие этих колебаний и приводит к снижению качества выпрямления. «Очистить» постоянный ток на выходе диода от мешающих колебаний можно с помощью фильтра нижних частот (ФНЧ). Простейшим ФНЧ может являться конденсатор $C_Ф$, подключенный параллельно сопротивлению нагрузки $R_Н$ (Рис. 9.10, *а*).

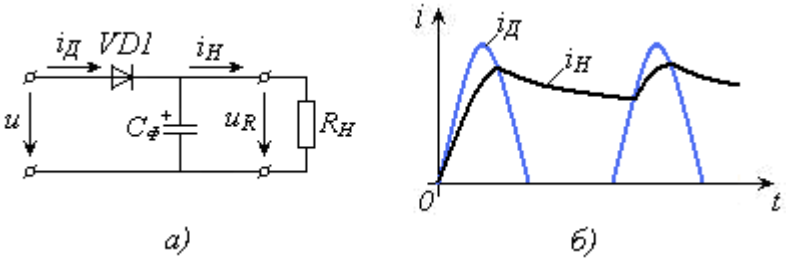


Рис. 9.10. Выпрямитель с ФНЧ:
а) – схема выпрямителя; *б)* – графики токов.

При подключенном к нагрузке конденсаторе $C_Ф$ ток через нагрузку $i_Н$ уже не будет иметь вид импульсов (Рис. 9.10, *б*). Во время протекания тока $i_Д$ через диод конденсатор $C_Ф$ будет заряжаться и ток, протекающий через сопротивление нагрузки $R_Н$ будет отличаться от импульсного. При уменьшении тока $i_Д$ и при его отсутствии ток $i_Н$ будет поддерживаться за счет разряда конденсатора $C_Ф$. Ток в нагрузке будет пульсирующим. Уровень пульсаций будет тем меньше, чем больше будет произведение $R_Н C_Ф$, то есть постоянная времени цепи нагрузки. Если уровень пульсаций при некотором заданном значении сопротивления $R_Н$ требуется уменьшить, то тогда необходимо увеличивать емкость конденсатора $C_Ф$.

Более качественное сглаживание пульсаций выходного напряжения в выпрямителях обеспечивают электронные схемы

стабилизации этого напряжения. Выпрямитель с электронной стабилизацией имеет также улучшенную нагрузочную характеристику, которая в рабочем диапазоне практически не имеет наклона.

Контрольные вопросы

1. Что понимают под нелинейным элементом?
2. Какими характеристиками описываются свойства нелинейных элементов *R(u), L(i)* и *C(u)*?
3. В чем заключается суть графического метода расчета нелинейной цепи?
4. Что понимают под методом нагрузочной характеристики?
5. Как получить результирующую ВАХ при последовательном или параллельном соединении нелинейных элементов?
6. Запишите уравнение внешней (нагрузочной) характеристики активного двухполюсника, нагруженного на нелинейное активное сопротивление *R(u).*
7. Что происходит при воздействие на нелинейную цепь суммы постоянной и переменной ЭДС?
8. Как осуществляется процесс выпрямления переменного тока?
9. Как аппроксимируют ВАХ полупроводникового диода при выпрямления переменного тока?
10. Каким образом можно снизить уровень пульсаций выпрямленного тока (напряжения) на выходе выпрямителя?

10. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ

10.1. Основные понятия и определения

Магнитной цепью называется совокупность различных ферромагнитных и неферромагнитных материалов, служащих для создания магнитных полей нужной конфигурации и интенсивности.

Ферромагнитные элементы состоят из *ферромагнитных материалов*, обладающих высокой магнитной проницаемостью.

Магнитная проницаемость (μ) характеризует связь между магнитной индукцией *B* и напряженностью магнитного поля *H* в среде или веществе. Она является важным параметром ферромаг-

нитных материалов, определяющим их магнитные свойства. К таким материалам относятся: железо, сплавы железа, ферриты.

Магнитная индукция B, или интенсивность магнитного поля, измеряется в *теслах* (Тл) и для катушки с ферромагнитным сердечником определяется как

$$B = \mu_a H\ ;\ \text{Тл}, \qquad (10.1)$$

где $\mu_a = \mu_0\,\mu$ – абсолютная магнитная проницаемость;
$\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная (проницаемость вакуума); μ – относительная магнитная проницаемость сердечника;
H – напряженность магнитного поля, А/м. Тл = $\text{В}\cdot\text{с}/\text{м}^2$. Для атмосферного воздуха абсолютная магнитная проницаемость практически равна магнитной проницаемости вакуума.

Магнитный поток Ф, вызываемый, например, магнитной индукцией в катушке, равен произведению магнитной индукции B на площадь сечения S этой катушки.

$$\Phi = B\,S. \qquad (10.2)$$

Измеряется магнитный поток в *веберах* (Вб). Вб = $\text{Тл}\cdot\text{м}^2$ или Вб = $\text{В}\cdot\text{с}$.

Из (10.1) и (10.2) следует, что если в катушку поместить сердечник с высокой магнитной проницаемостью μ , магнитный поток Φ, создаваемый катушкой возрастет в μ раз.

В магнитных цепях магнитные потоки могут создаваться постоянными магнитами или электромагнитами.

Магнитные цепи бывают:

- *однородными*, когда выполнены из одного материала;
- *неоднородными*, когда материалы, из которых они выполнены обладают различными свойствами.

Если во всех сечениях магнитной цепи магнитный поток Φ одинаков, то такая цепь является *неразветвленной* (Рис.10.1, *а*). В *разветвленной* цепи магнитные потоки на различных участках неодинаковы (Рис.10.1, *б*).

В общем случае магнитные цепи являются нелинейными.

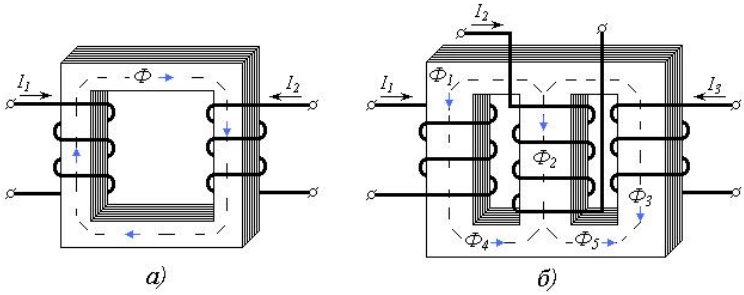


Рис.10.1. Примеры магнитных цепей:
а) неразветвленной; б) разветвленной.

10.2 Закон полного тока для магнитной цепи и свойства ферромагнитных материалов

Закон полного тока гласит: интеграл от напряженности магнитного поля по любому замкнутому контуру равен алгебраической сумме токов, сцепленных с этим контуром.

$$\oint_l \vec{H} dl = \sum_k I_k . \qquad (10.3)$$

Установлен закон полного тока опытным путем.

В случае, когда контур интегрирования охватывает *w* витков катушки с током *I*, получим другую запись аналитического выражения (10.3):

$$\oint_l \vec{H} dl = I\, w = F , \qquad (10.4)$$

где $F = I \cdot w$ – намагничивающая или магнитодвижущая сила (МДС) - аналог ЭДС. Измеряется *F* в амперах (А) или в *ампер-витках* (А·в).

На основании закона полного тока получают закон Ома для магнитной цепи:

$$\Phi = F / r_M , \qquad (10.5)$$

где *F* – МДС; $r_M = l_{CP}/(\mu_a S)$ – магнитное сопротивление участка цепи, 1/Гн; . l_{CP} - длина средней линии магнитной индукции *B*, м;

S – поперечное сечение участка магнитной цепи, м^2.

Однако данный закон в большинстве случаев применим с ограничениями, так как зависимость $B = f(H)$, не является линейной. Для ферромагнитных материалов абсолютная магнитная проницаемость μ_a зависит от напряженности магнитного поля H.

Зависимость $B = f(H)$, называемая *петлей гистерезиса*, приведена на рисунке 10.2. Ее получают экспериментальным путем на на образце ферромагнитного материала, в котором магнитное поле однородно, например – тороид с намотанной катушкой, в которой может протекать ток требуемой величины. Не вдаваясь во все тонкости эксперимента, проанализируем полученную зависимость.

В первоначальный момент, до появления тока I в катушке, напряженность магнитного поля $H = 0$ и магнитная индукция $B = 0$. При появлении тока в катушке и его увеличении появится и будет возрастать напряженность магнитного поля H и будет увеличиваться значение магнитной индукции $B = f(H)$ (см. рис. 10.2, тонкая линия). Это графическая зависимость первоначального намагничивания образца ферромагнитного материала. Она нелинейная. Достигнув при некотором значении напряженности магнитного поля H_{max} значения $B = B_{max}$, магнитная индукция перестает увеличиваться. Наступает *насыщение*.

Если, достигнув насыщения, плавно, уменьшая ток I в катушке, уменьшать напряженность магнитного поля H, то магнитная индукция также будет уменьшаться. Но зависимость $B = f(H)$ на обратном ходе не будет совпадать с зависимостью первоначального намагничивания (Рис. 10.2, жирная линия).

При токе $I = 0$ и $H = 0$ магнитная индукция $B \neq 0$ а будет иметь значение $B = B_r$. Величина B_r называется *остаточной магнитной индукцией*. Нулевое значение магнитной индукции получим при отрицательном токе, когда $H = -H_C$. Значение H_C называется *коэрцетивной силой*. Дальнейшее увеличение отрицательных значений напряженности H снова приводит к насыщению ферромагнитного материала, когда при $H \leq H_{min}$ магнитная индукция B будет равной $-B_{max}$. Если теперь изменять значение напряженности H от отрицательных, проходя точки $H = H_{min}$, $H = 0$ и $H = H_{max}$, то получим новую ветвь зависимости $B = f(H)$, расположенную ниже первых двух (Рис. 10.2). На ней также будут расположены характерные точки с координатами ($0; -B_{max}$) и ($+H_C; 0$). В результате нескольких циклов такого перемагничивания получается симметрич-

ная фигура, ограниченная жирной линией, которую и называют предельной статической петлей гистерезиса или просто – *петлей гистерезиса*.

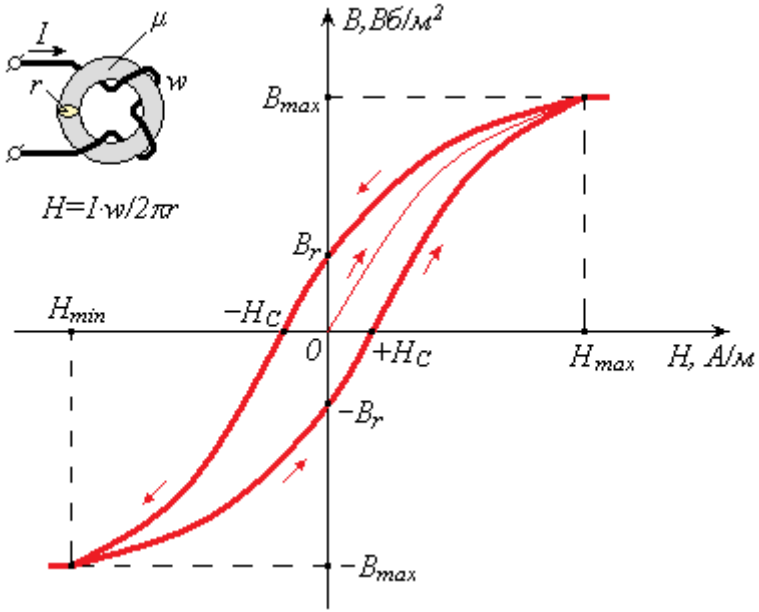


Рис. 10.2. Статическая петля гистерезиса.

Коэрцетивная сила H_C, остаточная магнитная индукция B_r и коэффициент прямоугольности $k_{\square}=B_r/B_{max}$ характеризуют предельный статический цикл гистерезиса ферромагнитного материала.

По значению параметра H_C ферромагнитные материалы различают как *магнитно-мягкие* ($H_C <$ 0,01 А/м) и *магнитно-твердые* ($H_C >$ 20…30 кА/м).

Магнитно-твердые материалы обладают способностью сохранять высокие значения остаточной магнитной индукции после устранения действия намагничивающего поля. К ним относятся литые и порошковые сплавы, включающие железо, никель, кобальт, ванадий, алюминий и другие элементы, а также ферриты. Магнитно-твердые материалы используются для изготовления постоянных магнитов.

Магнитно-мягкие материалы делятся на три типа: магнитные материалы с прямоугольной петлей гистерезиса ($k_{\square}>0,95$); магнит-

ные материалы с округлой петлей гистерезиса ($0{,}4 < k_{□} < 0{,}7$); магнитные материалы с линейными свойствами, у которых зависимость $B = f(H)$ практически линейная (Рис. 10.3). К таким материалам относятся различные марки пермаллоя, перминвар, ферриты с низкими значениями B_r и H_C, аморфные материалы (металлические стекла) и другие.

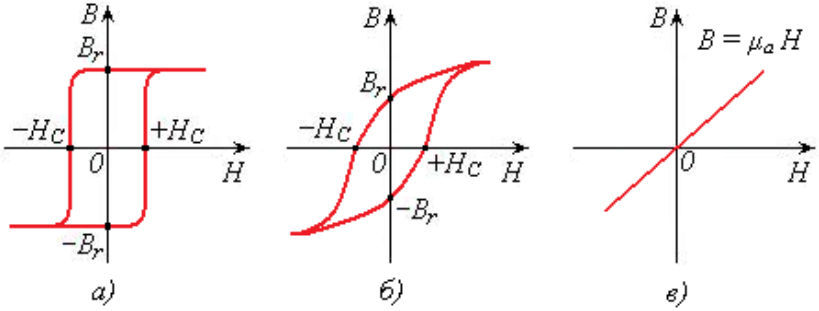


Рис. 10.3. Типы характеристик магнитно-мягких материалов:
а) прямоугольная; *б)* округлая; *с)* линейная.

Магнитно-мягкие материалы используются для изготовления сердечников и магнитопроводов электрических машин и аппаратов, в устройствах автоматики, в радиоэлектронике и в других областях техники.

10.3. Неразветвленные и разветвленные магнитные цепи

Задачей расчета неразветвленной магнитной цепи чаще всего является определение МДС $F = I \cdot w$ (10.4), необходимой для вычисления тока в катушке I, магнитного потока Φ или магнитной индукции B в некотором сечении $S_к$ магнитопровода.

Учитывая, что магнитный поток во всей неразветвленной цепи одинаков, значение магнитной индукции в *к*-ом сечении

$$B_к = \Phi / S_к = \mu_{ак} H_к. \qquad (10.6)$$

Из (10.6), с учетом (10.5) получим:

$$H_к = B_к / \mu_{ак} \text{ и далее } \sum_{1}^{n} H_к l_к = F \,. \qquad (10.7)$$

Для примера рассмотрим схему магнитной цепи, состоящую из магнитопровода с катушкой (Рис. 10.4), для которой магнитный поток Φ известен. Требуется определить величину тока I в катушке с количеством витков w, необходимую для создания требуемого магнитного потока. Цепь состоит из двух участков, геометрические параметры которых l_1, S_1 и l_2 , S_2 (l - длина участка, S – поперечное сечение участка). Магнитные свойства материала заданы зависимостью $B = \mu_a H$.

Если магнитный поток Φ задан, то он будет одинаковым для любого сечения магнитопровода: $\Phi = B_1 S_1 = B_2 S_2$. Тогда согласно формуле (10.7)

$$\sum_{к=1}^{2} H_к l_к = H_1 l_1 + H_2 l_2 = F = I w, \qquad (10.8)$$

где H_1 и H_2 напряженности магнитного поля в первом и втором участках магнитопровода.

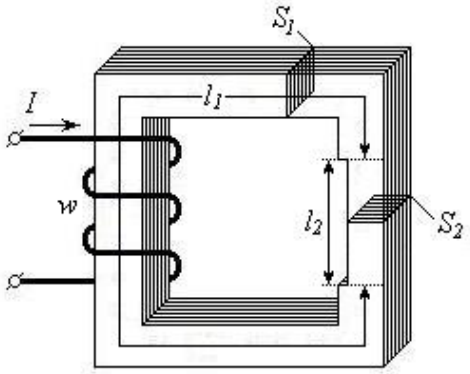


Рис. 10.4. Простая магнитная цепь.

Согласно закону Ома (10.5) для заданной магнитной цепи $\Phi = F /(r_{M1} + r_{M2})$. Тогда, с учетом (10.8) получим искомый ток:

$$I = \frac{F}{w} = \frac{\Phi}{w(r_{M1} + r_{M2})}, \qquad (10.9)$$

где $r_{M1} = l_1 / S_1 \mu_a$ - магнитное сопротивление участка длиной l_1;
$r_{M2} =. = l_2 / S_2 \mu_a$ - магнитное сопротивление участка длиной l_2 . В этих соотношениях $\mu_a = \mu_a (H)$, то есть является нелинейной величиной.

Обратная задача, когда требуется при известной МДС F определить магнитный поток Φ, сложнее. Решение можно получить графическим путем, используя магнитную характеристику цепи $F = f(\Phi)$.

В разветвленной магнитной цепи (например, изображенной на рис. 10.1, *б*) могут существовать несколько магнитных потоков, которые на определенных участках могут складываться или вычитаться. Здесь используются аналогии с первым и вторым законами Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа для магнитной цепи гласит: *в любом узле разветвленной магнитной цепи алгебраическая сумма магнитных потоков равна нулю.*

$$\sum_{\kappa=1}^{n} \Phi_\kappa = 0. \qquad (10.10)$$

Второй закон Кирхгофа для магнитной цепи формулируется так: *в любом контуре магнитной цепи алгебраическая сумма магнитодвижущих сил равна алгебраической сумме призведений магнитных потоков в ветвях данного контура и магнитных сопротивлений этих ветвей.*

$$\sum_{\kappa=1}^{n} F_\kappa = \sum_{l=1}^{m} \Phi_l r_{Ml}. \qquad (10.11)$$

10.4. Катушка индуктивности в цепи переменного тока

В цепях переменного тока катушки индуктивности с сердечниками и с магнитопроводами из ферромагнитных материалов часто используются. При расчете электрических цепей, содержащих

такие элементы возникает потребность в схемах их замещения, позволяющих упростить расчет.

Рассмотрим катушку индуктивности с магнитопроводом, имеющую w витков провода с сопротивлением $R_к$ (Рис. 10.5, *а*). За счет тока i катушки в магнитопроводе будет формироваться магнитный поток Φ – как основной, и магнитный поток рассеяния, характеризуемый потокосцеплением $\Psi_{рас}$ (см. п. 1.3 данного пособия).

Потокосцепление рассеяния $\Psi_{рас}$ зависит от конструкции катушки и, практически, не зависит от магнитопровода. Магнитные силовые линии потока рассеяния замыкаются, в основном, по воздуху и только частично проходят по магнитопроводу. В воздухе магнитная индукция $B = \mu_0 H$, где μ_0 - постоянная величина. Поэтому можно считать, что потокосцепление и ток будут связаны линейной зависимостью

$$\Psi_{рас} = L_{рас} i \,, \qquad (10.12)$$

где $L_{рас}$ – *индуктивность рассеяния* обмотки.

Потокосцепление основного магнитного потока равно $w\Phi$. Тогда полное потокосцепление для рассматриваемой катушки

$$\Psi = w\,\Phi + \Psi_{рас} \,. \qquad (10.13)$$

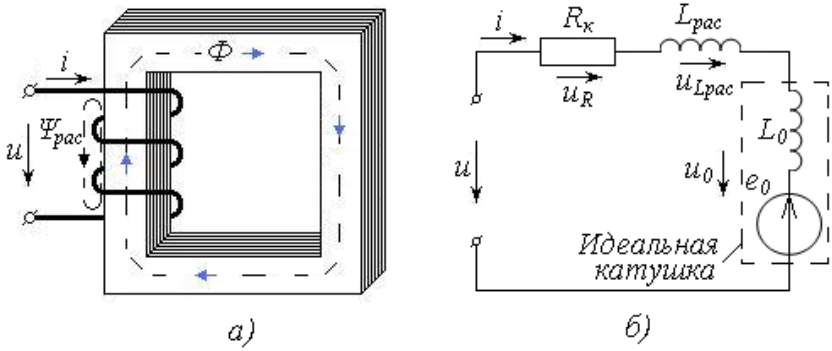


Рис. 10.5. Катушка индуктивности в цепи переменного тока:
а) катушка индуктивности с магнитопроводом;
б) схема замещения катушки с магнитопроводом.

С учетом активного сопротивления катушки $R_к$ и потокосцепления Ψ (10.13) напряжение u зажимами катушки

$$u = R_к\, i + \frac{d\psi}{dt} = R_к i + L_{рас}\frac{di}{dt} + w\frac{d\Phi}{dt} = u_R + u_{Lрас} + u_0. \quad (10.14)$$

Из (10.14) следует, что катушку с ферромагнитным сердечником можно представить в виде последовательно соединенных активного сопротивления $R_к$, индуктивного элемента $L_{рас}$ и *идеальной катушки индуктивности* с индуктивностью L_0 , которая не имеет индуктивности рассеяния (Рис. 10.5, *б*). Физически идеальную катушку индуктивности можно представить в виде катушки с ферромагнитным сердечником, заключенной в ферромагнитный экран, за пределы которого магнитное поле не проникает.

Для идеальной катушки индуктивности

$$u_0 = -e_0 = w\frac{d\Phi}{dt}. \quad (10.15)$$

Получим для идеальной катушки индуктивности закон изменения магнитного потока Φ. Пусть напряжение $u_0. = U_{0m}\, sin\, \omega t$. Подставив u_0 в (10.15) получим:

$$d\Phi = \frac{U_{0m}}{w} sin\, \omega t\, dt. \quad (10.16)$$

Проинтегрировав (10.16) получим закон изменения магнитного потока

$$\Phi = \frac{U_{0m}}{\omega w} sin\, (\omega t + \pi/2) + A.$$

Для переменного тока постоянная интегрирования $A = 0$. Тогда

$$\Phi = \frac{U_0\sqrt{2}}{\omega w} sin\, (\omega t + \pi/2), \quad (10.17)$$

где U_0 – действующее значение напряжения u_0 .

Амплитудное значение магнитного потока

$$\Phi_m = \frac{U_0}{4{,}44\, f\, w}. \qquad (10.18)$$

В выражении (10.18) f – циклическая частота. Сомножитель в знаменателе $4{,}44 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}}$.

Если задан магнитный поток Φ, то действующее значение напряжения u_0 можно найти как

$$U_0 = E_0 = 4{,}44\, f\, w\, \Phi_m\,. \qquad (10.18)$$

Выражение (10.18) удобно для расчета ЭДС, индуктируемых в обмотках трансформаторов и других электрических машин.

Схема замещения катушки индуктивности с магнитопроводом в цепи переменного тока, приведенная на рис. 10.2, *б,* не учитывает потерь энергии магнитного поля на перемагничивание материала магнитопровода.

Если воспользоваться законом Ома в комплесной форме и определить комплексное сопротивление идеализированной катушки, то получим:

$$\dot{Z} = \frac{\dot{U}_0}{\dot{I}} = R_\Gamma + jX_L, \qquad (10.19)$$

где R_Γ – активное сопротивление, учитывающее потери электрической энергии на гистерезис; $X_L = j\omega L_0$ – индуктивное сопротивление идеализированной катушки (Рис.10.6, *а*).

Воспользовавшись эквивалентной заменой последовательного соединения элементов параллельным, можно пользоваться вместо комплексного сопротивления идеализированной катушки (10.19) ее комплексной проводимостью (Рис.10.6, *б*):

$$\dot{G} = g_\Gamma - jb_L\ , \qquad (10.20)$$

где $g_Г = \dfrac{R_Г}{R_Г^2 + (\omega L_0)^2}$; $b_L = \dfrac{\omega L_0}{R_Г^2 + (\omega L_0)^2}$.

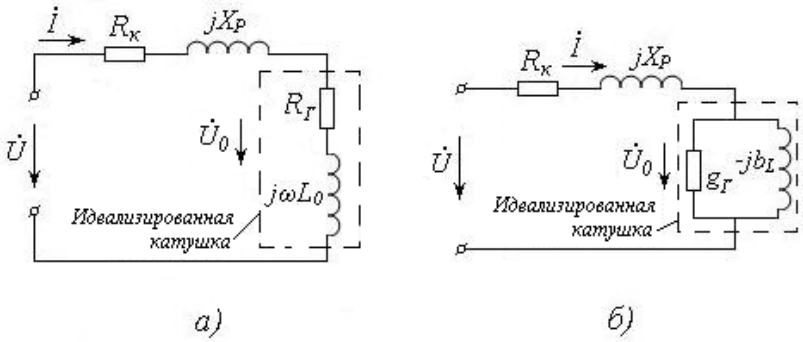


Рис.10.6. Схемы замещения катушки индуктивности с магнитопроводом.

