

Введение

«Электротехника и электроника» – одна из важнейших дисциплин инженерного цикла. Электротехника - это область науки и техники, изучающая электрические и магнитные явления и их использование в практических целях. Электроника изучает характер взаимодействия электронов с электромагнитными полями и методы создания электронных приборов и устройств для преобразования электромагнитной энергии. Без электроники невозможно построение современных устройств в любой области техники. Именно развитием электрической техники и электронных технологий обусловлен современный прогресс.

Краткий курс лекций по дисциплине «Электротехника и электроника» предназначен для обучающихся технических направлений подготовки. Он содержит теоретический материал по основным вопросам электротехники и электроники, принципам построения аналоговых и дискретных устройств. Курс нацелен на формирование у обучающихся знаний об основных закономерностях построения электротехнических и электронных устройств, на применение этих знаний для понимания процессов, происходящих при работе электротехнического и электронного оборудования, правильной его эксплуатации.

Лекция 1

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1.1. Цель, задачи, структура курса. Основные понятия и определения. Условные обозначения

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

Все электротехнические устройства можно разделить на три большие группы: **источники** энергии, **приемники** и **проводники**.

Направленное движение электрических зарядов называют **электрическим током**. Электрический ток, величина и направление которого не остаются постоянными, называется **переменным** током. Значение переменного тока в рассматриваемый момент времени называют мгновенным и обозначают строчной буквой *i*.

Активными называют электрические *цепи*, содержащие источники энергии, **пассивными** - электрические цепи, не содержащие источников энергии.

Электрическую *цепь* называют **линейной**, если ни один параметр цепи не зависит от величины или направления тока или напряжения. Электрическая цепь является **нелинейной**, если она содержит хотя бы один нелинейный элемент. Параметры нелинейных элементов зависят от величины или направления тока, или напряжения.

Соединение, при котором по всем участкам проходит один и тот же ток, называют **последовательным**. Соединение, при котором все участки цепи присоединяются к одной паре узлов, т. е. находятся под действием одного и того же напряжения, называют **параллельным**.

Любой замкнутый путь, проходящий по нескольким участкам, называют **контуром** электрической *цепи*.

Участок цепи, вдоль которого проходит один и тот же ток, называют **ветвью**, а место соединения трех и большего числа ветвей — **узлом**.

Простейшими пассивными элементами схемы замещения являются сопротивление, индуктивность и емкость. В реальной цепи электрическим сопротивлением обладают не только реостат или резистор, но и проводники, катушки, конденсаторы и т.д. Общим свойством всех устройств, обладающих сопротивлением, является необратимое преобразование электрической энергии в тепловую. Тепловая энергия, выделяемая в сопротивлении, полезно используется или рассеивается в пространстве. В схеме замещения во всех случаях, когда надо учесть необратимое преобразование энергии, включается сопротивление. Сопротивление проводника определяется по формуле:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где *l* - длина проводника;

S - сечение;

ρ - удельное сопротивление.

Величина, обратная сопротивлению, называется проводимостью.

$$g = \frac{1}{R}.$$