Контрольные вопросы

1. Что такое магнитная цепь?
2. Какими отличительными свойствами обладают ферромагнитные материалы?
3. Как связаны между собой магнитная индукция *B* и напряженность магнитного поля *H* в ферромагнитном материале?
4. Сформулируйте закон полного тока для магнитной цепи.
5. Что такое магнитодвижущая сила (МДС) и в каких единицах она измеряется?
6. Как выглядит статическая петля гистерезиса и что она характеризует?
7. Сформулируйте законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей.
8. Магнитно-твердые и магнитно-мягкие материалы, чем они отличаются?
9. Какую катушку индуктивности называют идеальной?
10. Изобразите и поясните схему замещения катушки индуктивности с магнитопроводом.

11. ТРАНСФОРМАТОРЫ

11.1. Общие сведения о трансформаторах

Трансформатором называется электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования (трансформации) одного напряжения в другое напряжение той же частоты. Трансформаторы используют для получения различных уровней напряжения на производстве и в быту, а также в системах передачи и распределения электроэнергии. Их применение обеспечивает экономичную передачу электроэнергии к потребителям (передача ведется при повышенном напряжении, что позволяет уменьшить сечение проводов линий электропередач и потери мощности в них).

Трансформатор содержит две обмотки, или большее количество, и магнитопровод (Рис. 11.1). Обмотка, подключенная к источнику, называется *первичной*. Обмотка, к которой подключается нагрузка (на рис 11.1 сопротивление Z_H) является *вторичной*. Магнито-провод необходим в трансформаторе для усиления электромагнитной связи между обмотками. Для уменьшения вихревых токов в магнитопроводе и снижения потерь энергии на его нагрев, магнитопровод набирают из тонких листов электротехнической стали.

Существуют *однофазные* и *трехфазные* трансформаторы. Однофазные (Рис. 11.1) используются в однофазных сетях переменного тока. Трехфазные трансформаторы (Рис. 11.2) предназначены для работы в трехфазных сетях. Они содержат, как минимум, три пары обмоток, из которых три первичные и три вторичные. Для первичных обмоток используют обозначения в виде заглавных букв, как показано на рисунке 11.2. Вторичные обмотки обозначают прописными буквами.

Трансформаторы могут быть повышающими и понижающими. У *понижающего* трансформатора число витков первичной обмотки больше чем вторичной и напряжение первичной обмотки больше чем вторичной, то есть $w_1>w_2$ и $U_1>U_2$. Если $w_2>w_1$ и $U_2>U_1$, то такой трансформатор будет *повышающим*. Все трансформаторы, за счет отсутствия электрической связи между первичной и вторичной обмотками, не имеют электрического контакта вторичной обмотки с питающей сетью.

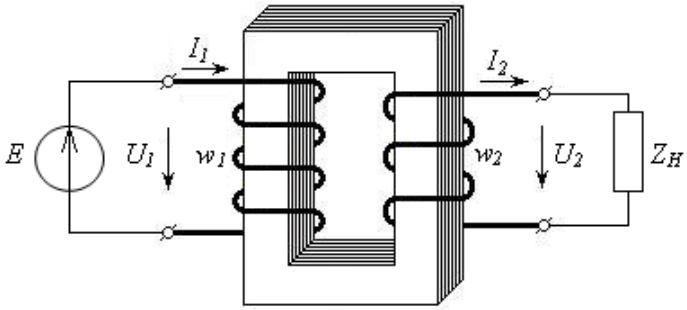


Рис. 11.1. Трансформатор.

По назначению трансформаторы делятся на: силовые, измерительные, специальные и автотрансформаторы. Условные графические изображения трансформаторов показаны на рис. 11.3.

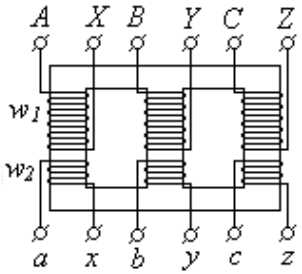


Рис. 11.2. Трехфазный трансформатор.

Силовые трансформаторы используются в составе электрических сетей при передаче электроэнергии на расстояние и при ее распределении между потребителями, а также в блоках питания различных промышленных и бытовых устройств.

Трансформатор называют силовым, если он служит непосредственно для питания приёмников электрической энергии (нагрузки) или для передачи электрической энергии на большие расстояния. Так, электрическую энергию с полной мощностью $S=UI$ от источника к потребителю можно передать при различных значениях напряжения и тока. Чем выше напряжение, тем меньше ток в линии электропередачи (ЛП), тем меньше потери в линии $\Delta P = R_Л I^2$. Кроме того, величина тока определяет сечение проводов ЛП, и чем меньше ток, тем меньшее можно выбрать сечение провода, что существенно может снизить вес проводов. Правда, при передаче электроэнергии высоким напряжением требуется высокопрочная изоляция и связанные с этим дополнительные затраты на изготовление высоких опор ЛП,

использование гирлянды изоляторов и др. Но экономически все-таки целесообразно передавать большие мощности на большие расстояния высоким напряжением.

Стандартные значения напряжения ЛП: 10, 35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ, которые создаются *повышающими* силовыми трансформаторами.

Потребители электроэнергии однофазного и трехфазного тока имеют следующую шкалу номинальных напряжений: 12, 24, 36, 127, 220, 380 В. Для получения этих напряжений используются *понижающие* силовые трансформаторы.

Измерительные трансформаторы используются для расширения пределов измерения электроизмерительных приборов и для электрического разделения цепи высшего напряжения от цепи низшего напряжения, где находятся приборы и аппараты управления, защиты. Этим самым обеспечивается безопасность обслуживающего персонала. Бывают измерительные *трансформаторы тока* и *трансформаторы напряжения*.

Специальные трансформаторы (разделительные, сварочные, вращающиеся и др.) предназначены для выполнения конкретных функций.

Сварочные трансформаторы выполняются понижающими и могут быть однофазными и трехфазными. Конструктивные особенности таких трансформаторов зависят от вида сварки (дуговая, точечная, шовная и так далее). Они могут иметь повышенный магнитный поток рассеяния.

Разделительные трансформаторы могут иметь первичную и вторичную обмотки с одинаковым числом витков, то есть не преобразуют одно напряжения в другое. Их функция - обеспечить более безопасное питание потребителей от вторичной обмотки, которая электрически изолирована от сети.

В устройствах автоматики трансформаторы могут использоваться для преобразования формы переменного напряжения (*импульсные* трансформаторы).

Автотрансформаторы, в отличие от обычных трансформаторов, имеют одну обмотку (Рис.11. 3, *в*). В автотрансформаторе питающая сеть электрически связана с сетью потребителя. Для безопасной эксплуатации устройств, питаемых от автотрансформатора это обстоятельство необходимо всегда учитывать.

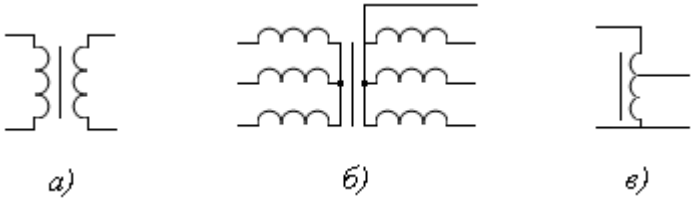


Рис.11.3. Условные графические изображения трансформаторов:
а) – однофазного; *б)* трехфазного; *в)* автотрансформатора.

11.2. Схема замещения однофазного трансформатора

Рассмотрим однофазный трансформатор, схема устройства которого приведена на рис.11.4. К первичной обмотке трансформатора, содержащей w_1 витков, подключен идеальный источник переменной ЭДС $e = E_m \sin \omega t$. Нагрузка Z_H подсоединена к вторичной обмотке, имеющей w_2 витков.

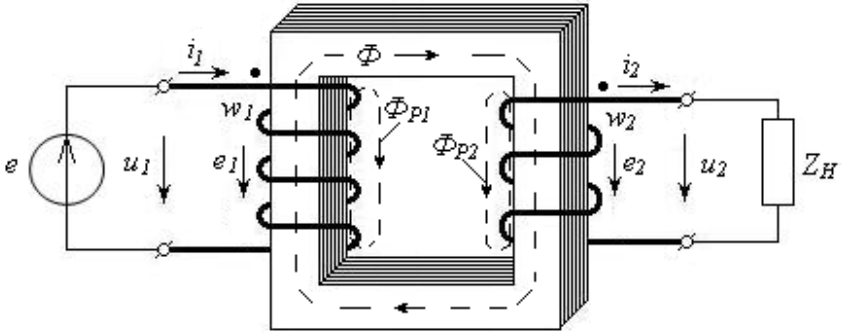


Рис.11.4. Однофазный трансформатор.

Здесь следует заметить, что при показанных на рисунке направлениях намотки катушек и направлениях токов i_1 и i_2 магнитные потоки этих катушек будут направлены встречно (убедиться можно используя правило буравчика). Если бы ток i_2 имел обратное направление по отношению к зажиму второй катушки, помеченному жирной точкой (как в первой катушке), то магнитные потоки катушек сложились бы. Помеченные зажимы называют *одноименными*. На схемах одноименные зажимы помечают.

За счет тока i_1 на входе трансформатора создается падение напряжения u_1 и формируется магнитный поток Φ, общий для пер-

вой и второй катушек и возникает магнитный поток рассеяния Φ_{P1}. Так как ЭДС e переменная, то ток i_1 и магнитный поток Φ также будут переменными. За счет изменения магнитного потока Φ в первичной и во вторичной обмотке трансформатора будут создаваться ЭДС (самоиндукции e_1 и взаимной индукции e_2):

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad \text{и} \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}. \qquad (11.1)$$

Положительные направления ЭДС e_1 и тока i_1 в первичной катушке совпадают. Однако учитывая знак «минус» в выражениях (11.1), физически представляется, что в первой катушке ЭДС препятствует изменению тока i_1, а во второй возбуждает ток i_2. За счет тока i_2 во вторичной катушке будет формироваться магнитный поток рассеяния Φ_{P2} и на нагрузке Z_H – напряжение u_2.

Для перехода к схеме замещения необходимо учитывать, что катушки обладают активными сопротивлениями R_1 и R_2 и индуктивными сопротивлениями рассеяния jX_{P1} и jX_{P2}. Потери на гистерезис и индуктивность, связанную с общим для обеих катушек магнитным потоком Φ можно учесть с помощью идеализированной катушки, обладающей активным сопротивлением R_Γ и индуктивным сопротивлением $j\omega L_0$ (Рис.10.6, *а*). Представив трансформатор как участок цепи, имеющий два входных и два выходных зажима (то есть четырехполюсник, см. п. 7.2 данного пособия), приходим к его Т-образной схеме замещения (Рис. 11.5).

При отсоединенной нагрузке ($Z_H = \infty$), для этой схемы будем иметь: $Z_{11}=(R_1+R_\Gamma)+j(X_{P1}+\omega L_0)$; $Z_{12}=Z_{21}= R_\Gamma+j\omega L_0$; $Z_{22}=(R_2+R_\Gamma)+$ $+j(X_{P2}+\omega L_0)$.

При $\dot{I}_2 = 0$ $\quad \dot{Z}_{11} = \dfrac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}$; $\dot{Z}_{21} = \dfrac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1}$.Комплексный коэффициент передачи трансформатора по напряжению от входа к выходу

$$\dot{K}_U = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{U_2}{U_1} e^{j(\psi_{U1}-\psi_{U2})} = K_U e^{j\varphi_U} .$$

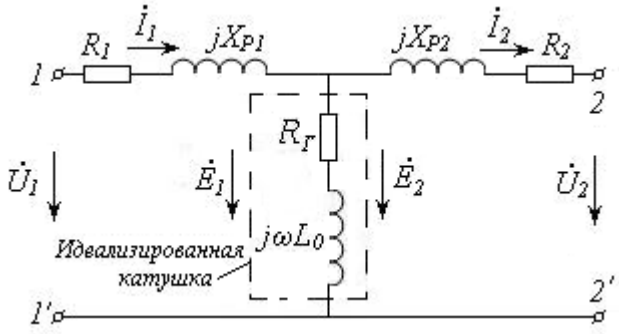


Рис.11.5. Схема замещения однофазного трансформатора.

Учитывая, что для *ненагруженного трансформатора* $\dot{U}_1 \approx \dot{E}_1$ а $\dot{U}_2 \approx \dot{E}_2$, то $\dot{K}_U \approx \dot{E}_2 / \dot{E}_1$. На основании (11.1) и без учета фаз получим, что коэффициент передачи по напряжению трансформатора:

$$K_U = \frac{U_2}{U_1} = \frac{w_2}{w_1} = n_{21}. \qquad (11.2)$$

Можно также показать, что для токов $I_1/I_2 \approx n_{21}$.
Величину n_{21} или просто $n = U_2/U_1 = w_2/w_1$ называют *коэффициентом трансформации по напряжению*. Соотношение (11.2) справедливо для ненагруженного трансформатора.

Если трансформатор имеет несколько вторичных обмоток, то соотношение (11.2) будет применимым для каждой из них. Например, у силового трансформатора, рассчитанного на напряжение сети U_1=220В число витков первичной обмотки w_1 = 330. Трансформатор содержит две вторичные обмотки с количеством витков w_2=36 и w_3=18. Для данного трансформатора первый коэффициент трансформации $n_1 \approx$ 0,11 и второй 0,055. Выходные напряжения: $U_{ВЫХ1}$= 0,11·220 ≈ 24В; $U_{ВЫХ2}$= 0,055·220 ≈ 12В.

Можно также соединив последовательно выходные обмотки получить и третье напряжение $U_{ВЫХ3}$= $U_{ВЫХ1}$ + $U_{ВЫХ2}$ = 24 + 12 = 36В. Однако здесь необходимо обеспечить согласное включение этих обмоток. При встречном включении получим разность выходных напряжений, что используется редко.

11.3.Режимы работы трансформаторов

Важнейшей энергетической характеристикой трансформатора является его номинальная полная мощность, подводимая к первичной обмотке

$$S_{НОМ} = U_{1НОМ} I_{1НОМ} . \qquad (11.3)$$

Различают четыре основные режимы работы трансформатора: номинальный режим; рабочий режим; режим холостого хода; режим короткого замыкания. Рассмотрим эти режимы.

Номинальный режим

В этом режиме, когда в первичной обмотке напряжение $U_1 = U_{1НОМ}$ и ток $I_1 = I_{1НОМ}$ обеспечиваются все технические характеристики трансформатора.

Рабочий режим

При данном режиме напряжение первичной обмотки близко к его номинальному значению или равно ему ($U_1 \approx U_{1НОМ}$), а ток в первичной обмотке меньше или равен номинальному ($I_1 \leq I_{1НОМ}$) и зависит от сопротивления нагрузки во вторичной обмотке, то есть $I_1 = f(I_2)$.

Режим холостого хода

Это режим, когда трансформатор ненагружен, то есть $I_2=0$. Он имеет значение при испытании трансформатора, когда проводится *опыт холостого хода*. При этом должны выполняться условия: $U_1 = U_{1НОМ}$; $I_2 = 0$. В ходе опыта по показаниям приборов (вольтметра, ваттметра и амперметра) определяют напряжение U_{2X} , ток I_{1X} и активную мощность в первичной обмотке P_{1X}. По этим данным находят коэффициент трансформации $n = U_{2X} / U_{1\ НОМ}$ и мощность потерь в магнитопроводе, которая примерно равна P_{1X}.

Ток холостого хода I_{1X} будет содержать активную и реактивную составляющие. Активная составляющая определяется, в основном, потерями в магнитопроводе на гистерезис и на вихревые токи. Потери на активном сопротивлении провода первичной обмотки хотя и будут иметь место, но они незначительны и, для трансформаторов с $S_{НОМ} \geq 1000ВА$, практически не учитываются.

Режим короткого замыкания

Если номинальный режим, рабочий режим и режим холостого хода могут иметь место в условиях эксплуатации трансформатора, то в этих условиях режим короткого замыкания является аварийным режимом и его избегают. При испытании трансформатора *опыт короткого замыкания* осуществляют при $Z_H = 0$ и пониженном напряжении $U_1 << U_{1НОМ}$. При этом, изменяя U_1, устанавливают ток в первичной обмотке $I_{1КЗ} \approx I_{1НОМ}$. После этого измеряют напряжение короткого замыкания $U_{1КЗ}$ и активную мощность потерь в обмотках трансформатора $P_{1КЗ} = R_1 I_{1КЗ}^2 + R_2 I_{2КЗ}^2$. Она определяется с помощью ваттметра.

По мощности потерь $P_{1КЗ}$ и при $I_{1КЗ} = I_{1НОМ}$ определяют *активное сопротивление короткого замыкания* трансформатора:

$$R_{КЗ} = \frac{P_{1КЗ}}{I_{1КЗ}^2}. \qquad (11.4)$$

Активное сопротивление короткого замыкания позволяет определять потери энергии в обмотках и учитывается при расчете температурного режима трансформатора.

Напряжение короткого замыкания $U_{1КЗ}$ также является важным параметром трансформатора, позволяющим определять изменения вторичного напряжения в рабочем режиме трансформатора. Значение $U_{1КЗ}$ указывают на щитке трансформатора.

Внешняя характеристика трансформатора

Внешняя характеристика трансформатора определяет зависимость вторичного напряжения U_2 от тока нагрузки $I_2 = I_1/n_{21}$ при номинальном входном напряжении $U_1 = U_{1НОМ}$ и постоянном коэффициенте мощности нагрузки $\varphi_2 = const$.

Аналитическое выражение для внешней характеристики трансформатора имеет вид:

$$\frac{U_2}{U_{2НОМ}} = 1 - k_3 \frac{I_{1НОМ}}{U_{1НОМ}} (R_{КЗ} \cos\varphi_2 + X_{КЗ} \sin\varphi_2), \qquad (11.5)$$

где $k_3 = I_2/I_{2НОМ}$ - коэффициент загрузки трансформатора; $I_{2НОМ}$ – ток нагрузки при номинальном первичном токе $I_1 = I_{1НОМ}$; $U_{2НОМ} = n_{21}U_{1НОМ}$; $X_{КЗ}$ – индуктивное сопротивление короткого замыкания.

Из (11.5) следует, что при φ_2=*const* и возрастании k_3 зависимость $U_2/U_{2НОМ}$ будет убывать.

Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициентом полезного действия трансформатора (КПД) называется отношение выходной активной мощности P_2 трансформатора к входной активной мощности P_1

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \text{ или } \eta_{\%} = \frac{P_2}{P_1}100\%. \qquad (11.6)$$

КПД трансформатора зависит от режима его работы. При номинальном режиме и коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi_2 > 0{,}8$ для мощных трансформаторов $\eta \geq 99\%$. Аналитическое выражение КПД, учитывающее конструктивные особенности и режим работы трансформатора имеет вид:

$$\eta_{\%} = \left(1 - \frac{k_3^2 P_{КЗНОМ} + P_C}{k_3 S_{НОМ}\cos\varphi_2 + k_3^2 P_{КЗНОМ} + P_C}\right)100\%, \qquad (11.7)$$

где $P_{КЗ\ НОМ}$ – мощность потерь в проводах обмоток при номинальных токах; P_C - мощность потерь в магнитопроводе на гистерезис и на вихревые токи; $k_3 = I_2/I_{2НОМ}$ - коэффициент загрузки трансформатора; $\cos\varphi_2$ - коэффициент мощности нагрузки.

Исследовав функцию $\eta = f(k_3)$ на экстремум, получим $\eta=\eta_{МАКС}$ при $\cos\varphi_2$=*const* и $P_C = P_{КЗ\ НОМ}$, что будет соответствовать значению $k_3 = 1$. Однако при проектировании трансформаторов учитывается, что в номинальном режиме трансформаторы работают редко. По этой причине выбирают отношение P_C / $P_{КЗ\ НОМ}$ = 0.25…0.5, что обеспечивает максимум КПД при k_3 = 0.5…0.7.

Контрольные вопросы

1. Для какой цели на электрических станциях в начале линии электропередач устанавливают повышающие трансформаторы.
2. Какие параметры трансформатора изменятся, если убрать магнитопровод? В частности, изменится-ли магнитный поток?

3. Как практически можно определить коэффициент трансформации трансформатора если число витков первичной и вторичной обмоток неизвестно?
4. Как изменится ток во вторичной обмотке трансформатора, если уменьшить число витков первичной обмотки?
5. Как можно определить начало и конец вторичных обмоток трехфазного трансформатора с помощью вольтметра, если известна маркировка одной из них?
6. Как следует соединить три вторичные обмотки однофазного трансформатора, чтобы получить на его выходе наибольшее однофазное напряжение?
7. Какие режимы работы трансформатора Вы знаете?
8. Для чего проводится опыт холостого хода?
9. Как и зачем проводят опыт короткого замыкания трансформатора?
10. Что называется коэффициентом полезного действия трансформатора и от чего он зависит?

12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

12.1. Устройство и принцип действия машины постоянного тока

Электрические машины постоянного тока применяются в различных областях техники. Существуют генераторы постоянного тока и двигатели постоянного тока. Генераторы постоянного тока входят в состав систем электропитания специального оборудования, например в качестве источников постоянного тока возбуждения в генераторах переменного тока, при зарядке аккумуляторов, для питания электролитических ванн, в качестве сварочных генераторов, и так далее. Электрические машины постоянного тока малой мощности применяются в системах автоматического регулирования как для привода исполнительных механизмов, так и в качестве датчиков частоты вращения подвижных частей регулируемых систем.

Основное достоинство двигателей постоянного тока заключается в возможности плавного регулирования частоты вращения и получения больших пусковых моментов, что очень важно для тяговых двигателей на электрическом транспорте, а также для привода

различного технологического оборудования. Недостатком двигателей постоянного тока является необходимость предварительного преобразования для них переменного тока в постоянный ток.

Машина постоянного тока (генератор, двигатель) состоит из двух основных частей (Рис. 12.1): неподвижного *статора*, выполненного в виде электромагнита или постоянного магнита, создающего основное магнитное поле машины; *якоря* – вращающейся части машины, в обмотках которой возникает ЭДС.

Статор состоит из станины и главных полюсов. Обмотка возбуждения 1 расположена на сердечниках *2* главных (основных) полюсов, закрепленных на станине 3. Полюс заканчивается полюсным наконечником 4, распределяющим магнитный поток в воздушном зазоре 6. На обмотку возбуждения подают постоянное напряжение, вызывающее ток возбуждения I_B. Возникающий магнитный поток идет через сердечник северного полюса *N*, воздушный зазор, сердечник якоря, воздушный зазор к сердечнику южного полюса *S* и через ярмо статора (станину) возвращается к северному полюсу.

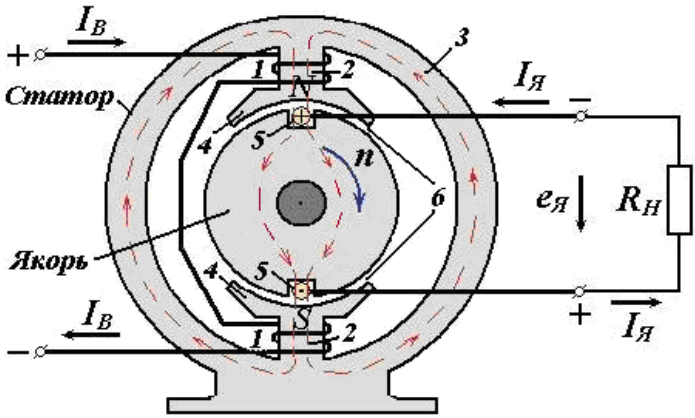


Рис. 12.1. Машина постоянного тока:

1 - обмотка возбуждения; 2 - полюсы; 3 – станина (ярмо); 4 - полюсный наконечник; 5 - проводники якорной обмотки; 6 - воздушный зазор машины.

Вращающаяся часть машины - якорь состоит из сердечника якоря, обмотки якоря 5, коллектора. Сердечник якоря набирают из тонких пластин электротехнической стали толщиной, обычно, не более 0,5 мм (для уменьшения потерь на вихревые токи). В пазах сердечника уложены проводники обмотки якоря.

Коллектор - это полый цилиндр, набранный из отдельных медных пластин (ламелей), изолированных друг от друга и от вала (Рис. 12.2). К пластинам коллектора припаяны проводники обмотки якоря. По пластинам коллектора скользят медно-графитовые щетки, закрепленные в щеткодержателях.

Машина постоянного тока может работать в двух режимах – в генераторном и в двигательном. Рассмотрим *генераторный* режим. При вращении якоря проводники якорной обмотки пересекают магнитные силовые линии и в них, по закону электромагнитной индукции, наводится ЭДС $e_я$ (Рис. 12.1). Направление ЭДС определяется по правилу правой руки. На рисунке, для упрощения, показаны только два проводника якорной обмотки. Несложно представить, что если якорь повернется на угол 180 градусов, токи в проводниках поменяют направление. По существу в одном витке якорной обмотки при вращении якоря будет индуктироваться переменная ЭДС. Коллектор играет роль механического переключателя. Он переключает витки обмотки якоря в процессе его вращения по отношению к нагрузке таким образом, что на неподвижных щетках формируется напряжение одного знака.

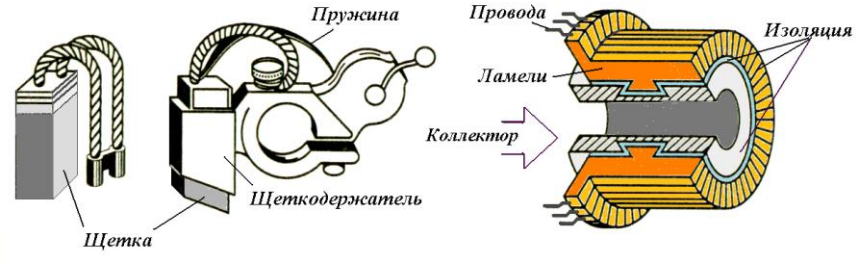


Рис. 12.2. Элементы узла коллектора машины постоянного тока.

Если якорь вращать за счет некоторого внешнего источника механической энергии, то в каждом проводнике его обмотки будет индуктироваться ЭДС

$$e_K = -\frac{d\Phi}{dt} = B\,l\,v, \qquad (12.1)$$

где Φ – магнитный поток; B – магнитная индукция; l – активная длина проводника; v – окружная (линейная) скорость движения проводника относительно магнитного поля статора.

Режим *двигателя* получим подав на якорь напряжение (Рис. 12.3). При этом, для создания магнитного поля статора, необходимо подать напряжение питания на обмотку возбуждения статора. На каждый проводник якорной обмотки будит действовать сила

$$F = B\,I_Я\,l\,. \qquad (12.2)$$

Направление действия этой силы можно определить по правилу левой руки. При указанных на рис.12.3 направлениях тока якоря I и тока возбуждения I_B действие сил взаимодействия проводниковс током якорной обмотки с магнитным полем статора вызовет вращение якоря против часовой стрелки. Однако при вращении якоря, согласно закону электромагнитной индукции, в проводниках его обмотки будет возникать ЭДС (см. выражение 12.1), направленная противоположно току $I_Я$. В этом легко убедиться, воспользовавшись правилом правой руки. Приложенное напряжение U уравновешивает эту ЭДС и падение напряжения на сопротивлении обмоток якоря.

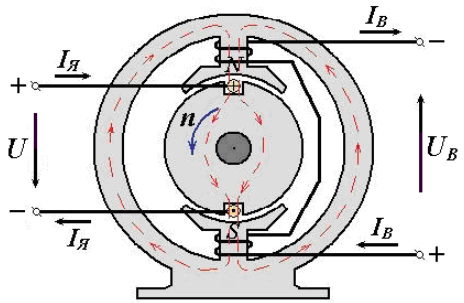


Рис. 12.3. Двигатель постоянного тока.

Свойство электрических машин работать как в генераторном так и в двигательном режимах называется *обратимостью.* Оно характерно для всех электрических машин. Общим недостатком электрических машин постоянного тока является сложность их конструкции, связанная главным образом со щеточно-коллекторным аппаратом. Кроме того, в коллекторно-щеточном аппарате, осуществляющем

постоянное переключение цепей электрической машины, возникает искрение. Это снижает надежность машин и ограничивает область их применения.

12.2. ЭДС, вращающий момент и реакция якоря

Если частота вращения якоря n об/мин, D – диаметр якоря (м) то, входящая в формулу (12.1) окружная скорость движения проводника относительно магнитного поля статора $v = n\pi D/60$ м/с. Однако полюсные наконечники статора не полностью охватывают окружность якоря, равную πD (Рис. 12.1). Если дуга охвата одного полюсного наконечника равна τ, то окружная скорость $v = n\tau 2p/60$ м/с, где p – число пар полюсов магнитной системы статора. Произведение $l\tau$ равно площади одного полюсного наконечника. С учетом приведенных уточнений выражение (12.1) примет вид: $e_K = Bl\tau\dfrac{2p}{60}n$. Необходимо также учесть, что обмотка ротора содержит N проводников. Щетки делят всю обмотку якоря на $2a$ параллельных ветвей. Произведение $Bl\tau = \Phi$. Тогда генерируемая ЭДС

$$E_Я = \sum_{K=1}^{N} e_K = Ne_K = N\frac{n\,p}{60a}\Phi = C_E\Phi n, \qquad (12.3)$$

где $C_E = \dfrac{N}{60}\dfrac{p}{a}$ - постоянный для данной машины коэффициент.

При работе электрической машины в режиме двигателя взаимодействие тока якоря с главным магнитным полем создает электромагнитный (механический) вращающий момент M_{BP}. Учитывая, что сила, действующая на отдельный проводник с током I обмотки якоря согласно (12.2) определяется как $F_K = B\ I\ l$, то вращающий момент якоря будет складываться из частных моментов всех N активных проводников обмотки, $M_K = F_K\,D/2$ (D – диаметр якоря) или $M_K = B\ I\ \ l\ D/2$. Приняв $\pi\ D \approx 2p\tau$ можно записать, что $D/2 = p\tau\ /\ \pi$. Тогда $M_{BP} = N\ M_K = B\ I\ \ l\ p\tau\ /\ \pi$. Учитывая, что $l\ \tau$ – площадь одного полюсного наконечника а в двигателе их имеется $2p$, то произведение $B\ l\ p\ \tau = \Phi/2$. Кроме того $2a\ I = I_Я$, так как количество парал-

лельных ветвей обмотки якоря равно *2a*, то есть $I_Я$ - общий ток якоря. Значит вращающий момент двигателя

$$M_{BP} = \frac{N}{2\pi} \Phi \frac{p}{2} I_Я = C_M \Phi I_Я, \qquad (12.4)$$

где $C_M = \frac{N}{2\pi} \cdot \frac{p}{2} = C_E \frac{60}{2\pi}$ - коэффициент, постоянный для данной машины.

При холостом ходе в обмотке якоря тока нет, машина имеет только основной магнитный поток от обмотки возбуждения. При нагрузке ток якоря также создает магнитное поле(Рис. 12.4, *а*). Магнитные силовые линии замыкаются вокруг проводников обмотки через сталь якоря и полюсов**.** При вращении якоря направление токов в проводниках между щетками не изменяется и поле якоря оказывается неподвижным относительно щеток и полюсов возбуждения. Сам якорь становится электромагнитом. Линия $N_Я$ - $S_Я$ совпадает с физической нейтралью (линия *n* - *n′* на рис. 12.4, *а*), где индукция магнитного потока статора равна нулю. Именно на этой линии в машинах постоянного тока устанавливают щетки коллектора.

Магнитный поток якоря накладывается на основной магнитный поток. В результате наложения магнитных потоков, статора - Φ_C и якоря – $\Phi_Я$, создается суммарный магнитный поток Φ_Σ (Рис. 12.4, *б*). Физическая нейтраль смещается на некоторый угол и занимает новое положение (на рис. 12.4, *а* линия *m* - *m′*). У генераторов она смещается в направлении вращения якоря, у двигателей - против направления вращения якоря. Величина угла смещения нейтрали зависит от нагрузки.

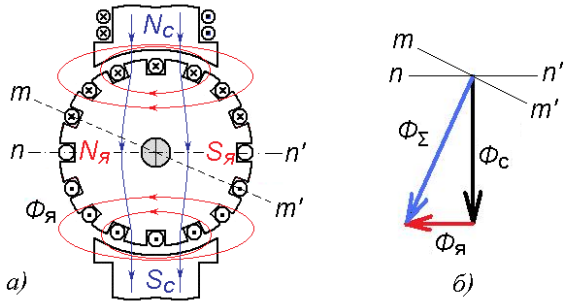


Рис. 12.4. Реакция якоря.

Влияние тока якоря на основной магнитный поток называют *реакцией якоря*. Реакция якоря нарушает симметрию магнитного поля в воздушном зазоре и уменьшает магнитный поток. Вследствие этого в генераторе уменьшается ЭДС (напряжение на щетках). В двигателе уменьшается электромагнитный момент и изменяется частота вращения.

Для ослабления реакции якоря увеличивают воздушный зазор между якорем и полюсами. В машинах большой мощности применяют специальную компенсационную обмотку. Ее закладывают в пазы в полюсных наконечниках и включают последовательно с якорем. Магнитный поток компенсационной обмотки равен потоку якоря в зоне полюсов и направлен ему навстречу.

В современных машинах постоянного тока также используют дополнительные полюса, которые устанавливаются на станине по линии геометрической нейтрали. Обмотки этих полюсов соединяются через щетки коллектора последовательно с обмоткой якоря так, чтобы создаваемый ими магнитный поток был направлен навстречу магнитному потоку якоря и компенсировал бы его.

12.3. Электрические двигатели постоянного тока и их характеристики

Двигатели постоянного тока используются в приводах, требующих изменения частоты вращения. Они имеют большой пусковой момент и могут быть выполнены практически на любую частоту вращения. Их достоинство - экономичное и плавное регулирование скорости вращения. Недостатки двигателя связаны с наличием

коллектора. Искрение разрушает коллектор и создает радиопомехи. Непостоянство щеточного контакта приводит к нестабильности характеристик двигателя. Щеточная пыль загрязняет машину, за ней нужен систематический уход.

Характеристики двигателя - механическая $n=f(M_{ВР})$ и рабочие: $M_{ВР}= f(P_{ВЫХ})$; $n=f(P_{ВЫХ})$; $\eta = f(P_{ВЫХ})$; $I_П = f(P_{ВЫХ})$,где $P_{ВЫХ}$ – выходная механическая мощность двигателя; η - коэффициент полезного действия двигателя; $I_П$ – ток, потребляемый двигателем. Все названные характеристики зависят от способа возбуждения: параллельного, последовательного или смешанного.

Двигатель с параллельным возбуждением

На рис. 12.5 показана схема включения двигателя с параллельным возбуждением с пусковым $R_П$ и регулировочным $R_Ш$ реостатами. Пусковой реостат необходим для ограничения тока якоря $I_Я$ при пуске двигателя. Пока двигатель не набрал большие обороты ЭДС якоря $E_Я$, противодействующая току якоря еще мала, и ток $I_Я$ может иметь очень большую величину. При пуске величину пускового реостата $R_П$ выбирают максимальной. Регулировочный реостат $R_Ш$ при пуске наоборот выводят, что обеспечивает получение максимальных значений ЭДС якоря $E_Я$ и пускового момента $M_{ВР}$.

Основной характеристикой двигателя является *механическая характеристика*, выражение для которой можно получить использовав соотношения (12.3) и (12.4).

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - M_{BP} \frac{R_Я}{C_E C_M \Phi^2}. \qquad (12.5)$$

В выражении (12.5) $R_Я$ – сопротивление обмотки якоря; U – питающее напряжение; Φ – главный магнитный поток возбуждения. При неизменном магнитном потоке Φ, согласно (12.5), механическая характеристика двигателя с параллельным возбуждением графически будет представлять прямую линию, наклоненную в сторону оси абсцисс. Такую механическую характеристику

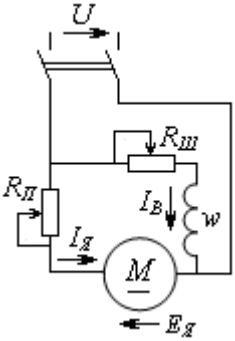


Рис. 12.5. Схема включения двигателя с параллельным возбуждением.

называют *естественной*.

Если в цепь якоря включено активное сопротивление $R_П > 0$, то получим *искусственную* механическую характеристику. При неизменном моменте $M_{ВР}$ на валу двигателя путем изменения сопротивления $R_П$ можно регулировать обороты n двигателя. Однако, учитывая большую величину тока якоря, такое регулирование будет неэкономичным.

Учитывая, что ток возбуждения намного меньше тока якоря ($I_В \leq 0{,}03 I_Я$), то регулирование частоты вращения двигателя за счет изменения магнитного потока Ф путем изменения тока $I_В$ с помощью резистора $R_Ш$ экономически более выгодно.

На рис. 12.6 приведена универсальная характеристика для машины постоянного тока с параллельным возбуждением. Она характеризует режимы работы машины в зависимости от момента $M_{ВР}$ на валу двигателя. При отрицательном моменте, который может создаваться внешним приводным двигателем и скорости вращения якоря превосходящей частоту вращения холостого хода n_0, машина будет работать в режиме генератора и будет отдавать энергию во внешнюю сеть. Если двигатель нагрузить тормозящим вращение ротора моментом, то двигатель будет вращаться с частотой

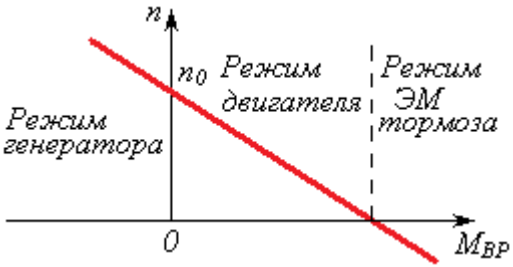


Рис. 12.6. Универсальная характеристика машины постоянного тока.

$n < n_0$ и отдавать механическую энергию с некоторой мощностью $P_{ВЫХ}$. Если же приложить к валу двигателя достаточно большой тормозной момент, то двигатель остановится. А если тормозной момент активный, создаваемый, например,

едущим под уклон троллейбусом или опускающимся большим грузом, то машина из режима двигателя перейдет в режим *электромагнитного(ЭМ) тормоза*. При этом ток якоря

$$I_Я = (U + E_Я)/(R_Я + R_Н), \qquad (12.6)$$

где $R_Н$ – нагрузочный реостат, который нужно подключить для ограничения тока якоря.

Если в процессе торможения двигатель отключить от сети, получим *динамическое торможение*. Тогда ток якоря

$$I_Я = E_Я /(R_Я + R_Н), \qquad (12.7)$$

Режим динамического торможения используется для быстрой остановки электропривода.

Двигатель с последовательным возбуждением

У двигателя с последовательным возбуждением обмотки якоря и возбуждения включены последовательно (Рис. 12.7) и ток якоря равен току возбуждения. При таком соединении главный магнитный поток $Ф$ машины пропорционален току якоря $I_Я$. Для двигателя с последовательным возбуждением также необходим пусковой реостат $R_П$. Выражение для механической характеристики двигателя с последовательным возбуждением можно получить использовав соотношения (12.3) и (12.4).

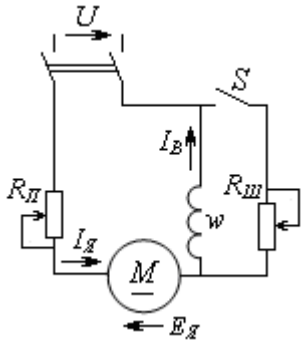


Рис. 12.7. Двигатель с последовательным возбуждением.

$$n = \frac{U - (R_Я + R_В)\, I_Я^2}{C_E Ф}, \qquad (12.8)$$

где $R_Я$ и $R_В$ – сопротивления обмоток якоря и возбуждения; коэффициент $C_E = N\ p\ /\ 60\ a$ (см. соотношение 12.3).

Уравнение вращающего момента

$$M_{BP} = C_M w I_Я^2 / R_M , \qquad (12.9)$$

где $R_M = I_Я w/Ф$ – магнитное сопротивление машины. Из (12.9) следует, что при ненасыщенном магнитопроводе вращающий момент увеличивается пропорционально квадрату тока двигателя. Частота вращения n будет убывать обратно пропорционально току. Механическая характеристика $n=f(M_{BP})$ приведена на рис. 12.8.

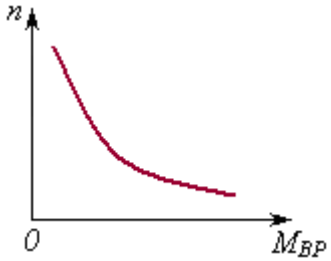


Рис. 12.8. Механическая характеристика двигателя с последовательным возбуждением.

При увеличении нагрузки на вал двигателя ток двигателя $I_Я = I_B$ растет относительно медленно. Обратно пропорционально току уменьшается частота вращения n. Благодаря этому двигатель с последовательным возбуждением способен выдерживать значительные перегрузки при умеренном увеличении потребляемого тока. Однако при существенном снижении нагрузки на валу и не очень болшом снижении потребляемого тока, частота вращения якоря сильно возрастает до опасных значений. Двигатель «идет в разнос». Поэтому двигатель с последовательным возбуждением нельзя запускать ненагруженным или с малой нагрузкой.

Регулировать обороты двигателя можно путем изменения напряжения питания или с помощью реостата $R_П$, уменьшая или увеличивая ток двигателя. Можно также шунтировать обмотку возбуждения реостатом $R_Ш$. При шунтировании обмотки возбуждения уменьшается магнитный поток $Ф$ и возрастает частота вращения n. одновременно увеличивается ток двигателя.

Благодаря высокой перегрузочной способности и хорошей регулируемости двигатели с последовательным возбуждением широко используются на транспорте и в подъемных механизмах, где есть источники постоянного тока.

Двигатель со смешанным возбуждением

В ряде случаев необходимо иметь двигатель постоянного тока, обладающий свойствами машин с параллельным и с последовательным возбуждением. Схема включения обмоток такого двигателя приведена на рис. 12. 9, *а)*. Обычно обе обмотки возбуждения включаются согласно, чтобы их магнитные потоки складывались. Одна из обмоток играет роль основной, формирующей в номинальном режиме не менее 70% основного магнитного потока.

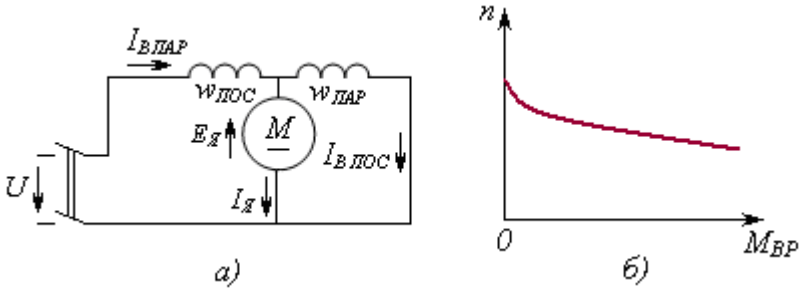


Рис. 12.9. Двигатель со смешанным возбуждением:
а) – схема соединения обмоток; *б)* – механическая характеристика.

В двигателе с *последовательно-параллельным возбуждением* преобладает последовательное возбуждение. Однако наличие параллельной обмотки возбуждения при уменьшении нагрузки на валу двигателя ограничивает нарастание частоты вращения *n*. В двигателе *с параллельно-последовательным возбуждением* за счет последовательной обмотки стабилизируется основной магнитный поток и облегчаются условия пуска и регулирования частоты вращения.

12.4. Генераторы постоянного тока и их характеристики

В зависимости от того, откуда к обмотке возбуждения генератора подводится напряжение, различают генераторы с независимым возбуждением и генераторы с самовозбуждением.

На рис.12.10, *а)* приведена схема *генератора с независимым возбуждением*. Обмотка возбуждения питается напряжением U_B постороннего источника. Ток возбуждения I_B можно регулировать

реостатом R_P . При этом ЭДС якоря $E_Я = C_E n \Phi$ будет изменяться в широких пределах.

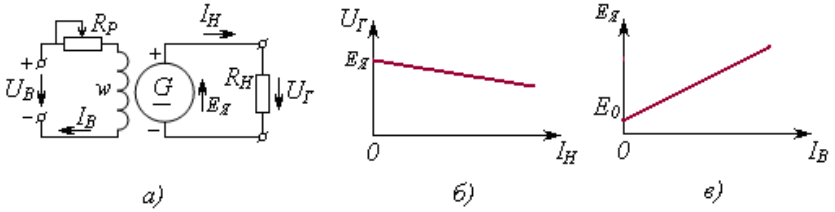


Рис.12.10. Генератор с независимым возбуждением:
а) схема генератора; *б)* внешняя характеристика;
в) характеристика холостого хода.

Внешняя характеристика генератора с независимым возбуждением $U_Г = f(I_H)$ приведена на рис.12.10, *б)* и выражается аналитически как

$$U_Г = E_Я - R_Я I_H. \qquad (12.10)$$

Наклон характеристики объясняется падением напряжения на сопротивлении обмотки якоря $R_Я$.

Характеристика холостого хода (рис.12.10, *в*) выражает зависимость $E_Я = f(I_B)$. Ее получают из опыта холостого хода, когда при постоянной частоте вращения ротора и отключенной нагрузке ($I_H=0$) изменяют ток возбуждения I_B. Значение $E_Я = E_0$ при нулевом токе возбуждения объясняется остаточного магнитного потока в сердечниках полюсов.

В *генераторах с самовозбуждением* обмотка возбуждения подключается к обмотке якоря. В зависимости от способа подключения, параллельного или последовательного, различают генераторы с параллельным возбуждением и генераторы с последовательным возбуждением.

На рис. 12.11, *а* приведена схема генератора с *параллельным возбуждением*. Обмотка возбуждения подключена параллельно с якорем. Ток возбуждения можно регулировать реостатом R_P . Величина тока возбуждения не превышает 3% тока якоря, поэтому можно считать $I_H \approx I_Я$. Внешняя характеристика (Рис. 12.11, *б*) имеет

больший наклон чем у генератора с независимым возбуждением. Это объясняется тем, что при уменьшении напряжения $U_Г$ вследствие его падения на сопротивлении $R_Я$, уменьшается и ток возбуждения.

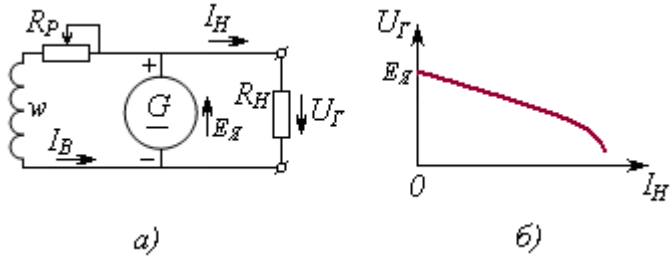


Рис. 12.11. Генератора с параллельным возбуждением:
а) схема генератора; *б)* внешняя характеристика.

Характеристика холостого хода генератора с параллельным возбуждением не отличается от характеристики генератора с внешним возбуждением.

Генераторы с последовательным возбуждением, у которых обмотка возбуждения соединена последовательно с обмоткой якоря, отличаются тем, что они возбуждаются только при подключенной нагрузке. При холостом ходе выходное напряжение $U_Г$ равно остаточной ЭДС E_0. Такие генераторы используются редко.

Генераторы со смешанным возбуждением содержат на каждом из полюсов по две обмотки возбуждения – параллельную и последовательную. Благодаря параллельной обмотке такой генератор способен самовозбуждаться и при холостом ходе. За счет подмагничивающего действия последовательной обмотки внешняя характеристика при согласном включении обмоток возбуждения практически не будет иметь наклона. Выходное напряжение, в пределах изменения нагрузки от нуля до номинальной, будет оставаться практически неизменным.

Встречное включение параллельной и последовательной обмоток используется в сварочных генераторах, где необходимо получить круто падающую характеристику и ограничить ток короткого замыкания.

Контрольные вопросы

1. Как устроена машина постоянного тока?
2. Как устроен и из каких элементов состоит коллектор?
3. Каким выражением для машин постоянного тока определяется генерируемая ЭДС (вращающий момент)?
4. Что понимают под реакцией якоря и какими способами снижают ее влияние ?
5. Какие элементы содержит схема включения двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением?
6. Какой вид имеет универсальная механическая характеристика машины постоянного тока?
7. Какова схема включения в сеть двигателя с последовательным возбуждением и как выглядит его механическая характеристика?
8. Охарактеризуйте различные типы двигателей постоянного тока.
9. Как устроен генератор с независимым возбуждением, и какой вид имеют его внешняя характеристика и характеристика холостого хода.
10. Изобразите схемы генераторов постоянного тока с самовозбуждением и охарактеризуйте их.

13. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ

13.1. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя

Асинхронные двигатели наиболее распространены в электроприводах различных механизмов благодаря своей простоте и надежности. Более 60 % всей вырабатываемой в мире электрической энергии преобразуется в механическую, в основном, с помощью асинхронных двигателей. Созданы они были более 100 лет

назад русским ученым М.О. Доливо-Добровольским. Мощность двигателей колеблется от десятков ватт до сотен киловатт.

Асинхронные двигатели изготавливаются в однофазном, двухфазном и трехфазном исполнении.

Конструктивно асинхронный двигатель состоит из статора и ротора (Рис.13.1). *Статор* представляет собой литой корпус (стальной, алюминиевый или чугунный) цилиндрической формы. Внутри корпуса располагается магнитопровод, в пазы которого укладываются статорные обмотки. Магнитопровод набирается из тонких пластин электротехнической стали, изолированных друг от друга лаком. Концы обмоток выводятся в клеммную коробку и в трехфазных двигателях могут быть соединены как треугольником, так и звездой. Корпус статора с торцов закрыт подшипниковыми щитами, в которые запрессованы подшипники вала ротора. Ротор состоит из стального вала с напрессованным на него магнитопроводом.

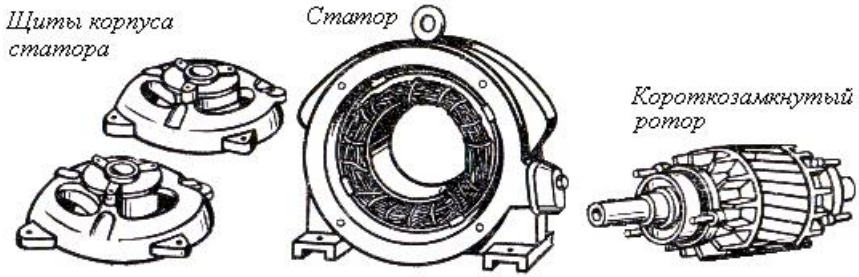


Рис.13.1. Асинхронный двигатель.

Асинхронные машины в основном различаются устройством ротора. Ротор асинхронной машины представляет собой цилиндрический сердечник, собранный, как и магнитопровод статора, из изолированных друг от друга пластин электротехнической стали. Сердечник ротора напрессован на вал, закрепленный в подшипниках. В пазах ротора располагается обмотка ротора.

В большинстве двигателей применяется *короткозамкнутый ротор*. Он значительно дешевле, и, что очень существенно, обслуживание двигателя с короткозамкнутым ротором значительно проще. Обмотка короткозамкнутого ротора выполняется в виде цилиндрической конструкции (так называемое «беличье колесо») из мед-

ных или алюминиевых стержней, которые без изоляции вставляются или заливаются в пазы сердечника ротора. Торцевые концы стержней замыкаются накоротко кольцами из того же материала, что и стержни.

Обмотка *фазного ротора* (Рис.13.2) выполняется изолированным проводом. В большинстве случаев она трехфазная, с тем же числом катушек, что и обмотка статора данного двигателя. Три фазные обмотки ротора соединяются на самом роторе звездой, а свободные концы их подсоединяются к трем контактным кольцам, укрепленным на валу ротора и изолированным от этого вала. К кольцам прижимаются щетки, установленные в неподвижных щеткодержателях. Через кольца и щетки обмотка ротора присоединена к трехфазному реостату. Включение реостата в цепь ротора дает возможность улучшить условия пуска – снизить пусковой ток и увеличить начальный пусковой момент, а также дает возможность плавно регулировать скорость вращения.

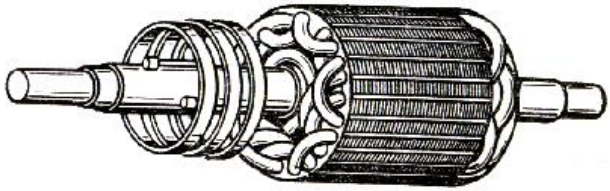


Рис.13.2. Фазный ротор.

Принцип действия асинхронного двигателя основан на использовании вращающегося магнитного поля. В пазах магнитопровода статора фазные обмотки уложены так, что их магнитные поля сдвинуты относительно друг друга на угол 120°. Если эти обмотки запитать от трехфазного источника (см. п. 5 данного пособия), суммарный вектор магнитного поля статора будет вращаться с частотой $n_M = 60\,f$, об/мин, определяемой частотой f источника. Если фазные обмотки выполнены так, что каждая обмотка имеет одну пару полюсов, то и результирующий вектор магнитного поля статора также будет иметь одну пару полюсов. Наряду с этим фазные обмотки статора могут быть выполнены так, что каждая из них будет иметь две, три или большее количество пар полюсов. Тогда и результирующее поле статора будет иметь такое же количество пар

полюсов. В общем случае частоту вращения магнитного поля статора определяют по формуле:

$$n_M = 60\, f / p \text{ ; об/мин,} \qquad (13.1)$$

где f – частота питающего источника (для промышленной сети f = 50 Гц); p – число пар полюсов магнитного поля статора.

Частоту n_M называют *синхронной частотой*. Она при заданном значении частоты источника определяется величиной p. Так если частота f = 50 Гц, а p = 1, 2, 3 и так далее, то n_M = 3000 об/мин, 1500 об/мин, 1000 об/мин и так далее.

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники обмотки ротора и индуктирует в них ЭДС, под действием которой в этих проводниках будет протекать ток. Вокруг проводников с током создается магнитное поле ротора. При взаимодействии магнитного поля ротора с вращающимся магнитным полем статора возникает вращающий момент, под действием которого ротор также будет вращаться в направлении вращения магнитного поля статора. Однако скорость вращения ротора n будет меньше скорости вращения магнитного поля статора. Объясняется это тем, что необходимым условием индуктирования токов в проводниках обмотки ротора является наличия изменения магнитного поля. Если ротор вращать с синхронной частотой вращения магнитного поля, то такого изменения не будет.

Явление отставания вращения ротора двигателя от магнитного поля статора называется скольжением S.

$$S = (n_M - n)/ n_M . \qquad (13.2)$$

С учетом скольжения частота вращения ротора

$$n = n_M (1 – S). \qquad (13.3)$$

Часто скольжение выражают в процентах:

$$S_{\%} = 100(n_M - n)/ n_M . \qquad (13.4)$$

У асинхронных двигателей величина скольжения составляет 2…6%, в зависимости от нагрузки. При снижении нагрузки ротор вращается быстрее и индуктированный ток в его обмотках буден

снижаться. Это приведет к уменьшению вращающего момента двигателя. Если внешнюю нагрузку на вал двигателя увеличивать, то для ее преодоления необходим больший вращающий момент. За счет увеличения скольжения будет увеличиваться ток в обмотках ротора. Магнитное поле ротора тоже будет возрастать, что приведет к увеличению вращающего момента.

13.2. КПД, вращающий момент и характеристики трехфазного асинхронного двигателя

Электрическая комплексная мощность трехфазного асинхронного двигателя, как приемника электрической энергии

$$\dot{S}_Э = P_Э + jQ_Э = \sqrt{3}U_Л I_Л \cos\varphi + j\sqrt{3}U_Л I_Л \sin\varphi, \qquad (13.5)$$

где $P_Э$ – активная мощность, определяющая среднюю мощность необратимого преобразования электрической энергии в двигателе (в основном – в механическую и тепловую); $Q_Э$ – реактивная мощность или мощность обмена энергии между источником и магнитным полем двигателя; $U_Л$ и $I_Л$ – линейные напряжение ток.

В свою очередь активная мощность

$$P_Э = P_C + P_{ПР.СТ} + P_{ЭМ}, \qquad (13.6)$$

где P_C – потери в магнитопроводах (вихревые токи, гистерезис); $P_{ПР.СТ}$ – потери на нагрев проводов обмоток статора. $P_{ЭМ}$ - электромагнитная мощность двигателя.

$$P_{ЭМ} = P_{ВЫХ} + P_{МП} + P_{ПР.Р}, \qquad (13.7)$$

где $P_{ВЫХ}$ – полезная выходная (механическая) мощность двигателя; $P_{МП}$ – мощность механических потерь (трение в подшипниках, воздушное трение); $P_{ПР.Р}$ - потери на нагрев проводов обмоток ротора.

Коэффициентом полезного действия (КПД) асинхронного двигателя называют отношение полезной механической мощности на валу двигателя к активной мощности потребления электрической энергии из сети.

$$\eta = P_{ВЫХ} / P_Э. \qquad (13.8)$$

У современных асинхронных двигателей $\eta = 0,8...0,95$.

Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{P_Э}{S_Э} = \frac{P_Э}{\sqrt{3}U_Л I_Л}. \qquad (13.9)$$

Значение $cos\varphi$ асинхронного двигателя зависит от нагрузки. При отсутствии нагрузки $cos\varphi = 0,1...0,15$, при номинальной нагрузке $cos\varphi = 0,8...0,95$.

Вращающий момент асинхронного двигателя

$$M_{BP} = K_M \Phi_B I_{Pa}, , \qquad (13.10)$$

где K_M – постоянный для данного двигателя коэффициент, учитывающий число пар полюсов магнитного поля статора p и скольжение S; Φ_B – магнитный поток вращающегося поля статора; I_{Pa}, - активная составляющая тока ротора.

Механическая характеристика $n = f(M_{BP})$ асинхронного двигателя приведена на рис.13.3. Если механическая характеристика построена для нормальных условий работы двигателя, то она называется *естественной механической характеристикой*. На самой характеристике можно выделить пять характерных точек.

Первая точка: ее координаты $(0;n_0)$ т. е. $M = 0$, $n = n_0$ – берутся из технических данных двигателя.

Вторая точка: $(M_H; n_H)$

Номинальный вращающий момент

$$M_н = \frac{9555P_{дв}}{n_H}; \text{ Н·м} \qquad (13.11)$$

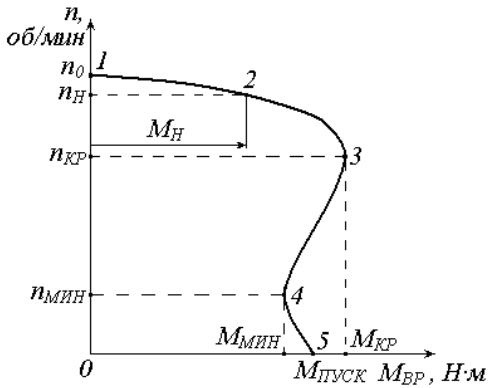


Рис.13.3. Механическая характеристика асинхронного двигателя.

Значение номинальной частоты вращения n_H берется из технических данных двигателя.

Третья точка: (M_{KP}; n_{KP}). Максимальный (критический) вращательный момент

$$M_{KP} \approx 2{,}2\, M_H\,, \quad (13.12)$$

Максимальный момент определяет перегрузочную способность двигателя. При длительной перегрузке, когда внешний (тормозящий) момент превышает M_{KP}, двигатель останавливается. Отношение M_{KP} / M_H называется *перегрузочной способностью* двигателя. Она зависит от квадрата напряжения сети (U^2). Так, при снижении напряжения на 10%, до 0,9 $U_{НОМ}$, вращающий момент снизится до значения 0,81 $M_{НОМ}$. Нагруженный двигатель может остановиться.

Моменту M_{KP} соответствует критическая угловая скорость

$$n_{KP} = n_0(1 - S_{KP})\,, \text{ об/мин} \quad (13.13)$$

где S_{KP} – критическое скольжение.

$$S_{KP} = \frac{S_H\left(k_{KP} + \sqrt{k_{KP}^2 + 2S_H(k_{KP} - 1)}\right)}{1 - 2S_H(k_{KP} - 1)}\,, \quad (13.14)$$

где, $k_{KP} = \dfrac{M_{МАКС}}{M_H}$; $S_H = \dfrac{(n_0 - n_H)}{n_0}$.

Четвертая точка: ($M_{МИН}$; $n_{МИН}$). Для большинства двигателей $n_{МИН} \approx 0{,}143\, n_0$. Минимальный вращающий момент двигателя определяется скольжением:

$$M_{МИН} = \frac{2M_{МАКС}}{\left(\frac{S_{МИН}}{S_{КР}} + \frac{S_{КР}}{S_{МИН}}\right)} \qquad (13.15)$$

где, $S_{МИН} = \frac{(n_0 - n_{МИН})}{n_0}$.

Пятая точка: ($M_{ПУСК}$; *0*). $M_{ПУСК} = K_{ПУСК} M_Н$. Коэффициент $K_{ПУСК}$ приводится в технических данных двигателя.

Искусственную механическую характеристику получают в двигателях с фазным ротором, когда в цепь катушек ротора включены реостаты (Рис.13.4, зависимость *1*). Это дает возможность улучшить условия пуска – снизить пусковой ток и увеличить начальный пусковой момент $M_{ПУСК\,1}$.

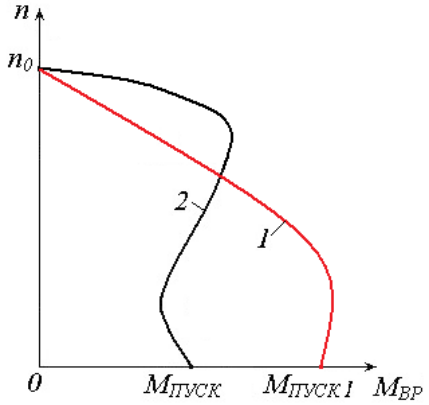


Рис.13.4. Механические характеристики асинхронного двигателя с фазным ротором.

Механическая характеристика наглядно отражает основные свойства асинхронного двигателя как части электропривода. Для более полного описания свойств двигателя используются *рабочие характеристики* - зависимости основных технических параметров двигателя от его механической мощности на валу: $n = f(P_{ВЫХ})$; $M_{ВР} = f(P_{ВЫХ})$; $I_Л = f(P_{ВЫХ})$; $\cos\varphi = f(P_{ВЫХ})$; $\eta = f(P_{ВЫХ})$. Их снимают при постоянном напряжении в сети и представляют графически в относительных единицах.

Важной характеристикой двигателя является также *кратность пускового тока* $K_П$, под которой понимают отношение пускового тока двигателя $I_П$ к его номинальному току $I_Н$: $K_П = I_П / I_Н$. С учетом величины $K_П$ выбираются аппараты управления и защиты электродвигателей.

13.3. Пуск, торможение и регулирование скорости вращения асинхронных двигателей

В большинстве случаев для асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором используется пуск с помощью простых коммутирующих аппаратов – рубильников, автоматических выключателей и других устройств подобного рода. При прямом пуске двигателя кратность пускового тока высока, $K_П$ = 5,5…7. Такой кратковременный пусковой ток относительно безопасен для двигателя, но вызывает изменение напряжения в сети, что может неблагоприятно сказаться на других потребителях энергии, присоединенных к той же распределительной сети. По этим причинам номинальная мощность асинхронных двигателей, пускаемых прямым включением, зависит от мощности распределительной сети. В мощных сетях промышленных предприятий возможен прямой пуск двигателей с короткозамкнутым ротором мощностью до 1000 кВт и даже выше, но во многих случаях эта мощность не должна превышать 100 кВт.

Следует иметь в виду еще один недостаток пускового режима асинхронного двигателя. У двигателей с короткозамкнутой обмоткой ротора кратность пускового момента $K_{ПУСК}$ = 1…2, то есть невелика. Таким образом, при большом пусковом токе двигатель развивает относительно небольшой пусковой вращающий момент.

Улучшение пускового режима асинхронного двигателя сводится к уменьшению пускового тока, причем желательно, чтобы пусковой момент был бы возможно больше. С этой целью снижают напряжение питания обмоток статора, нормально работающих при соединении треугольником, меняют на соединение звездой. Используют конструктивные меры в самом двигателе (обмотку ротора выполняют в виде двойной беличьей клетки). Применяют также холостой пуск двигателя, когда его подключают к нагрузке с помощью муфты (фрикционной, электромагнитной, порошковой) после достижения определенной частоты вращения.

Условия пуска асинхронного двигателя с фазным ротором значительно лучше. Схема включения такого двигателя в сеть приведена на рисунке 13.5. Для получения максимального пускового вращающего момента пусковые реостаты вводят максимально. При максимальном скольжении ($S \approx 1$) вращающий момент $M_{ПУСК}$ будет иметь максимальное значение. Как только ротор начнет вращаться,

скольжение станет уменьшаться, и вместе с ним ЭДС и ток ротора, что приведет к уменьшению вращающего момента. Чтобы вращающий момент нарастал, сопротивление пусковых реостатов нужно постепенно уменьшать. Когда двигатель разовьет номинальные обороты, пусковые реостаты выводят в нулевое положение, то есть замыкают накоротко.

Применение пусковых реостатов значительно улучшает пусковые условия асинхронного двигателя, увеличивая пусковой момент и уменьшая пусковой ток. Однако двигатель с фазным ротором дороже, его обслуживание сложнее, несколько ниже КПД и коэффициент мощности.

Для быстрой остановки двигателя или в случае использования асинхронного двигателя для торможения приводного механизма, например при опускании груза в подъемным устройством, применяется *режим электромагнитного тормоза*. Для перевода двигателя в этот режим применяется *противовключение*, то есть изменение порядка подключения к сети любых двух фаз обмотки статора. При этом направление вращения магнитного поля статора становится противоположным направлению вращения ротора и вращающий момент ротора будет направлен против внешнего механического момента (момента инерции или момента, создаваемого силой тяжести груза). Когда ротор останавливается, необходимо отключать двигатель от сети.

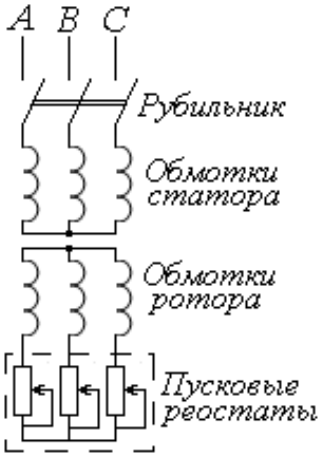


Рис.13.5. Схема включения двигателя с фазным ротором.

Для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором используют частотное регулирование и регулирование изменением числа пар полюсов.

Частотное регулирование является наиболее перспективным методом управления частотой вращения асинхронного двигателя.

Оно осуществляется путем изменения частоты f переменного тока в обмотках статора. Угловая скорость вращаюшегося магнитного поля статора $n_M = 60\ f\ /\ p$ пропорциональна частоте f . При этом возникает необходимость одновременно регулировать напряжение. Это связано с тем, что для сохранения постоянного вращающего момента двигателя необходимо выдерживать постоянство отношения U^2/f^2. В то же время мощность двигателя $P_{ВЫХ}$ будет изменяться пропорционально частоте тока f.

Регулирование изменением числа пар полюсов осуществляется путем переключения числа пар p полюсов магнитного поля статора. При этом на статоре помещают две или больше независимых обмоток с разным числом пар полюсов: p_1, p_2 и так далее. Числа пар полюсов взаимно никак не связаны и могут быть любыми. Само регулирование сводится к скачкообразному изменению частоты n_M . Такой метод требует усложнения конструкции двигателя.

В трехфазных асинхронных двигателях с фазным ротором применяется *реостатное регулирование* частоты вращения. Данный метод осуществляется путем введения в цепь фазных обмоток ротора трехфазного регулируемого реостата, как и при пуске (Рис.13.5). Однако реостат должен быть рассчитан на нагрузку, значительно большую чем при пуске.

Контрольные вопросы

1. Как устроен асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором?
2. Каким выражением определяется частота вращения магнитного поля статора асинхронного двигателя?
3. Что означает понятие «асинхронный»?
4. Что такое «скольжение» и как его определить?
5. Чем отличается ротор фазного двигателя от короткозамкнутого ротора?
6. Что понимают под коэффициентом полезного действия асинхронного двигателя?
7. Каким выражением определяется вращающий момент асинхронного двигателя?

8. Какой вид имеет механическая характеристика асинхронного двигателя?
9. Какие особенности имеет пуск асинхронных двигателей?
10. Как осуществляется регулирование скорости вращения и торможение асинхронных двигателей?

14. СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

14.1. Устройство и принцип действия синхронных электрических машин

Синхронные машины используются в качестве генераторов переменного тока, электродвигателей и синхронных компенсаторов.

Синхронные генераторы гидроэлектростанций вращаются с помощью гидротурбин и носят название гидрогенераторов. Кроме электростанций синхронные генераторы находят применение в установках, требующих автономного источника питания (автомобили, передвижные электростанции, ветроустановки).

Синхронные двигатели переменного тока используются с механизмами средней и большой мощности при редких пусках, требующими постоянного рабочего вращающего момента. К таким механизмам относятся компрессоры, вентиляторы, насосы и так далее.

Синхронный компенсатор предназначается для улучшения коэффициента мощности электротехнических установок (компенсации индуктивной реактивной мощности).

Конструктивно синхронная машина состоит из статора и ротора. Статор аналогичен статору асинхронной машины, а ротор (Рис.14.1) представляет собой многополюсный электромагнит, поле которого создается обмоткой возбуждения, по которой пропускается постоянный ток. Питание обмотки возбуждения осуществляется через скользящий контакт между контактными кольцами и неподвижными щетками. На рис.14.1 показан ротор синхронной машины с явно выраженными полюсами. Быстроходные машины могут иметь ротор с неявно выраженными полюсами.

Особенностью синхронной машины является возможность работы как в режиме двигателя, так и в режиме генератора. Если механически, за счет внешнего источника механической энергии, вращать ротор, то частота ЭДС переменного тока в синхронной машине будет определяться частотой n вращения ротора и числом p пар полюсов, $f = pn/60$. Действующее значение ЭДС E_C, индуктируемой в проводниках фазной обмотки статора, будет зависеть от магнитного потока ротора Φ_P, частоты его вращения n и конструктивных особенностей машины, учитываемых постоянным коэффициентом C_E.

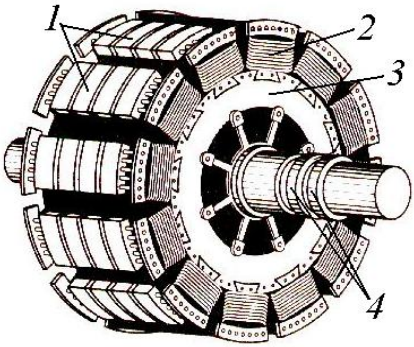


Рис.14.1. Ротор синхронной машины: 1 – полюсы; 2 - полюсные катушки; 3 - сердечник; 4 – контактные кольца.

$$E_C = C_E \Phi_P n, \qquad (14.1)$$

Если обмотки статора запитать током от внешнего источника, то в статоре образуется вращающееся магнитное поле. При отсутствии внешнего вращающего момента взаимодействие вращающегося поля статора с магнитным полем ротора, питаемого постоянным током, вызывает появление вращающего момента, под воздействием которого ротор будет вращаться в том же направлении что и магнитное поле статора.

Схематично режимы работы синхронной машины, подключенной к сети, показаны на рис. 14.2. В режиме генератора, ось магнитных полюсов ротора будет повернута относительно оси полюсов статора на некоторый угол $\Theta_1 < 0$ в направлении вращения. Магнитные полюсы ротора будут «тянуть» за собой полюсы статора. Такое отставание поля статора свидетельствует о наличии магнитного тормозящего момента, на преодоление которого затрачивается механическая энергия внешнего двигателя. В результате происходит преобразование энергии механического движения внешнего двигателя в электрическую энергию генератора, которая будет поступать в сеть.

Если приложить к валу машины тормозящий момент механической нагрузки, то ось магнитных полюсов ротора будет отставать от от оси полюсов вращающегося поля статора на некоторый угол $\Theta_2 > 0$. Электромагнитные силы взаимодействия токов обмотки статора и магнитного поля ротора будут увлекать ротор в направлении вращения. Будет создаваться вращающий момент, посредством ко-

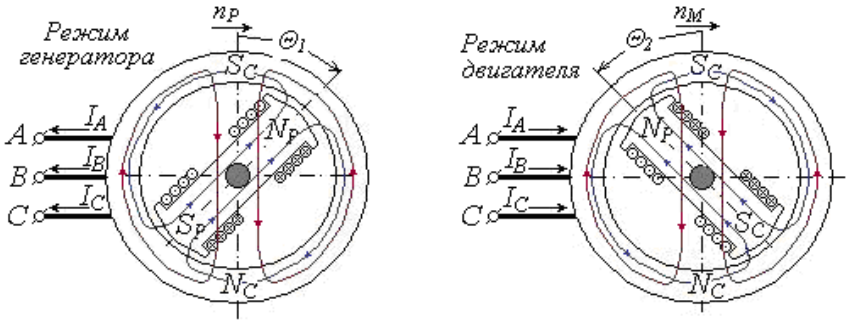


Рис.14.2. Режимы работы синхронной машины.

торого электрическая энергия сети преобразуется в механическую энергию, отдаваемую приводной машине.

При использовании синхронной машины в качестве трехфазного генератора его активная мощность

$$P_Г = 3E_C I\cos\varphi = 3R_Ф I^2 + 3UI\cos\varphi, \qquad (14.2)$$

где E_C - ЭДС фазной обмотки статора; I – ток одной фазной обмотки; φ – угол сдвига фаз между ЭДС и E_C и током I (с учетом влияния нагрузки); $R_Ф$ – активное сопротивление одной фазной обмотки; U – напряжение на выводах фазной обмотки.
Схема замещения одной фазы статора, построенная согласно выражению (14.2) приведена на рис.14.3.

Учитывая что $\cos\varphi$ практически всегда меньше единицы, номинальной мощностью генератора считается его полная мощность $S = U I$. Коэффициент полезного действия генератора (КПД) равен отношению его активной мощности $P_Г$ к подводимой механической

мощности P_M первичного двигателя (паровой турбины, дизельного двигателя и др.).

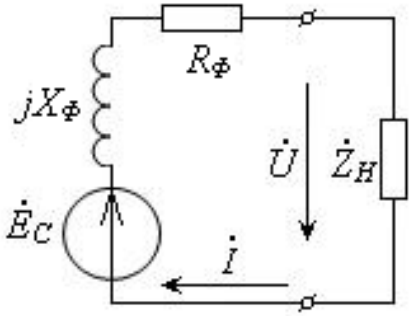


Рис.14.3. Схема замещения одной фазы статора.

$$\eta = P_Г / P_M . \qquad (14.3)$$

Механическая мощность будет складываться полезной мощности генератора и мощности потерь $P_{ПОТ}$: $P_M = P_Г + P_{ПОТ}$. Мощность потерь учитывает механические потери энергии (трение в подшипниках, трение воздуха и др.) и электрические потери: в обмотках возбуждения ротора; потери в стали магнтопроводов; потери в обмотках статора. Механические потери и потери в обмотках возбуждения ротора носят постоянный характер, поэтому при снижении нагрузки генератора ниже номинальной его КПД и КПД первичного двигателя будут также снижаться. Снижение $cos\varphi$ также приводит к уменьшению КПД системы «первичный двигатель – генератор».

14.2. Вращающий момент и характеристики синхронных электродвигателей

Электрическая мощность трехфазного синхронного двигателя может быть выражена как

$$P = 3UI\cos\varphi = 3E_C U \frac{\sin\Theta}{X_Ф}, \qquad (14.4)$$

где U и I – напряжение и ток в фазной обмотке статора; φ – сдвиг фаз между напряжением U и током I; E_C - ЭДС фазной обмотки статора, противодействующая изменению тока I; $\Theta > 0$ - угол отставания оси магнитных полюсов ротора от оси полюсов вращающегося поля статора; $X_Ф$ – индуктивное сопротивление фазной обмотки статора.

Электромагнитный момент, возникающий при взаимодействии магнитных полей статора и ротора, будет равен:

$$M_{ЭМ} = \frac{3p}{\omega} E_C U \frac{\sin\Theta}{X_Ф}, \qquad (14.5)$$

где p – число пар полюсов магнитного поля статора; ω – угловая частота напряжения сети.

Так как $P_{MEX} = M_{ЭМ}\,\omega_P$ а $\omega_P = \omega / p$, то механическая мощность двигателя

$$P_{MEX} = 3E_C U \frac{\sin\Theta}{X_Ф}. \qquad (14.6)$$

Сетевое напряжение U и частота ω постоянны. Тогда соотношения (14.5) и (14.6) будут выражать зависимости $M_{ЭМ} = f(\Theta)$ и $P_{MEX} = f(\Theta)$. Эти зависимости называют *угловыми характеристиками* синхронного двигателя (Рис.14.4).

Угловые характеристики позволяют анализировать процессы в синхронном двигателе при изменении нагрузки. Так, например, при увеличении тормозящего момента угловая частота вращения ротора ω_P начнет уменьшаться. Это приведет к увеличению угла $\Theta > \Theta_1$, что при неизменном токе возбуждения I_{B1} приведет к увеличению электромагнитного момента $M_{ЭМ}$ от значения M_1 до значения M_2 Момент M_2 уравновесит действие внешнего тормозящего момента и двигатель будет вращаться с той же угловой скоростью ω_P но при значении угла Θ, более близком по величине к углу $\Theta = \pi/2$. Однако, если посмотреть на характеристику $M_{ЭМ} = f(\Theta)$ при токе возбуждения I_{B1} (Рис.14.4), то можно предположить, что при дальнейшем увеличении нагрузки угол отставания вращения ротора Θ

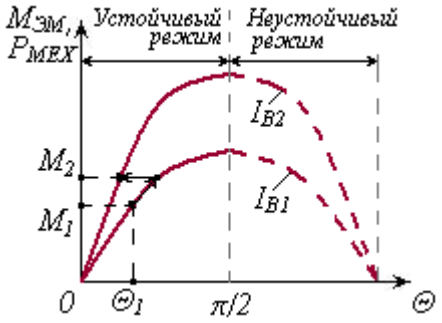


Рис.14.4. Угловые характеристики синхронного двигателя.

может превысить значение $\pi /2$ и двигатель выйдет из устойчивого режима работы и остановится. Чтобы иметь запас устойчивости двигателя по электромагнитному моменту при увеличенной нагрузке необходимо увеличить ток возбуждения, например, установить $I_{B2} > I_{B1}$ (см. рис.14.4). Важной особенностью синхронного двигателя является возможность регулировать с помощью тока возбуждения не только запас устойчивости, но и влиять на реактивный ток статора. Зависимость $I_C = f(I_B)$ при постоянном тормозном моменте называется *U – образной характеристикой* синхронного двигателя (Рис.14.5).

Активная мощность *P* синхронного двигателя изменяется при изменении тормозного момента (нагрузки). Если нагрузку увеличивать, то будет расти ток статора I_C . Для сохранения устойчивой

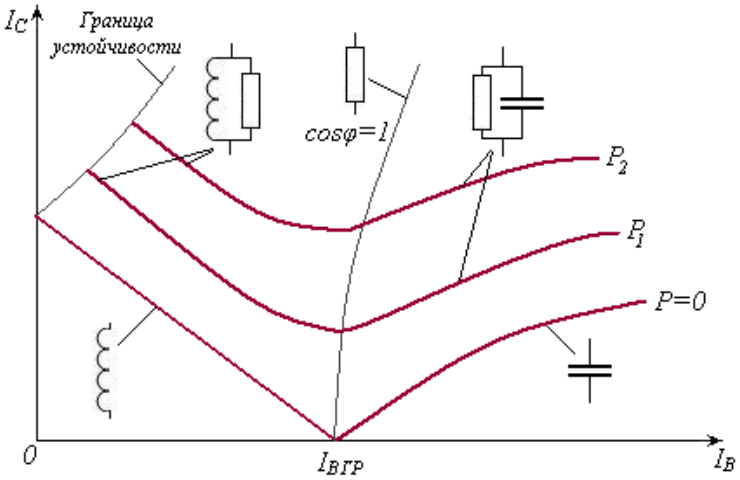


Рис.14.5. U-образная характеристика синхронного двигателя

работы двигателя необходимо увеличивать ток возбуждения I_B. При этом характер сопротивления обмоток статора для внешней сети будет изменяться от активно-индуктивного к активно-емкостному (см. рис.14.5). При значении тока $I_B = I_{B\,ГР}$ сопротивление обмоток статора будет иметь чисто активный характер, когда сдвиг фаз между током в обмотках и питающим напряжением $\varphi = 0$ ($cos\varphi = 1$). Если на валу двигателя нет нагрузки, то, пренебрегая потерями

можно считать активную мощность $P = 0$. В этом случае ток в статорных обмотках будет чисто реактивным (на рис.14.5 нижняя кривая). В таком режиме, при $I_B > I_{B\,ГР}$ двигатель может использоваться в качестве *синхронного компенсатора* – регулируемого емкостного элемента. Синхронные компенсаторы позволяют улучшать коэффициент мощности ($cos\ \varphi$) в электрической энергосистеме.

14.3. Пуск синхронного двигателя

Вращающий момент синхронного двигателя, возникающий в результате взаимодействия вращающегося магнитного поля статора с неподвижным возбужденным ротором, при пуске двигателя близок к нулю. Для того чтобы синхронный двигатель вступил в работу его ротор необходимо раскрутить до частоты вращения, близкой к асинхронной. Чтобы осуществить *асинхронный пуск* синхронного двигателя используют разные приемы.

Пуск в два этапа: первый этап – асинхронный набор частоты вращения при отсутствии тока возбуждения и второй этап - втягивание в синхронное вращение после включения постоянного тока возбуждения. На первом этапе асинхронного пуска обмотка возбуждения отключается от источника постоянного тока и замыкается через пусковой резистор $R_П = (8...10)R_B$ (R_B – сопротивление обмотки возбуждения). На втором этапе включается питание обмоток возбуждения ротора постоянным током.

Использование дополнительной короткозамкнутой пусковой обмотки типа беличье колесо. В этом случае двигатель раскручивается как асинхронный. После достижения определенной частоты вращения включается ток возбуждения ротора и двигатель достигает частоты вращения $n_P = n_M$. При такой частоте вращения ротора скольжение отсутствует и пусковая короткозамкнутая обмотка перестает создавать вращающий момент. Двигатель будет работать в синхронном режиме.

Использование дополнительного двигателя для раскрутки основного синхронного двигателя. Данный прием не требует особых пояснений. По причине большей сложности и повышенной стоимости оборудования применяется редко.

14.4. Электрические двигатели переменного тока малой мощности

Синхронные двигатели малой мощности

В простых синхронных двигателях небольшой мощности роль электромагнита ротора может выполнять постоянный магнит, изготовленный из магнитотвердого материала. Пуск такого двигателя осуществляется непосредственным подключением фазных обмоток статора к питающей сети. Для возникновения асинхронного вращающего момента в момент запуска в полюсы постоянного магнита ротора встраиваются стержни короткозамкнутой обмотки.

В *синхронных реактивных двигателях* малой мощности ротор изготавливается анизотропным, то есть с различным магнитным сопротивлением в разных направлениях. За счет магнитной анизотропии ротора происходит искривление магнитных линий поля статора, что при наличии тормозного момента на валу двигателя приводит к появлению вращающего момента.

Такие двигатели имеют более низкий КПД и в них отсутствует возможность регулирования реактивной мощности и запаса устойчивости.

Однофазные коллекторные двигатели переменного тока

Если в обмотках якоря и в обмотках возбуждения коллекторного двигателя одновременно изменять направление тока, то направление вращающего момента меняться не будет. Это обстоятельство позволяет использовать коллекторные двигатели в сетях переменного тока. При этом сохраняется ценное свойство двигателей постоянного тока – возможность плавного и экономичного регулирования скорости вращения и вращающего момента. Однако конструкция коллекторного двигателя должна быть специально приспособлена к условиям работы при питании переменным током. Прежде всего необходимо уменьшить вихревые токи в магнитопроводе статора (станине) и уменьшить индуктивность обмотки якоря, которая снижает $\cos\varphi$ и ухудшает условия коммутации в коллекторе. Для уменьшения вихревых токов станина двигателя набирается

из изолированных тонких листов электротехнической стали. С целью компенсации индуктивности обмотки якоря на станине двигателя располагают дополнительную компенсационную обмотку. Обмотка размещается равномерно вдоль окружности статора (станины) двигателя и соединяется последовательно с обмоткой якоря (ротора) двигателя. При этом добиваются, чтобы ток в проводниках компенсационной обмотки был по направлению противоположен току в противолежащих проводниках обмотки ротора.

Обеспечить хорошие условия коммутации в коллекторе весьма сложно. Для устранения реакции якоря такие двигатели, как и машины постоянного тока, снабжаются дополнительными полюсами. Но и эта мера не решает всех проблем. В коммутируемых секциях двигателя из-за периодического изменения магнитного потока статора возникает трансформаторная ЭДС, вызывающая появление тока в секции, закороченной щеткой. Для уменьшения этого тока увеличивают сопротивление обмоток ротора, уменьшают количество витков коммутируемых секций, применяют обладающие большим сопротивлением угольные щетки и другие меры.

Изменение направления вращения в коллекторных двигателях осуществляется путем переключения обмоток возбуждения относительно обмоток якоря.

Однофазные коллекторные двигатели переменного тока широко используются в бытовых приборах, в ручном инструменте, в устройствах автоматики.

Двухфазные и однофазные асинхронные двигатели

Если у статора двигателя запитать только одну фазную обмотку, то вращающегося магнитного поля не получим. Если же статор двигателя будет содержать две обмотки, оси которых сдвинуты в пространстве на угол 90 градусов и обеспечить питание этих обмоток токами, сдвинутыми по фазе на угол $\pi/2$, то получим вращающееся суммарное магнитное поле. На этом принципе основана работа *двухфазного асинхронного двигателя*.

Если одну обмотку питать непосредственно от сети, то вторую необходимо запитать через фазосдвигающее устройство, например, через конденсатор (Рис.14.6). При пуске двигателя используют емкость двух параллельно соединенных конденсаторов C_1+C_2. Для этого перед включением рубильника S_1 должен быть

включен выключатель S_2. Для лучших условий пуска емкость конденсаторов подбирают так, чтобы вращающееся магнитное поле статора было круговым. После запуска двигателя при номинальной нагрузке изменение тока второй обмотки вызовет изменение тока на конденсаторе, а значит и напряжения на второй обмотке изменится по величине и по фазе. Это приведет к изменению соотношения магнитных полей двух катушек. Результирующее магнитное поле станет эллиптическим, магнитный поток станет пульсирующим. При этом вращающий момент уменьшится. Этот недостаток устраняется путем уменьшения емкости фазосдвигающих конденсаторов за счет отключения конденсатора C_2. Отключение может осуществляться при достижении необходимой частоты вращения (75…80% $n_{НОМ}$) автоматически – с помощью центробежного выключателя, реле времени либо иным способом.

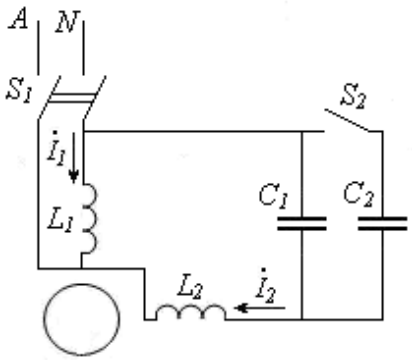


Рис.14.6 Включение двухфазного двигателя в сеть.

Двухфазные двигатели с регулируемой частотой вращения имеют вместо обычного короткозамкнутого ротора полый ротор в виде тонкостенного алюминиевого цилиндра, вращающегося в узком воздушном зазоре между статором и неподвижным центральным сердечником – внутренним статором. Частота вращения регулируется изменением действующего значения или фазы напряжения одной из обмоток. Такие двигатели имеют очень малую инерцию и используются при автоматическом регулировании ряда производственных процессов.

Однофазные асинхронные двигатели не развивают начального пускового момента. Однако, если ротор такого двигателя раскрутить в любую сторону, то он будет вращаться самостоятельно и может развивать значительный вращающий момент.

Задача пуска однофазного двигателя решается посредством применения дополнительной (пусковой) обмотки, рассчитанной на кратковременную нагрузку током и отключаемую по окончании

пуска. Последовательно с этой обмоткой включается пусковой конденсатор или иное фазосдвигающее устройство.

Контрольные вопросы

1. Как устроены и какие функции могут выполнить синхронные электрические машины?
2. Изобразите схему замещения одной фазы синхронного генератора и поясните ее.
3. Как определяется КПД синхронного генератора?
4. Что понимают под угловыми характеристиками синхронного двигателя и как они выглядят?
5. Изобразите и поясните U-образную характеристику синхронного двигателя.
6. Как осуществляется пуск синхронного двигателя?
7. Что можно регулировать в синхронном двигателе с помощью тока возбуждения ротора?
8. Какие особенности имеют синхронные двигатели малой мощности?
9. Изобразите схему включения в сеть двухфазного двигателя и поясните ее.
10. Как устроены и какие особенности имеют однофазные коллекторные двигатели переменного тока?

15. ПУСКОВАЯ И ЗАЩИТНАЯ АППАРАТУРА

15.1. Коммутационные устройства и аппараты

Коммутация это процесс, в результате которого происходит замыкание и размыкание цепей протекания токов в электрических устройствах и системах. Посредством коммутации осуществляется изменение режимов работы электрических цепей и их элементов. Осуществляется коммутация с помощью коммутационных устройств и аппаратов. Различают устройства и аппараты ручного управления, автоматические выключатели аппараты дистанционного управления.

Аппараты ручного управления

К аппаратам ручного управления относятся рубильники, различного рода выключатели, переключатели, кнопочные станции и другие устройства.

Рубильники выпускают одно-, двух- и трехполюсные. Они имеют один, два, три неподвижных контакта (губки) и определенное число подвижных контактов (ножей), скрепленных траверсой из изолирующего материала и установленных на шарнирах. На траверсе имеется рукоятка для включения. Контактная система рубильников может быть выполнена с разрывными (дугогасящими) контактами и без них. Трехполюсные рубильники могут быть с центральной или боковой рукояткой, с боковым или центральным рычажным приводом.

Токоведущие части рубильника монтируют на основании, изготовленном из изоляционного материала: мрамора, шифера, пластмассы, асбоцемента или иного изоляционного материала. Для защиты обслуживающего персонала от возможного прикосновения к токоведущим частям и от действия электрической дуги рубильники закрывают защитными кожухами или помещают в закрытые ящики.

Рубильники применяют в сухих помещениях. На открытом воздухе, а также в сырых и пыльных помещениях рекомендуется использовать распределительные ящики, выпускаемые в металлических корпусах брызго- и пылезащищенного исполнения с встроенным в них трехполюсным рубильником и тремя предохранителями. Чтобы при включенном рубильнике ящик нельзя было открыть, на его крышке смонтировано блокировочное устройство.

Пакетные выключатели типа ПК устанавливают в сухих, непыльных и взрывобезопасных помещениях. Они предназначены для нечастого включения и выключения электродвигателей, осветительных приборов и других потребителей. Пакетные выключатели компактны; при напряжении 220 В и активной нагрузке отключаемые токи могут быть 6...100 А, а при 380 В - 6...60 А. Выключатели имеют специальную пружину, позволяющую быстро замыкать и размыкать цепь. При повороте их рукоятки натягивается пружина, под действием которой контакты замыкаются или размыкаются

с большой скоростью. Пакетные выключатели снабжены искрогасительной фибровой шайбой. Под действием электрической дуги, возникающей при разрыве контакта, фибра выделяет газы (углекислый, водород и водяной пар), которые способствуют быстрому гашению дуги. В сырых помещениях и на открытом воздухе устанавливают герметичные пакетные выключатели.

Кроме пакетных выключателей, широко применяют *пакетные переключатели*. В таких переключателях только одно положение соответствует отключенному состоянию приемника, а остальные два или три положения - включенному.

Кнопочные выключатели и *кнопочные станции* применяются для включения в работу трехфазных и однофазных электродвигателей и других потребителей энергии. В таких устройствах при нажатии на кнопку «Пуск» замыкаются все контакты и после прекращения нажатия остаются замкнутыми либо размыкаются. При нажатии на кнопку «Стоп» контакты выключателей размыкаются.

Штепсельные разъемы применяют для подключения к сети переносных и передвижных трехфазных и однофазных потребителей. Для подключения трехфазных потребителей применяют штепсельные разъемы, имеющие в розетке четыре гнезда, а в вилке - четыре штыревых контакта: три для соединения фаз, четвертый, более длинный, заземляющий. Розетку устанавливают на каком-либо основании (плите, стене) и подключают к сети. Вилку соединяют с потребителем. При замыканий контактов вилки с контактами розетки прежде всего замыкаются заземляющие контакты, благодаря чему корпус потребителя заземляется раньше, чем на него будет подано напряжение сети.

Электромагнитные реле, контакторы и магнитные пускатели

Электромагнитное реле – это электромеханический аппарат, обеспечивающий коммутацию в электрической цепи за счет подачи на его электромагнитную систему управляющего тока или напряжения. Схематическое устройство электромагнитного реле показано на рис. 15.1. Основными элементами реле являются: совмещенный с корпусом электромагнит, содержащий ферромагнитный сер дечник *1* и обмотку *2;* якорь *3* – пластина из магнитомягкого материала, шарнирно связанная с корпусом; ограничитель *4* и пружина

5, фиксирующие положение якоря и группа контактов *6*, обеспечивающая замыкание и размыкание внешней коммутируемой цепи *7*. Электромагнит и якорь образуют электромагнитную систему реле, которая управляется путем подачи электрического тока на обмотку электромагнита через выводы *8*.

Пока ток через обмотку реле не идет, якорь под действием пружины находится на некотором расстоянии от сердечника и контакты внешней цепи разомкнуты. Как только в обмотке появляется ток, появляется магнитное поле катушки. Сердечник намагничивается и притягивает якорь. Подвижные контакты контактной группы прижимаются к неподвижным контактам и внешняя цепь замыкается. При прекращении тока в обмотке магнитное поле исчезает, сердечник размагничивается, пружина приподнимает якорь и контакты внешней цепи размыкаются.

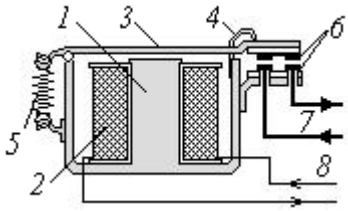


Рис. 15.1.
Электромагнитное реле.

Существует множество различных конструкций электромагнитных реле. Многие реле имеют не одну а несколько групп контактов. Различают реле с нормально разомкнутыми, нормально замкнутыми и перекидными контактами. *Нормально разомкнутые контакты* при отсутствии тока в обмотке реле разомкнуты (Рис. 15.2). *Нормально замкнутые контакты*, наоборот, при отсутствии тока в обмотке замкнуты, а при срабатывании реле они размыкаются. У *перекидных контактов* подвижные (средние) контакты, связанные якорем, при отсутствии тока замкнуты с одними неподвижными контактами, а при срабатывании реле «перекидываются» и замыкают цепь с другими контактами.

В зависимости от назначения электромагнитные реле имеют разные конструкции корпусов и якорей, контактов, различные данные обмоток.

Основным параметром реле является его *чувствительность* – мощность тока обмотки, при которой реле срабатывает. Чем меньше эта мощность тем реле чувствительнее. Реле характеризуется и величиной тока внешней цепи, коммутируемого контактами. Обычно контакты реле рассчитываются на относительно небольшие токи и напряжения.

Электромагнитные реле применяют для включения и отключения приемников малой мощности и в качестве промежуточного элемента для усиления и размножения электрического сигнала.

Контактор – это электромагнитный выключатель, управляемый цепью оперативного тока. Конструктивно и по принципу действия контакторы подобны электромагнитным реле (15.1). В отличие от реле контакторы рассчитываются на коммутирование больших токов, иногда при относительно высоком напряжении. Они применяются для управления потребителями электроэнергии достаточно большой мощности, такими как электродвигатели, нагревательные устройства. В контакторах, помимо главной коммутируемой цепи, имеются также контакты цепи оперативного тока - так называемые вспомогательные контакты, служащие для выполнения вспомогательных операций управления.

Контакторы, как и электромагнитные реле, могут конструктивно выполняться для работы в сетях постоянного тока либо для использования в сетях переменного тока. Главное их отличие состоит в конструкции магнитных систем. Для снижения нагрева от вихревых токов в аппаратах переменного тока подвижные и неподвижные детали магнитных систем набираются из тонких пластин электротехнической стали. Контактор переменного тока входит как составная часть в магнитный пускатель.

Магнитные пускатели относятся к аппаратам дистанционного автоматического управления. Конструктивно магнитный пускатель представляет собой комплектное устройство управления, состоящее из одного или нескольких электромагнитных контакторов, тепловых реле и кнопок управления. На рис. 15.2 показана схема

нереверсивного магнитного пускателя переменного тока. Управление пускателем осуществляется двумя кнопками - «Пуск» и «Стоп». При нажатии кнопки «Пуск» замыкается цепь оперативного тока - от провода фазы *A* сети через контакты *4* теплового реле 5, через катушку *1* контактора, через контакты *4* другого теплового реле *5*, через контакты кнопок «Пуск» и «Стоп» к проводу фазы *C* сети. Под действием оперативного тока содержащий катушку *1* электромагнит трехполюсного контактора притянет подвижный якорь. С последним жестко соединены главные подвижные *2* и вспомогательные контакты *3* в цепи оперативного тока. Когда замкнутся все эти контакты, двигатель *M* будет пущен в ход. При отпускании кнопки «Пуск» протекание оперативного тока через катушку *1* контактора будет обеспечиваться за счет замкнутых вспомогательных контактов *3*. Остановка двигателя обеспечивается путем нажатия кнопки «Стоп». Если двигатель перегружен, потребляемый ток будет больше номинального тока, то произойдет срабатывание теплового реле *5*. Контакты *4* теплового реле разомкнутся и цепь оперативного тока через катушку *1* контактора разорвется, главные *2* и вспомогательные контакты *3* разомкнутся и двигатель остановится.

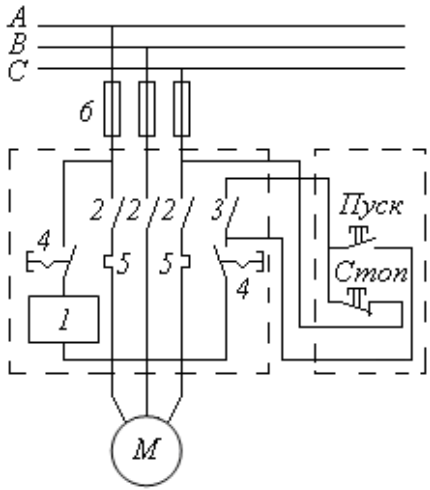


Рис. 15.2. Схема магнитного нереверсивного пускателя.

Вследствие значительной тепловой инерции тепловые реле не обеспечивают защиту от токов короткого замыкания, поэтому для защиты от внезапных коротких замыканий в цепи главного тока должны быть установлены плавкие предохранители *6*.

Магнитный пускатель по сравнению с другими аппаратами управления имеет ряд преимуществ. Он дает возможность осуществлять дистанционное управление электроустановками. При помощи теплового реле обеспечивает защиту электроустановки от перегрузок и обеспечивает нулевую защиту, то есть при исчезнове-

нии в сети напряжения или его снижении до 80...70 % от номинального магнитный пускатель отключается. После восстановления напряжения потребитель электрической энергии остается отключенным.

15.2.Защитные аппараты

При коротких замыканиях ток в цепи возрастает в десятки и сотни раз. В подводящих проводниках может выделится очень большое количество тепловой энергии ($W_T = I^2 t$). Изоляция проводов может воспламениться а сам провод может расплавиться. Короткое замыкание в цепи может также привести к выходу из строя источник – трансформатор или генератор. Для защиты низковольтных (до 1000В) сетей и электроустановок от токов короткого замыкания служат плавкие предохранители и автоматические выключатели.

Плавкие предохранители

Наиболее распространены пробочные и трубчатые предохранители. Осветительные установки и другие установки небольшой мощности защищают *пробочными предохранителями* (Рис.15.3). основную защитную функцию в пробочном предохранителе выполняет плавкая вставка (проволочка из легкоплавкого метала), впаянная между контактами патрона пробки. Если ток через плавкую вставку превышает расчетное (номинальное) значение, то вставка расплавляется или сгорает и цепь протекания тока через весь предохранитель прерывается.

Для защиты силовых установок применяют *трубчатые предохранители* с закрытыми фибровыми, фарфоровыми или стеклянными патронами. Основным элементом таких устройств является калиброванная плавкая вставка, выполненная из легкоплавкого сплава. При перегорании калиброванной вставки высокая температура возникшей дуги действует на фибру, в результате чего выделяется газ, который гасит дугу. Патроны насыпных предохранителей заполнены сухим кварцевым песком, который также гасит дугу при перегорании вставки.

Номинальный ток предохранителя I_H – это ток, который предохранитель может выдерживать длительное время, не разрушаясь.

Время сгорания или плавления плавкой вставки зависит от кратности тока $K_I = I/ I_H$, то есть во сколько раз ток в цепи превышает номинальный ток предохранителя.

В установках, где не могут возникать кратковременные большие токи, рекомендуется выбирать плавкие вставки на номинальный ток нагрузки. При подборе плавких предохранителей для электродвигателей с короткозамкнутым ротором, у которых пусковой ток в 5…7 раз превышает номинальный, плавкую вставку выбирают на ток $I_H = I_{ПУСК}$ /2,5. При этих условиях за время пуска двигателя, равное 1…2 секунды, вставка не успевает сгореть.

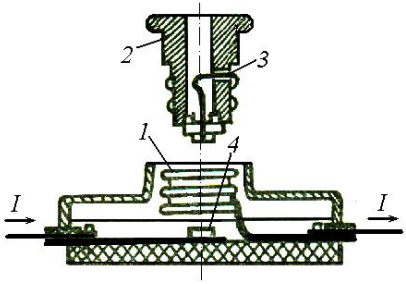


Рис.15.3. Пробочный предохранитель: 1 – цоколь; 2 – пробка; 3 - плавкая вставка; 4 – контактный винт.

Недостаток плавких предохранителей заключается в том, что они не защищают двигатель от перегрузок, так как перегорают при токах, превышающих номинальный примерно на 30-60 %, то есть двигатель длительно может работать при перегрузке, что ведет к перегреву изоляции и является опасным для двигателя.

Автоматические выключатели

При нечастых включениях и отключениях потребителей и для защиты цепей от перегрузок и коротких замыканий применяют *автоматические выключатели*. Они бывают с тепловыми, электромагнитными и комбинированными (тепловыми и электромагнитными одновременно) расцепителями и с различным числом полюсов - одним, двумя и тремя. В однофазных цепях применяют одно- и двухполюсные, в трехфазных - трехполюсные расцепители.

Автоматические выключатели (автоматы) предназначены для автоматического отключения электрических установок при перегрузках и коротких замыканиях. Например, автомат АП50 состоит из основания, главных контактов, дугогасительных камер, механизма расцепления, крышки, кнопки «Пуск» и кнопки «Стоп». В автомате может быть установлена только тепловая защита или тепловая и электромагнитная (комбинированная).

Схема комбинированного расцепителя АП50 изображена на рисунке 15.4. Контакт главной цепи 3 замыкается при нажатии на кнопку 1 «Пуск». При этом преодолевается усилие размыкающей пружины 2. Защелка 4 срабатывает и контакт удерживается в замкнутом состоянии. Как только ток в цепи превысит установленное значение, нагревательный элемент 9 нагреет биметаллическую пластину 10 до некоторой критической температуры. Биметаллическая пластина начнет изгибаться вверх, нажмет на стержень 8, при этом защелка и главные контакты 3 разомкнутся. Нагревательный элемент 9 и биметаллическая пластина 10 образуют *тепловой расцепитель*.

Устройство, состоящее из катушки 6 и якоря 7, называется *электромагнитным расцепителем*. При коротких замыканиях намагничивается катушка 6 и в нее втягивается сердечник 7, который через стержень 8 воздействует на рычаг 5. Защелка 4 расцепляется и главные контакты 3 размыкаются. На схеме (рис.15.4)изображен один контакт главной цепи. Практически их может быть два или три и столько же катушек и биметаллических пластин. Все стержни 8 действуют на одну и ту же защелку. Увеличение тока в любой катушке 6 до значения, превышающего величину уставки тока срабатывания, приводит к размыканию всех главных контактов. Время отключения автомата с электромагнитным расцепителем невелико - доли секунды, поэтому они относятся к *аппаратам максимальной защиты мгновенного действия*.

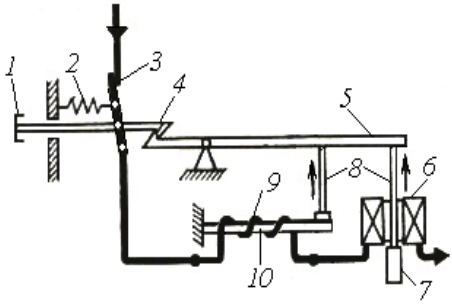


Рис.15.4. Комбинированный расцепитель автоматического выключателя.

Для всех видов электрических приемников номинальный ток расцепителя (теплового, электромагнитного или комбинированного) должен быть равен или превышать рабочий ток электроприемника.

В цепях с осветительной нагрузкой и с другими однофазными потребителями, защищаемыми от повреждения токами короткого замыкания, применяют автоматические выключатели с токами

уставки электромагнитных расцепителей не более 4…5-кратного значения максимально допустимого тока потребителя и провода сети. Для защиты электрических двигателей ток срабатывания электромагнитного расцепителя должен быть не менее 1,25 пускового тока двигателя.

Устройства встроенной температурной защиты (УВТЗ)

Эти устройства предназначены для защиты электродвигателей от перегрева обмоток статора. Некоторые модели электродвигателей выпускаются со встроенными в обмотки датчиками температуры. В качестве таких датчиков применяются *позисторы* (полупроводниковые резисторы, сопротивление которых резко возрастает при температурах 100…130ºС). Изменение сопротивления позистора воспринимается электронной схемой УВТЗ, которая управляет магнитным пускателем. При увеличении температуры обмоток электродвигателя выше допустимой, срабатывает реле на выходе электронной схемы УВТЗ, через контакты которого проходит цепь питания катушки контактора магнитного пускателя, и происходит отключение питания электродвигателя.

УВТЗ обеспечивают более эффективную защиту электродвигателей от перегрузки, чем тепловые реле. Настройка тепловых реле не всегда соответствует истинной температуре обмоток, особенно при изменении внешних факторов (температура воздуха, интенсивность обдува).

15.3. Устройства защиты от поражения электрическим током

К этой группе относятся аппараты, предназначенные для эффективной защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током в случае прикосновения к токоведущим частям. Они отключают питающее напряжение при повреждениях изоляции и токах утечки выше допустимых значений. Их еще называют

устройствами защитного отключения (УЗО). Схема включения УЗО приведена на рис. 15.5. Чувствительным элементом устройства является *трансформатор тока 1*. Он регистрирует суммарное магнитное поле силовых проводов цепи питания потребителя, в данном случае электродвигателя *М*. Если утечки тока на корпус, или на землю через тело человека, нет, то суммарное магнитное поле в трансформаторе тока будет равно нулю. При появлении утечки на выходе трансформатора тока появится напряжение, которое усиливается электронным усилителем *2* до уровня, достаточного для срабатывания электромагнитного реле *3*. При срабатывании реле его нормально-замкнутые контакты *4*, включенные в цепь питания катушки *КМ* контактора магнитного пускателя, размыкаются и происходит отключение нагрузки. Обычно УЗО настраивается на ток

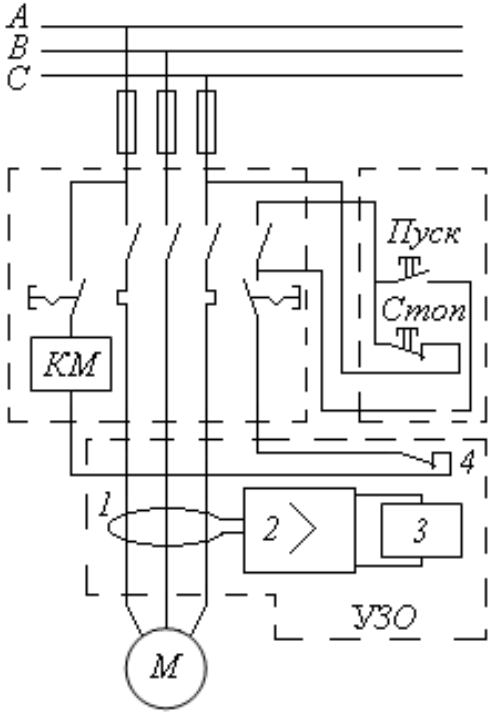


Рис.15.4. Схема включения УЗО.

утечки не более 10…20 мА. Ток такой величины безопасен для человека.

От токов коротких замыканий и от перегрузок УЗО не защищает. По этой причине его необходимо использовать совместно с другими аппаратами – автоматическими выключателями, плавкими предохранителями, магнитными пускателями.

Контрольные вопросы

1. Что такое коммутация и посредством каких устройств она осуществляется?
2. Какие коммутационные устройства относятся к аппаратам ручного управления?
3. Поясните устройство и принцип работы электромагнитного реле и контактора?
4. Чем отличаются контакторы, предназначенные для цепей переменного тока от контакторов постоянного тока?
5. Как устроен магнитный пускатель и какие функции он выполняет? Каково назначение теплового реле?
6. Поясните устройство и назначение плавкого предохранителя.
7. Как устроен и как работает автоматический выключатель?
8. Каково назначение теплового и электромагнитного расцепителей в автоматическом выключателе?
9. Для чего предназначено и какие элементы содержит устройство встроенной температурной защиты (УВТЗ) электродвигателей?
10. Как устроено и как работает устройство защитного отключения (УЗО)?

16. ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

16.1. Общие сведения об электроприводе машин и установок пищевых производств

Электрическим приводом (ЭП) называется электромеханическая система, состоящая из электродвигательного, преобразова-

тельного, передаточного и управляющего устройств, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочей машины и управления этим движением.

По характеру движения различают ЭП вращательного и поступательного движения. При этом скорость рабочего органа может быть регулируемой или нерегулируемой, а движение - непрерывным или дискретным, однонаправленным или реверсивным.

По виду силового преобразователя можно выделить следующие основные виды ЭП: электропривод с непосредственным включением в сеть (без силового преобразователя); ЭП с выпрямителем (управляемым или неуправляемым); ЭП с преобразователем частоты; ЭП с импульсным преобразователем напряжения постоянного тока. В современных силовых преобразователях используются силовые (мощные) транзисторы, диоды и тиристоры.

По количеству используемых двигателей различают групповой, индивидуальный и взаимосвязанный ЭП. В *групповом* ЭП один двигатель приводит в движение несколько исполнительных органов машины. *Индивидуальный* ЭП обеспечивает движение одного исполнительного органа рабочей машины. *Взаимосвязанный* ЭП представляет собой два или несколько электрически или механически связанных между собой индивидуальных электродвигателей, работающих совместно на один исполнительный орган машины. Если двигатели связаны механически и работают на общий вал, такой взаимосвязанный ЭП называется *многодвигательным*.

Производственные машины с частотой вращения валов от 25 до 250 об/мин обычно комплектуются *мотор-редукторами*, в которых асинхронный трехфазный электродвигатель конструктивно объединен с редуктором. Применение мотор-редукторов позволяет значительно упростить и удешевить конструкцию ЭП. Благодаря блочно-модульной конструкции мотор-редуктора в рамках стандартного исполнения могут быть получены практически любые характеристики привода по мощности, частоте вращения выходного вала, варианту исполнения и установки.

16.2. Режимы работы электропривода

Различают три основные режимы работы электропривода: продолжительный, кратковременный и повторно-кратковременный.

Продолжительный режим – это режим такой длительности работы двигателя, при которой температура всех его элементов достигает установившегося значения, то есть наступает тепловой баланс между двигателем и окружающей средой. В таком режиме работает электропривод вентиляторов, компрессоров, насосных станций, конвейеров непрерывной подачи и других механизмов.

Кратковременный режим – это такой режим, при котором время работы двигателя невелико и температура двигателя не успевает достичь установившегося значения. Перерывы в работе двигателя при этом режиме велики и двигатель успевает охлаждаться до температуры, близкой к температуре окружающей среды. Такой режим характерен для механизмов кратковременного действия: шлюзов, шлагбаумов, дверных механизмов и многих других.

Повторно-кратковременный режим – это режим, при котором периоды работы двигателя чередуются с паузами. При этом ни в один из периодов работы температура двигателя не достигает установившегося значения, а во время снятия нагрузки двигатель не успевает охладиться до температуры окружающей среды. Важной характеристикой данного режима является относительная продолжительность работы ($П_P$, %), равная отношению времени работы двигателя T_P ко всему периоду T, включающему паузы.

$$П_P = (T_P / T)100\% . \qquad (16.1)$$

Примерами механизмов с повторно-кратковременным режимом работы являются подъемные механизмы (краны, лебедки), транспортные механизмы (электрокары), дозирующие устройства и так далее.

В соответствии с режимом работы электропривода определяется номинальная мощность электродвигателя – как основного элемента. Под *номинальной мощностью двигателя* понимают полезную механическую мощность на его валу в течение времени, соответствующему его номинальному режиму - продолжительному, кратковременному или повторно-кратковременному при определенной продолжительности включения.

В короткий промежуток времени двигатель может развивать мощность, значительно большую, чем номинальная. *Мгновенная перегрузочная мощность* двигателя – это наибольшая мощность на валу, развиваемая двигателем в течение малого промежутка време-

ни без каких-либо повреждений. Потребность в такой мощности может иметь место при пуске машины или при быстром изменении скоростного режима.

16.3. Нагрев и охлаждение электродвигателей

Тепловой режим электродвигателя зависит от нагрузки и от интенсивности его охлаждения. Во время работы двигателя его температура $T_{ДВ}$ не должна быть выше предельно допустимой температуры. Большинство двигателей и охлаждаются вентиляторами, которые установлены на валу со стороны задней крышки статора. Однако для правильного выбора двигателя, предназначенного для работы в любом из основных режимов, необходимо знать закон изменения во времени превышения температуры υ двигателя над температурой окружающей среды T_{CP} ($\upsilon = T_{ДВ} - T_{CP}$).

В большинстве случаев использования двигателя широко распространенных типов приводов с продолжительным режимом работы его мощность рассчитывается по эмпирическим формулам, помещенным в справочники. Для малоизученных приводов с этим режимом работы мощность двигателя определяют опытным путем либо рассчитывают на основе удельного расхода энергии при выпуске продукции.

При кратковременном и повторно-кратковременном режимах, когда не требуется высокая точность, используют упрощенный метод расчета, основанный на предположении, что двигатель представляет собой однородное тело. В этом случае процесс нагрева двигателя можно описать уравнением

$$\vartheta_{MAX}\,dt = \frac{C}{H}\,d\vartheta + \vartheta dt, \qquad (16.2)$$

где C – теплоемкость электродвигателя; H – теплоотдача электродвигателя; $\upsilon_{MAX} = Q_0/H$; Q_0 – тепловая мощность (тепловая энергия, образующаяся в двигателе в единицу времени).

Решение уравнения 16.2 будет иметь вид:

$$\vartheta = \vartheta_{MAX} - (\vartheta_{MAX} - \vartheta_0)e^{-t/\tau}, \qquad (16.3)$$

где $\tau = C/H$ –постоянная времени нагрева электродвигателя, определяемая экспериментальным путем; υ_0 – начальное значение превышения температуры.

Графически зависимость $\upsilon(t)$, полученная согласно выражению 16.3, приведена на рис. 16.1. При $\upsilon_0 = 0$ эта зависимость нарастает по экспоненциальному закону, стремясь к значению υ_{MAX}. При $\upsilon_0 > 0$ изменяется только скорость возрастания превышения температуры υ. Характер процесса остается экспоненциальным. Построение таких графиков позволяет оценивать возможности использования двигателя по его загруженности.

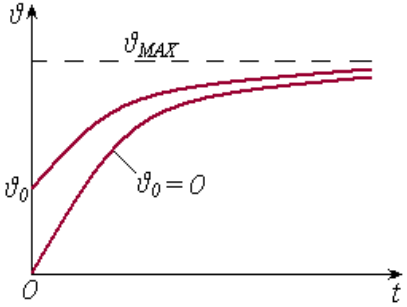


Рис. 16.1. Графическая зависимость $\upsilon(t)$.

При повторно-кратковременном режиме электродвигатель попеременно то нагревается, то охлаждается. Изменение его температуры в каждом таком цикле зависит от предыдущего цикла (Рис. 16.2). Если в каком - то цикле происходит значительное изменение условий охлаждения (длительная остановка двигателя, существенное изменение температуры окружающей среды), то изменится постоянная времени нагрева электродвигателя, что приведет к изменению скорости процессов нагрева и охлаждения. Это необходимо учитывать при построении графиков нагрева.

Такие графики, хотя и отображают наглядно процессы нагрева и охлаждения двигателя, однако не дают точных результатов и требуют много времени на их построение.

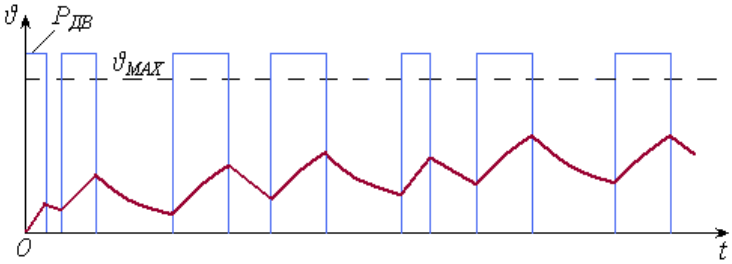


Рис. 16.2. График нагрева двигателя при повторно-кратковременном режиме работы.

На практике для выбора мощности двигателя применяют более простые методы, такие как метод эквивалентного тока и метод эквивалентного момента.

В основу *метода эквивалентного тока* положено допущение, что при переменной нагрузке на двигатель его средние потери равны потерям при продолжительной номинальной нагрузке. Так как мощность переменных потерь пропорциональна квадрату рабочего тока I и сопротивлению соответствующей обмотки R, то суммарные потери энергии W_{Σ} за все рабочее время T, равное сумме отдельных рабочих промежутков времени двигателя, должны быть равны:

$$W_{\Sigma} = (P_{ПОСТ} + RI_{Э}^{2})T, \qquad (16.4)$$

где $P_{ПОСТ}$ – мощность постоянных потерь (трение, потери в магнитопроводе, затраты на возбуждение); $I_{Э}$ – *эквивалентный ток,* определяемый как:

$$I_{Э} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_2^2 t_2 + \ldots + I_K^2 t_K + \ldots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_K + \ldots + t_n}}. \qquad (16.5)$$

Если известен эквивалентный ток, номинальное напряжение и номинальный коэффициент мощности, можно определить номинальную мощность двигателя:

$$P_{НОМ} \geq U_{НОМ} I_{Э} \cos\varphi_{НОМ}. \qquad (16.6)$$

Метод эквивалентного тока применим при постоянных потерях в двигателе в течение всего рабочего времени. Это условие, например, не выполняется в двигателях с последовательным возбуждением, у которых при изменении нагрузки изменяются магнитный поток и частота вращения и, соответственно, будут изменяться потери в магнитопроводе и потери на трение.

Метод эквивалентного момента базируется на то, что у всех электродвигателей вращающий момент пропорционален произве-

дению тока и магнитного потока (см. соотношения 12.4 и 13.10). Магнитный поток можно считать практически постоянным у всех двигателей, кроме двигателей с последовательным и смешанным возбуждением. В этом случае $M_{BP} = k_{BP} I$ (k_{BP} - постоянная величина). Тогда:

$$M_{BPЭ} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_2^2 t_2 + \ldots + M_K^2 t_K + \ldots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \ldots + t_K + \ldots + t_n}}. \qquad (16.7)$$

По известному моменту $M_{BPЭ}$ и номинальной угловой скорости ω_{HOM} получают номинальную мощность двигателя:

$$P_{HOM} \geq M_{BPЭ} \cdot \omega_{HOM}. \qquad (16.7)$$

16.4. Управление электроприводом

При управлении электроприводом необходимо осуществлять ряд операций: пуск и остановка; торможение; реверсирование; регулирование скорости вращения в соответствии с требованиями технологического процесса. Для обеспечения надежной работы электропривода необходимо обеспечивать заданный порядок операций по управлению и должны исключаться ошибочные действия оператора. С учетом этого схемы управления оснащаются цепями автоматических блокировок и средствами защиты от перегрузок двигателя и от аварийных режимов.

Наиболее простая схема управления трехфазным асинхронным электродвигателем, часто используемая в электроприводе многих производственных агрегатов, строится на основе магнитных пускателей. Простейший вариант такой схемы был рассмотрен в п.15.1 данного пособия и изображен на рис.15.2. Эта схема, за счет наличия контактора, обеспечивает дистанционность управления. Для защиты от перегрузок и от токов короткого замыкания служат тепловые реле и плавкие предохранители. За счет наличия в цепи питания катушки контактора вспомогательных контактов обеспечивается «нулевая защита» При значительном снижении напряжения сети или его исчезновении двигатель отключается и предотвращается его самопроизвольное включение. Однако эта схема не

позволяет изменять направление вращения и регулировать скорость вращения управляемого двигателя.

На рис.16.3 приведена схема управления асинхронным электродвигателем при помощи реверсивного магнитного пускателя, позволяющая изменять направление вращения двигателя. В данной схеме используются два электромагнитные контакторы – *КМ1* и *КМ2*. За счет разного соединения главных контактов этих контакторов при их срабатывании обеспечивается изменение чередования фаз на двигателе - *АВС* при срабатывании *КМ1* и *АСВ* при срабатывании *КМ2*. За счет этого происходит изменение направления вращения двигателя. Для изменения направления вращения или торможения двигателя вначале нажимается кнопка «*Стоп*», что приводит к отключению ранее включенного контактора (например *КМ1*, двигатель вращался вперед), после чего нажимается кнопка «*Назад*». Это приводит к выключению контактора *КМ1* и подачу на двигатель питающего напряжения с другим порядком чередования фаз. Произойдет торможение противовключением (если двигатель вращался) и разбег в противоположную сторону. Особенностью схемы является также то, что в ней задействованы нормально замкнутые (размыкающие) контакты обоих контакторов (Рис.16.3). Размыкающий контакт контактора *КМ1* включен в цепь катушки *КМ2,* а контакт *КМ2* - в цепь катушки *КМ1*. Это позволяет избежать короткого замыкания при изменении направления вращения без нажатия кнопки «*Стоп*» или при одновременном нажатии кнопок «*Вперед*» и «*Назад*». Эта схема тоже не обеспечивает регулирование скорости вращения двигателя. Для регулирования частоты вращения асинхронных двигателей используются схемы, содержащие преобразователи частоты.

В таких схемах (Рис. 16.3) трехфазное сетевое напряжение сначала выпрямляется с помощью трехфазного выпрямителя *В* и используется далее для питания управляемого электронного (транзисторного) генератора *УГ*, который формирует трехфазное напряжение для питания асинхронного двигателя *М*. Частота этого напряжения задается системой управления *СУ*. Для обеспечения необходимого вращающего момента двигателя при изменении частоты изменяется и величина напряжения. В наиболее совершенных

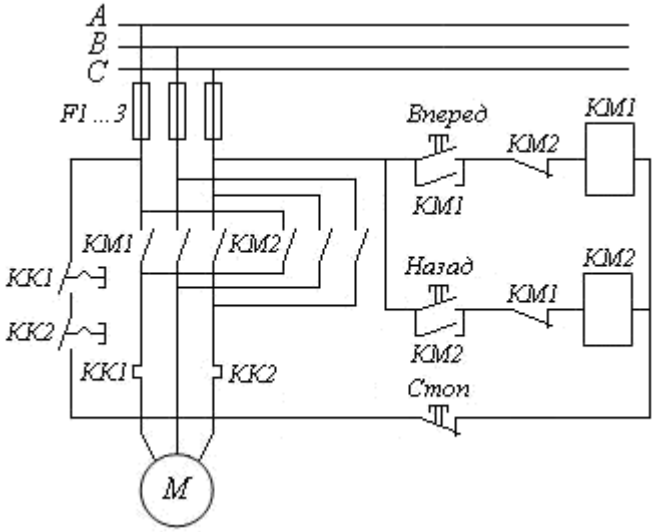


Рис.16.3. Схема управления асинхронным электродвигателем при помощи реверсивного магнитного пускателя.

преобразователях цифровая система управления отслеживает напряжения на обмотках двигателя, сдвиг фаз между ними, определяет скольжение и угловое положение ротора. На основе этих данных в реальном масштабе времени рассчитывается оптимальное положение вращающегося магнитного поля статора и генерируется соответствующее напряжение для питания двигателя. Выходная частота управляемого генератора может изменяться в широких пределах – от единиц до 400 Гц. Система управления обеспечивает плавный разгон и торможение двигателя по заданному закону. Обеспечивается также защита электродвигателя и преобразователя от перегрузок по току и от обрыва фаз. Применение частотных преобразователей для управления асинхронными электродвигателями позволяет экономить до

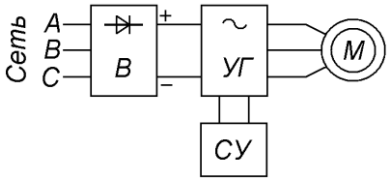


Рис. 16.3. Схема управления асинхронным электродвигателем с преобразованием частоты.

30% электроэнергии за счет поддержания оптимального КПД и $cos\varphi$.

Существуют и другие, например – тиристорные схемы управления частотой вращения асинхронных электродвигателей.

Контрольные вопросы

1. Что называется электрическим приводом?
2. Как различаются виды электропривода по виду силового преобразователя?
3. Какие три основные режимы работы электропривода различают?
4. Чем характерен продолжительный режим электропривода?
5. Как происходит процесс нагрева и охлаждения двигателя при повторно-кратковременном режиме электропривода?
6. Какой параметр двигателя определяют методом эквивалентного тока?
7. Какие операции необходимо осуществлять при управлении электроприводом?
8. Как работает схема управления асинхронным электродвигателем с реверсивным магнитным пускателем?
9. За счет чего в схеме управления асинхронным электродвигателем с реверсивным магнитным пускателем исключается возможность короткого замыкания при одновременном нажатии кнопок «*Вперед*» и «*Назад*»?
10. Как функционирует схема управления асинхронным электродвигателем с преобразованием частоты?

17. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

17.1. Общие сведения

Под *электротехнологией* понимают производственное использование электрической энергии в виде электрических полей и электрического тока, в том числе с предварительным преобразованием ее в другие виды энергии (световую, тепловую, магнитную, акустическую) для непосредственного воздействия на материалы и продукцию с целью получения в них целесообразно направленных изменений.

Развитие этого направления связано с тем, что вещество имеет электрическую природу. Молекулы и атомы содержат электрически заряженные частицы, состояние которых может изменяться под воздействием электрических, магнитных и электромагнитных полей.

Обработка пищевых продуктов в электростатическом поле позволяет быстро и экономично осуществлять такие процессы, как электросепарирование, электрокопчение, электростатическое формование и панировку. Обработка магнитным полем (омагничивание) воды позволяет эффективно бороться с отложением накипи на стенках котлов и нагревательных элементах в технологическом оборудовании.

Электроконтактные методы обработки различных сред и пищевых продуктов позволяют реализовать целый спектр технологических операций и приемов: анализ качества; электроконтактный нагрев; электроплазмолиз; электрофлотацию; электродиализ и другие.

Широкие возможности в области интенсивной тепловой обработки пищевых продуктов обеспечивает использование высокочастотных (ВЧ) и сверхвысокочастотных (СВЧ) электромагнитных полей.

Различные виды оптических излучений (ультрафиолетовое, видимое, инфракрасное) используются для: освещения помещений и рабочих мест; обеззараживания и стерилизации оборудования и посуды; люминесцентного анализа химического состава и качества

продуктов; нагрева, сушки, пастеризации и дезинсекции продуктов и других операций.

17.2. Электронагрев и способы его реализации. Элементные и электродные нагреватели

Использование электрической энергии для получения тепловой энергии является перспективным направлением электротехнологии. Применение электронагревательных приборов является предпочтительным, когда по технологии производства требуется точно поддерживать температурный режим, когда есть возможность использовать электроэнергию в ночные часы (ночной тариф дешевле дневного), когда электронагрев позволяет повысить производительность труда, улучшить качество продукции и в ряде других случаев. Наибольшее распространение получили способы электронагрева: элементный, электродный, высокочастотный (ВЧ) и сверхвысокочастотный (СВЧ) нагрев и нагрев инфракрасными лучами.

Для нагрева воды, других жидкостей и воздуха широко используются трубчатые электронагреватели - ТЭНы (Рис. 17.1). ТЭН состоит из металлической трубки, внутри которой в электроизоляционном наполнителе помещена нихромовая спираль, через которую протекает электрический ток. Концы спирали припаиваются к выводным контактным стержням. Материал трубок выбирается в зависимости от назначения нагревателя. Так, для нагревания воздуха используются стальные трубки, а для нагревания воды - трубки из красной меди, латуни или нержавеющей стали.

Наполнители трубчатых элементов служат для электрической изоляции спирали от металлической трубки являются проводниками тепла. В качестве наполнителей применяют электроизоляционные материалы, обладающие достаточной теплопроводностью для передачи тепла от проволочной спирали к стенкам трубки. К таким материалам относятся кварцевый песок (применяется при рабочей температуре трубки до 450ºС) и периклаз (при температуре свыше 450° С). После засыпки наполнителя трубка опрессовывается. Под большим давлением наполнитель превращается в твердый монолитный материал, надежно фиксирующий и изолирующий спираль внутри трубки. Торцы трубки герметизируются огнеупорным со-

ставом и изолирующими пробками. Наибольшая рабочая температура наружной поверхности ТЭНов около 700ºС. Срок службы ТЭНов составляет более 10000 ч.

При работе элементных нагревателей необходим эффективный отвод тепла. Если включить ТЭН в водонагревателе без воды (или воздушный ТЭН без вентилятора) то он быстро выйдет из строя.

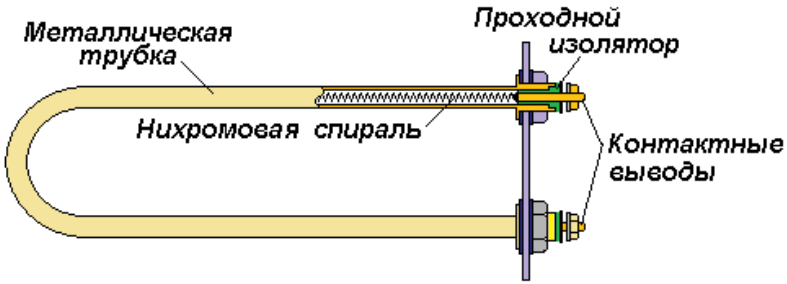


Рис. 17.1. Устройство трубчатого нагревательного элемента.

Трубчатые электронагреватели изготовляют на различные мощности от 0,1 до 10 кВт в одном элементе и напряжением 127. 220 и 380 В. К достоинствам ТЭНов можно отнести нх универсальность, надежность, безопасность обслуживания.

Электродные нагреватели (Рис.17.2) применяются для нагрева воды. Их работа основана на использовании электропроводимости самой воды, которая подвергается нагреванию.

Простейшим примером такого нагревателя является двухэлектродный нагреватель (Рис.17.2,*а*), который может использоваться в однофазной сети. Мощность нагревателя будет определяться площадью пластинчатых электродов, контактирующих с водой, удельной электропроводностью воды и расстоянием d между электродами. Изменяя высоту h заполнения межэлектродного пространства водой можно изменять мощность процесса нагрева.На рис.17.2,*б* приведена схема устройства трехэлектродного водонагревателя, подключенного к трехфазной сети.

Электродные нагреватели конструктивно просты, позволяют просто регулировать мощность нагрева и не боятся «сухого» включения. Однако они не позволяют осуществлять нагрев непроводящих сред. Вследствие прямого контакта электродов с нагреваемой средой требуют принятия особых мер электробезопасности: изоля-

ция емкости, применение диэлектрических вставок на трубопроводы, заземление и зануление металлических нетоковедущих элементом и других.

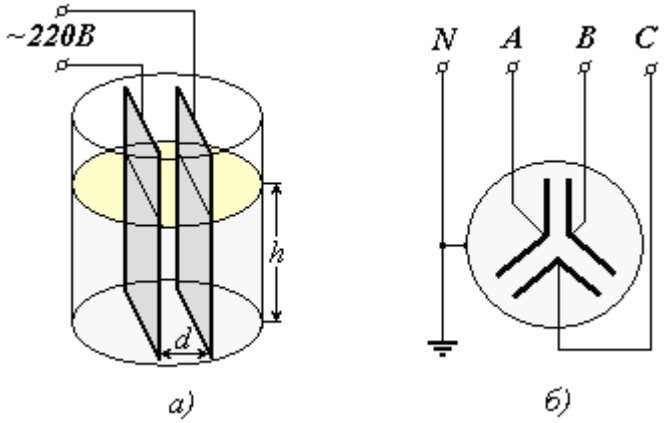


Рис.17.2. Электродные нагреватели: *а)* двухэлектродный нагреватель; *б)* трехэлектродный (трехфазный) нагреватель.

Высокочастотный нагрев может быть использован для ряда процессов: сушки, обжарки, бланширования, пастеризации, стерилизации, размораживания и других. На рис.17.3 приведена упрощенная технологическая схема сушки продукта. Высушиваемый продукт распределяется на движущуюся ленту конвейера и проходит между пластинами рабочего конденсатора. Конденсатор питается током высокой частоты с выхода генератора высокой частоты (ГВЧ). Между пластинами конденсатора возникает высокочастотное электрическое поле, воздействующее на частицы продукта. В этих частицах наводятся токи (токи проводимости; токи, связанные с поляризацией веществ; токи смещения), вызывающие нагрев. Интенсивность нагрева тем больше, чем выше влажность частиц. Вода интенсивно испаряется. Для ускорения отвода водяных паров с помощью вентилятора продукт обдувается воздухом.

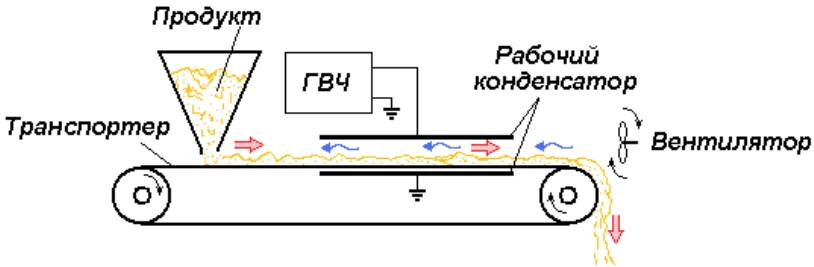


Рис.17.3. Высокочастотная сушка.

Важным свойством ВЧ электромагнитного поля является его способность глубоко проникать в массу продукта. Благодаря этому обеспечивается глубинный прогрев и можно получить технологические результаты, недостижимые при других способах нагрева. Частота колебаний с выхода ГВЧ для разных процессов выбирается от единиц до десятков мегагерц.

17.3. Использование энергии оптических излучений

Оптическое излучение - это часть спектра электромагнитных колебаний с длиной волны от 10 нм до 340000 нм. Весь спектр оптических излучений разделяют на три больших области:

1. Ультрафиолетовое (УФ) излучение с длиной волны $\lambda = 10 \ldots 380$ нм;
2. Видимое излучение (ВИ), $\lambda = 380 \ldots 760$ нм;
3. Инфракрасное (ИК) излучение, $\lambda = 760 \ldots 340 \cdot 10^3$ нм.

Для технологических целей используют УФ - и ИК - излучения. Видимое излучение используется для освещения рабочих мест, сигнализации и решения некоторых технологических задач.

Оптическое излучение оценивают энергетическими и эффективными величинами, предусмотренными Международной комиссией по освещению (МКО).

Энергетические величины учитывают количество энергии, переносимой излучением. Эффективные величины учитывают эффективность зрительного, бактерицидного, эритемного и других видов воздействия. Эффективность воздействия ИК - излучения определяется при помощи энергетических величин.

Единицей *светового потока* (Φ) является *люмен* (лм) 1 лм = 1/683 Вт при однородном излучении на длине волны 554 нм.

За единицу *силы света* (I) принята *канделла* (кд), которая характеризует силу света равномерно излучающего точечного источника, формирующего световой поток в 1 люмен внутри телесного угла ω величиной 1 стерадиан (ср).

$$I(кд) = \frac{\Phi(лм)}{\omega(ср)}. \qquad (17.1)$$

Под *освещённостью* (E) понимают отношение светового потока (Φ), падающего на поверхность, к площади этой поверхности (S).

$$E = (лк) = \frac{\Phi(лм)}{S(м^2)}. \qquad (17.2)$$

За единицу освещённости принят *люкс* (лк). 1 лк = 1 лм/м^2

Для потока ультрафиолетового и инфракрасного излучений используют свои, специфические единицы измерений (см. табл. 17.1). На практике также часто используют дольные единицы, такие как *мэр* (милиэритема), *мб* (милибакт) и др.

Облученность , аналогично как и освещённость, измеряют в единицах : *эр/м*^{2}; *ар/м*^{2}; *бакт/м*^{2}; *фит/м*^{2}; для ИК излучения - *Вт/м*^{2}.

Доза облучения ($Д$), характеризующая количество лучистой энергии, полученной объектом за время облучения $T_{обл}$, определяется как

$$Д = E \cdot T_{обл}. \qquad (13.3)$$

Измеряется $Д$ в *эр·ч/м*^{2}, *бакт·ч/м*^{2} и т.д.

Для получения всех перечисленных видов излучений, в качестве источников, используют различные лампы, работающие на электрической энергии.

Источники излучений, в том числе и видимого излучения, оценивают *светоотдачей* (η_c), под которой понимают отношение светового потока Φ, формируемого источником к электрической мощности P, подводимой к этому источнику.

$$\eta_c = \frac{\Phi(лм)}{P(Вт)}. \qquad (17.4)$$

Таблица 17.1. Единицы измерения потоков излучений

Вид потока	Единицы измерения	Мощ-ность, Вт	Эффективная длина волны, нм
Световой	люмен (лм)	1/683	555
Эритемный	эритема(эр)	1	297
Антирахитный	ар, Вт (а)	1	280
Бактерицидный	бакт (Б)	1	254
Фитопоток	фит	1	680
Поток ИК излучения	Ватт	1	-

Важным эксплуатационным параметром источника излучения является также срок службы (T), измеряемый в часах.

Для освещения производственных зданий и бытовых помещений в Беларуси до сих по широко используются светильники, оборудованные лампами накаливания и люминесцентными лампами различных типов.

Лампа накаливания - самая массовая благодаря своей низкой цене, привычности, простоте схемы светильников, в которых она используется. Средняя световая отдача лампы с вольфрамовой спиралью равна примерно 12 лм/Вт. По сравнению с другими это неэффективный источник света. Большая часть излучения спирали находится в невидимом ИК спектре. Проще говоря, такие лампы гораздо больше греют, чем светят. Лампа накаливания состоит из стеклянного баллона, вольфрамовой нити накала и цоколя. Она работает в результате теплового излучения нити накала. В современных лампах нить выполнена в виде спирали из вольфрама (температура плавления 3370^0С). В зависимости от типа ламп нить накала может быть моноспиральной (односпиральной), биспиральной (дважды спиральной) и трижды спиральной. Температура накала нити достигает $2500...2700^0$ С. В процессе горения лампы вольфрам постепенно испаряется и оседает на стенках колбы. Этот процесс обуславливает уменьшение светового потока, формируемого лампой, и является причиной выхода ее из строя. Срок службы ламп

накаливания не превышает 1000 часов. Основные параметры ламп накаливания и других источников света приведены в табл. 17.2.

Разновидностью ламп накаливания являются *галогенные лампы*. По устройству они подобны лампам накаливания, однако есть и отличия. При их производстве используются гораздо более совершенные технологии и материалы. В объем колбы этих ламп вводятся йод, бромистый метил (CH_3Br) или метилен брома (CH_2Br_2). Эти вещества испаряются при температуре в несколько сотен градусов Цельсия и соединяются с испарившимся вольфрамом, который оседает на стенках колбы. При этом образуются летучие соединения, которые взаимодействуют с вольфрамом спирали. За счет этих процессов, составляющих галогенный цикл, испаренный вольфрам возвращается на нить лампы. При этом температуру нити возможно повысить до 3000°C и срок службы лампы удлиняется в 2-3 раза. Возрастает так же светоотдача лампы до 20…30 люмен/ватт на протяжении всего срока службы без постепенного снижения светового потока.

В галогенных лампах необходимо строго обеспечивать расстояние между спиралью и стенками колбы, при котором галогенный цикл наиболее эффективен. Это расстояние значительно меньше, чем у обычных ламп накаливания, что обуславливает требование повышенной теплоустойчивости колбы. По этой причине галогенные лампы изготавливаются из кварца и цена их существенно выше, но и свойства намного лучше. Служит галогенная лампа около 4000 часов.

Люминесцентная лампа представляет собой трубку из обычного стекла, внутренняя поверхность которой покрыта белым кристаллическим веществом - люминофором. При облучении люминофора ультрафиолетовыми лучами он излучает видимый свет. На концах трубки закреплены электроды, подобные нитям ламп накаливания. Из трубки откачан воздух, а пространство заполнено разреженной смесью аргона и парами ртути при давлении не более 100 Па. Электрический ток, протекающий между электродами, вызывает в газовой смеси электрический разряд. Возникающие в результа те этого разряда ультрафиолетовые лучи облучают люминофор и он начинает светиться видимым светом.

Светоотдача люминесцентных ламп высокая, примерно 40 – 80 лм/Вт, цветопередача - около 85%, срок службы - 10 тысяч часов

Таблица 17.2. Технические характеристики источников света.

Тип источника света	Мощность, Вт	Свето-отдача, лм/Вт	Средний срок службы, часы	Нижний предел температуры окружающей среды, °С
Лампы накаливания	15-1000	8-17	1000	Без ограничений
Галогенные лампы	100-5000	20-27	2000	Без ограничений
Люминесцентные лампы	4-80	48-80	10000-12000	До(-5)
Компактные люми-несцентные лампы	3-57	65-80	5500-8000	До(-20)
Дуговые ртутные лампы(ДРЛ)	50-1000	50-54	12000-20000	До(-25)
Натриевые лампы высоког давления НЛВД(ДНаТ)	50-1000	85-120	10000-12000	Без ограничений
Светодиодные излучатели	От единиц мВт до десятков Вт	150 и более	До 100000	Без ограничений

Из-за не слишком хороших характеристик по цветопередаче изготовители делят свои изделия на несколько групп по цвету излучаемого света, и обязательно ставят соответствующее условное обозначение. Получают разные оттенки видимого излучения люминесцентных ламп - от холодного белого до теплого белого света за счет применения люминофора различного состава.

Из приведенных в табл. 17.2 источников света в бытовых условиях и на производстве наиболее часто применяются лампы накаливания и люминесцентные лампы в светильниках, оборудованных электромагнитными пускорегулирующими аппаратами (ЭМПРА), в состав которых входит дроссель *LL* с фильтрующим конденсатором C_1 и стартер *SF* с вспомогательным конденсатором C_2 (Рис.17.4, *а*). Это наиболее дешевые энергосберегающие источники света. Более современные источники, получающие все боль-

шее практическое использование, это галогенные лампы и светильники с люминесцентными лампами, оборудованные электронными пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА, рис.17.4, *б*). Они дороже по стоимости, однако, обладают лучшими световыми и эксплуатационными характеристиками.

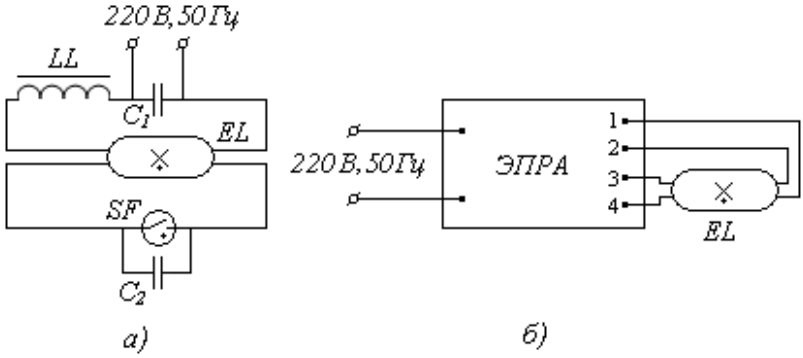


Рис. 17.4. Схемы включения люминесцентной лампы:
а) схема с ЭМПРА; *б*) схема с ЭПРА (электронный пускорегулирующий аппарат).

В настоящее время находят всё более широкое распространение новые разработки люминесцентных источников света - компактные люминесцентные лампы (КЛЛ), которые имеют цоколь, как и у ламп накаливания и оборудованы ЭПРА. Они обладают светоотдачей до 50 лм/Вт и выше и больший (5-8 раз), чем у ламп накаливания срок службы. КЛЛ не содержат ртуть в чистом виде, а только в виде амальгамы.

Дуговые ртутные люминесцентные лампы высокого давления типа ДРЛ имеют преимущества по сравнению с люминесцентными лампами: высокая световая отдача - до 50 лм/Вт, отличаются большой электрической мощностью и значительным световым потоком.

Лампа ДРЛ (рис.17.5, *а*) представляет собой стеклянный баллон, внутри которого находится ртутно-кварцевая горелка. Баллон заполнен углекислым газом и изнутри покрыт люминофором, который преобразует спектр ртутной кварцевой горелки в видимое излучение. Лампы ДРЛ выпускают в основном четырёхэлектродными. Четырёхэлектродная лампа имеет два дополнительные

электроы, расположенные рядом с главными и соединённые с противоположными катодами посредством дополнительного сопротивления. Дополнительные электроды служат для облегчения зажигания лампы. При включении лампы между дополнительными электродами и ближайшими катодами возникает тлеющий разряд, обеспечивающий необходимую ионизацию газа. В результате ионизации разряд устанавливается между основными электродами, так как сопротивление газового промежутка между ними меньше сопротивления включенных в сеть дополнительных электродов. Срок службы четырёхэлектродных ламп около 8000 ч.

Пускорегулирующие аппараты четырёхэлектродных ламп изготавливают для напряжения 220 В. На рисунке 17.5,*б* показана схема включения четырёхэлектродной лампы. Она состоит из дросселя *LL* и конденсатора *C*. Эту схему применяют для зажигания четырёхэлектродной лампы при комнатной температуре. Для зажигания ламп при низких температурах (до -30^0 С) применяют схему включения, изображённую на рисунке 17.5,*в*. В этом случае лампу включают через трансформатор *TV* с большим рассеиванием. Трансформатор даёт возможность в момент зажигания получить импульс напряжения до 300В и больше.

Лампы ДРЛ чаще всего применяются для уличного и производственного освещения, то есть для условий, когда не предъявляется особых требований к времени включения и цветопередаче.
Улучшить состав спектра разрядных ламп высокого давления можно без люминофора, путем введения в объем ртутно-кварцевой горелки йодидов некоторых металлов. Такую конструкцию имеют металогалогенные лампы (МГЛ) типа ДРИ. Такие устройства позволяют без люминофора получать спектры видимого излучения при высоком КПД (см. табл.17.2).

Еще больший световой КПД имеют лампы с наполнением из натрия вместо ртути (НЛВД). Ввиду высокой агрессивности паров натрия разрядная колба выполняется из чистой окиси алюминия. Кроме того в этих лампах для нормальной работы необходимо строго выдерживать температурный режим, что требует усложнения пускорегулирующей аппаратуры. Эти обстоятельства удорожают применение данных источников света.

Светодиоды в качестве источников света начали применяться в шестидесятых годах XX века. Принцип действия светодиодов как полупроводниковых приборов основан на преобразовании электрической энергии непосредственно в световое излучение. Первые светодиоды излучали только красный, желтый и зеленый свет, давали световой поток величиной около долей люмена, что позволяло их

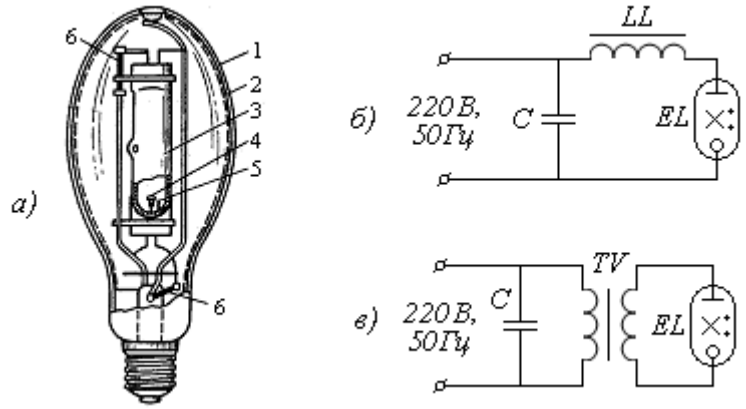


Рис. 17.5. Лампа ДРЛ и схемы ее включения:
а) конструкция лампы; 1-внешняя стеклянная колба; 2-слой люминофора; 3-разрядная трубка из кварцевого стекла; 4-рабочий электрод; 5-зажигающий электрод; 6-ограничительные резисторы;
б) схема включения при температуре среды до –14…20°С;
в) для зажигания при температуре до –30°С.

использовать только в качестве индикаторов в разнообразных технических устройствах. В 1985г. были разработаны светодиоды со световым потоком от 1 до 100 лм, которые начали применяться в качестве световых элементов в системах освещения автомобилей и других транспортных средств. К 1990г. световая отдача светодиодов достигала 10 лм/Вт, т.е. стала примерно такой же, как и у ламп накаливания. Однако для систем искусственного освещения светодиоды были практически непригодны, так как не излучали белый свет. Разработка в 1993г. синего светодиода дала мощный толчок для дальнейшего развития светодиодной техники, так как комбинация синего, зеленого и красного способна давать белый свет, а значит, и создавать разнообразные оттенки светового излучения. С се-

редины 90-х годов прошлого века светодиоды широко применяются в системах визуализации информации, а также разрабатываются светодиодные устройства для осветительных установок. При этом большое внимание уделяется снижению себестоимости производства светодиодов, поскольку именно высокая цена является основным фактором, сдерживающим массовое применение светодиодов в качестве источников видимого света.

Схема включения одиночного светодиода (*VD2*) приведена на рис. 17.5. При напряжении питания $U\sim = 2 \quad 5$В потребляемый ток ограничивается резистором $R_{ОГР}$. Вспомогательный диод *VD1* необходим для выпрямления переменного напряжения *U~*.

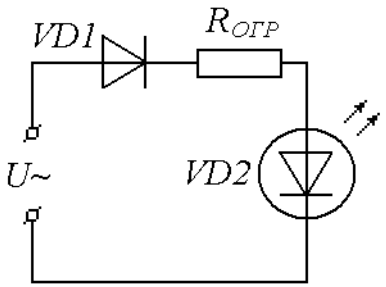


Рис. 17.5. Схема включения светодиода.

Длина волны светового излучения светодиода, то есть его цвет, зависит в основном от химического состава используемых полупроводниковых материалов. Важнейшими материалами, применяемыми в светодиодах, являются алюминий, галлий, индий, фосфор, которые используются для получения светового излучения в диапазоне от красного до желтого цвета, с длиной волны λ = 760-560 нм. С помощью индия, галлия и азота получают зеленое, голубое и синее свечение (λ = 560-450 нм). Добавление люминофора к кристаллу, вызывающего голубое свечение, позволяет получить светодиод с белым цветом светового излучения. Усиления яркости свечения светодиодов добиваются введением в полупроводниковые материалы специальных добавок и присадок, а также применением многослойных структур (так называемых гетероструктур), что позволяет реализовать в одном кристалле множество p-n - переходов.

Светодиоды имеют разное конструктивное исполнение. Однако в любом случае основой светодиодов являются полупроводниковые кристаллы, в которых реализованы p-n-переходы. Кристаллы могут иметь размеры от 0,18 до 1 мм. Обычно кристалл помещается в медную или алюминиевую полированную чашечку, которая служит светоотражателем. Светодиодные лампы содержат несколько десятков светодиодных излучателей.

В ближайшем будущем ожидается массовое внедрение, как на производстве, так и в быту световых приборов, оснащенных полупроводниковыми светодиодными излучателями. На данный момент светодиодные лампы еще нельзя считать равноправными соперниками другим светильникам в сфере бытового и производственного освещения. С другой стороны, есть немало областей, в которых светодиоды уже вытеснили конкурентов практически полностью, например, в сфере индикации.

Главное достоинство светодиодной лампы - фантастическая долговечность, срок службы доходит от 25 000 до 100 000 часов, что составляет при непрерывной работе от 3 до 12 лет. Светоотдача - до 100…140 лм/Вт и более. Хотя цветопередачу светодиодов нельзя назвать даже средней, они излучают свет в довольно узком спектре, можно подобрать практически любой цвет излучения. За счет высокой светоотдачи светодиоды нагреваются столь незначительно, что их можно применять там, где очень важно сохранить температурный режим, например в холодильных камерах. Стандартные цоколи позволяют вворачивать светодиодные лампы в патроны для любых других ламп.

Светодиодные излучатели используются в очень широком диапазоне мощностей - от декоративного микроосвещения и сигнализации до мощных прожекторов. Они обладают высокой механической прочностью, надежностью и виброустойчивостью.

В качестве источников ультрафиолетового излучения применяют ртутно-кварцевые лампы различных конструкций.

Ртутно-кварцевая лампа ДРТ (дуговая ртутная трубчатая) представляет собой трубку из кварцевого стекла, заполненную аргоном и небольшим количеством ртути (давление до 98 кПа). Кварцевое стекло хорошо пропускает не только видимые, но и ультрафиолетовые лучи. Внутри кварцевой трубки, у её концов, вмонтированы вольфрамовые электроды, на которые навита спираль, покрытая слоем оксида. Во время работы лампы между электродами возникает дуговой разряд, являющийся источником ультрафиолетового излучения.

Лампы ДРТ чувствительны к изменению напряжения. При снижении напряжения в сети на 10% она может не загореться; срок службы лампы 800 ч. Лампы ДРТ используют в сети переменного тока 127 и 220 В. Нормальное расположение лампы при работе - горизонтальное. ДРТ применяют с профилактической и лечебной

целями в медицине. Их используют также для люминесцентного анализа.

Эритемные люминесцентные лампы типа ЛЭ (люминесцентная эритемная) имеют устройство, аналогичное люминесцентным осветительным лампам, но отличающееся от них составом люминофора и сортом стекла трубки. Трубка лампы ЛЭ выполнена из увиолевого стекла, хорошо пропускающего ультрафиолетовое излучение и не пропускающего лучи с волной короче 253,7 нм. Состав люминофора подбирают таким, чтобы он излучал поток с длинами волн в пределах 280...320 нм. Это соответствует недостающему зимой ультрафиолетовому излучению.

Лампы ЛЭ-15 мощностью 15 Вт рассчитаны на напряжение 127 и 220 В, а лампы ЛЭ-30 - на 220 В. При работе лампа даёт слабое голубое свечение - в видимой части спектра светятся пары ртути. Схема включения эритемных ламп аналогична схеме включения люминесцентных (Рис.17.4).

Бактерицидные лампы типа ЛБ (лампа бактерицидная) устроены подобно люминесцентным лампам. Трубки из увиолевого стекла хорошо пропускают бактерицидное излучение с длиной волны 254 нм. Люминофором трубка не покрыта.

Бактерицидные лампы изготовляют четырёх марок: ДБ-15 и ДБ-30 для работы при температуре окружающей среды 10...15^0 С, ДБ-30П и ДБ-60П (буква П означает повышенную плотность тока) для работы при температуре 15...25^0 С. Средний срок службы ламп 1500 ч. В конце этого срока бактерицидный поток составляет 50% от номинального.

Схема включения бактерицидных ламп аналогична схеме включения эритемных и люминесцентных ламп. Бактерицидные лампы применяют для обеззараживания воздуха в помещениях, обеззараживания питьевой воды, а также продуктов, оборудования и тары на пищевых предприятиях.

Ультрафиолетовые излучения вызывают конъюнктивит - болезненное воспаление глаз, поэтому работать с такими с источниками необходимо в очках с защитными стеклами.

В практике получили распространение два типа инфракрасного излучения: *светлое* - на основе ламп, и *тёмное* - на основе трубчатых электронагревателей - ТЭНов.

Промышленность выпускает лампы типа ЗС на напряжение 127 и 220В мощностью 250 и 500 Вт. Они представляют собой кол-

бу параболической формы с внутренним зеркальным покрытием. Температура нити накала этих ламп по сравнению с обычными осветительными лампами аналогичной мощности понижена, в результате чего срок их службы увеличен до 2000...10000 ч. Нить расположена в фокусе колбы, которая концентрирует лучистый поток в определённом направлении. Лампы ЗС не требуют дополнительных отражающих устройств, что удобно в эксплуатации.

Инфракрасные лампы (лампы-термоизлучатели) ИКЗК-220-250 по конструкции аналогичны лампам типа ЗС, но имеют колбу из цветного стекла. Мощность ламп - 250 Вт, питающее напряжение -220 В.

Для защиты ИК - ламп от механических повреждений и капель влаги применяют специальную арматуру.

ТЭНы используют в конструкциях, где необходимо создать поток инфракрасного излучения большой мощности.

17.4. Электрохимия и ее использование

Электрохимия - это раздел физической химии, где разрабатывются научные основы электролиза, гальванотехники, создания химических источников тока и других процессов, связанных с протеканием электрического тока в средах, содержащих подвижные ионы.

Под *электролизом* понимают совокупность электрохимических окислительно-восстановительных процессов, происходящих на погруженных в электролит (проводящую жидкость) электродах под воздействием электрического тока.

Осуществляют электролиз в устройствах, называемых *электролизерами* (Рис. 17.6). В качестве электролитов могут выступать водные растворы солей, кислот, щелочей и другие проводящие среды.

При прохождении тока через электролит (Рис. 17.6, *а*) отрицательно заряженные ионы (*анионы*) движутся к положительно заряженному аноду. Положительные ионы (*катионы*) движутся к отрицательному электроду – катоду. Анионами являются молекулы кислорода, хлора, сульфат анионы и другие (Таблица 17.3). В качестве катионов выступают ионы металлов и водорода.

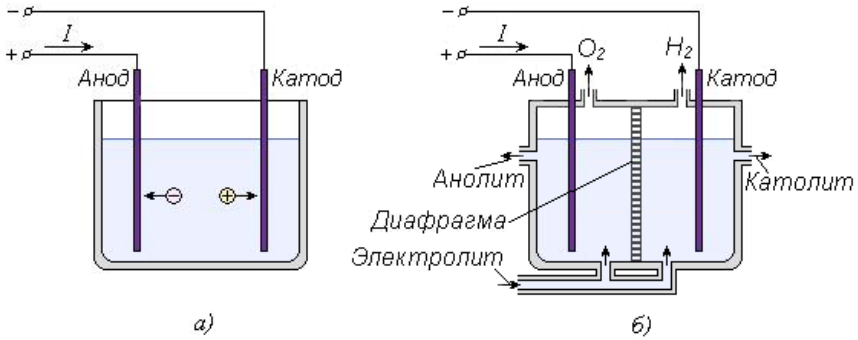


Рис. 17.6. Электролизеры: *а)* простейший электролизер; *б)* диафрагменный электролизер.

Таблица 17.3. Электролиз некоторых веществ.

Электролит	Анион	Катион
Соляная кислота (HCl)	Cl_2	H_2
Серная кислота (H_2SO_4)	O_2 (из SO_4)	H_2
Поваренная соль (NaCl)	Cl_2	Na
Едкий натр (NaOH)	O_2 (из OH)	H_2
Сульфат меди ($CuSO_4$)	O_2 (из SO_4)	Cu

В процессе электролиза на электродах выделяется металл и водород (на катоде), на аноде – молекулярный остаток. Массу m выделившегося вещества можно определить согласно *первому закону Фарадея*:

$$m = k\,Q\ ;\ \text{мг}, \qquad (17.5)$$

где k – электрохимический эквивалент, мг/Кл (Таблица 17.4);
Q – переносимый заряд, Кл.

Заряд Q, необходимый для выделения 1 моля вещества, для всех электролитов одинаков. Он равен произведению постоянной Авогадро $N_A = 6{,}022045\cdot10^{23}$ моль$^{-1}$ и элементарного электрического заряда $e = 1{,}6021892\cdot10^{-19}$ Кл и называется *числом Фарадея*:

$$F = N_A e = 9{,}648456\cdot10^4\ \text{Кл/моль}. \qquad (17.6)$$

Таблица 17.4. Электрохимический эквивалент некоторых веществ.

Вещество	Валентность	*k*, мг/Кл
Алюминий	3	0,0932
Водород	1	0,01045
Железо	3	0,1929
Кислород	2	0,0829
Натрий	1	0,2383
ОН-группа	1	0,1763
Хлор	1	0,3674

С помощью электролиза можно получать растворы с различными свойствами. Если электролизер оборудовать ионнопроницаемой диафрагмой (Рис. 17.6, *б*), то с помощью электролиза можно получать растворы с различными свойствами. Вещества, выделяющиеся в анодной области, не будут проходить через диафрагму в катодную область и наоборот. Растворы этих веществ образуют *анолит* и *католит*. Например, если в качестве электролита использовать водный раствор поваренной соли, то получим католит в виде щелочного раствора (pH = 8…12), обладающий хорошими моющими свойствами, и «кислотный» анолит (pH = 2…4), который может использоваться для дезинфекции, растворения солевых отложений на стенках оборудования и для других целей.

Посредством электролиза достаточно просто осуществить *электрофлотацию*, позволяющую разделять жидкие неоднородные системы (мутные фруктовые соки, сточные воды и др.). Сущность этого метода состоит в разложении путем электролиза воды на водород и кислород в виде очень мелких пузырьков, осаждающихся на поверхности твердых частиц, которые будут увлекаться вверх и всплывать. При этом в основном используются пузырьки водорода, выделяющиеся на катоде, так как они обладают большей подъемной силой и их в два раза больше.

Например, при очистке виноградного сока применение электрофлотации дает высокий производственный эффект. Причем электрофлотация не влияет на содержание сахара, сухих, дубильных, зольных и красящих веществ, щелочность и pH среды. При реализации данного процесса желательно использование диафрагменного электролизера.

Очистка сточных вод протекает более благоприятно в присутствии кислорода, поэтому при электрофлотации диафрагма не используется. Толщину слоя жидкости пронизывают пузырьки водорода и кислорода, что обеспечивает определенное бактерицидное действие. Так при электрофлотации сточных вод мясокомбината удается извлекать до 90-95% жира. Это очень высокий показатель по сравнению с другими используемыми методами.

Электрокоагуляция, как частный случай электрофлотации, позволяет эффективно осуществлять выделение из растворов каллоидных частиц и дает хорошие результаты при выделении белка из молочной сыворотки, белка картофеля из сока картофеля при производстве крахмала, при очистке сточных вод и при других процессах. В ряде случаев используются растворимые аноды из алюминия, железа. Материал анода при этом выступает в качестве коагулянта.

Контрольные вопросы

1. Что понимают по электротехнологией? Какие электротехнологические процессы Вы можете назвать?
2. Какие способы электронагрева Вам известны?
3. Охарактеризуйте ТЭН и электродный нагревательный элемент.
4. Как осуществляется высокочастотный нагрев?
5. Что такое видимое излучение и какие электрические источники видимого излучения вам известны?
6. Поясните принцип действия люминесцентной лампы видимого излучения.
7. Какие источники ультрафиолетового и инфракрасного излучений Вам известны?
8. Каким образом подключаются к сети различные источники оптических излучений?
9. Как устроены электролизеры? Как происходит электролиз?
10. Поясните сущность электрофлотации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дайнеко В. А. Применение электрической энергии в сельском хозяйстве: Учеб. пособие. / В. А. Дайнеко, А. В. Крутов. – Мн.: Ураджай, 2001. – 300 с.

2. Касаткин А. С. Электротехника: Учеб. для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 9-е изд., - М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 544 с.

3. Коломиец,А.П. Электропривод и электрооборудование / Коломиец А.П., Кондратьева Н.П., Владыкин И.Р., и др. – М.: КолосС, 2006.- 328с.

4. Рогов И. А. Электрофизические методы обработки пищевых продуктов. – М.: Агропромиздат, 1988. – 272с.

5. Светлая жизнь, или все о лампах. – “Наука и жизнь” №8, 2008г. с.124-129

СОДЕРЖАНИЕ

1.	ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ	3
1.1.	Электрическая цепь и электрические величины	3
1.2.	Схемы электрических цепей	5
1.3.	Элементы схем и их параметры	7
1.4.	Основные законы электротехники	15
2.	ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ	17
2.1.	Методы измерений и погрешности	17
2.2.	Электроизмерительные приборы	19
2.3.	Электрическое измерение неэлектрических величин	22
3.	МЕТОДЫ РАСЧЕТА И АНАЛИЗА ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ	24
3.1.	Общие положения	24
3.2.	Метод эквивалентных преобразований	24
3.3.	Метод наложения	26
3.4.	Метод уравнений Кирхгофа	27
3.5	Метод контурных токов	28
3.6.	Метод эквивалентного источника	30
4.	СИНУСОИДАЛЬНЫЙ ТОК И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ	35
4.1.	Способы представления синусоидальных электрических величин	35
4.2.	Комплексный метод представления электрических величин	35
4.3.	Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме	37
5.	АНАЛИЗ ПРОСТЫХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	41
5.1.	Неразветвленные цепи синусоидального тока	41
5.2.	Энергетические соотношения в пассивном двухполюснике	49
5.3.	Баланс мощности в цепи синусоидального тока	52
6.	ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ	55
6.1.	Описание трехфазных цепей	55
6.2.	Способы соединения фаз источника и приемника	56
6.3.	Мощность трехфазного тока	60

7. ЦЕПИ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА. ФИЛЬТРЫ 62
7.1. Периодические несинусоидальные электрические величины 62
7.2. Четырехполюсники 66
7. 3. Электрические фильтры 70
8. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ 75
8.1. Возникновение переходных процессов и их описание 75
8.2. Законы коммутации и начальные условия 77
8.3. Переходные процессы в простых цепях 78
9. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ И МЕТОДЫ ИХ РАСЧЕТА 85
9.1. Общие сведения о нелинейных цепях 85
9.2. Нелинейные цепи постоянного тока 86
9.3. Нелинейные цепи переменного тока 88
9.4. Выпрямление переменного тока 92
10. МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ 96
10.1. Основные понятия и определения 96
10.2. Закон полного тока для магнитной цепи и свойства ферромагнитных материалов 97
10.3. Неразветвленные и разветвленные магнитные цепи 101
10.4. Катушка индуктивности в цепи переменного тока 103
11. ТРАНСФОРМАТОРЫ 108
11.1 Общие сведения о трансформаторах 108
11.2. Схема замещения однофазного трансформатора 111
11.3. Режимы работы трансформаторов 114
12. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА 118
12.1. Устройство и принцип действия машины постоянного тока 118
12.2. ЭДС, вращающий момент и реакция якоря 121
12.3. Электрические двигатели постоянного тока и их характеристики 124
12.4. Генераторы постоянного тока и их характеристики 129
13. АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ДВИГАТЕЛИ 132
13.1. Устройство и принцип действия 132

трехфазного асинхронного двигателя
13.2. КПД, вращающий момент и характеристики трехфазного асинхронного двигателя 135
13.3. Пуск, торможение и регулирование скорости вращения асинхронных двигателей 139
14. СИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ 143
14.1. Устройство и принцип действия синхронных электрических машин 143
14.2. Вращающий момент и характеристики синхронных электродвигателей 146
14.3. Пуск синхронного двигателя
14.4. Электрические двигатели переменного тока малой мощности 150
15. ПУСКОВАЯ И ЗАЩИТНАЯ АППАРАТУРА 154
15.1. Коммутационные устройства и аппараты 154
15.2. Защитные аппараты 159
15.3. Устройства защиты от поражения электрическим током 162
16. ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА 165
16.1. Общие сведения об электроприводе машин и установок пищевых производств 165
16.2. Режимы работы электропривода 166
16.3. Нагрев и охлаждение электродвигателей 166
16.4. Управление электроприводом 166
17. ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЯ И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССАХ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ 174
17.1. Общие сведения 174
17.2. Электронагрев и способы его реализации. Элементные и электродные нагреватели 175
17.3. Использование энергии оптических излучений 178
17.4. Электрохимия и ее использование 189
ЛИТЕРАТУРА 193

Учебное издание

Богданович Петр Францевич
Григорьев Дмитрий Алексеевич

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА
КУРС ЛЕКЦИЙ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ФАКУЛЬТЕТА

Курс лекций

Компьютерная верстка Ю.В. Плотко

Подписано в печать
Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс
Печать Riso. Усл.печ.л. Уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Заказ №

Учреждение образования
«Гродненский государственный аграрный университет»
Л.И. № 02330/058516 от 16.06.2009.
230008, г.Гродно, ул.Терешковой, 28.

Отпечатано на технике издательско-полиграфического отдела
Учреждения образования «Гродненский государственный
аграрный университет»
230008, г.Гродно, ул.Терешковой, 28.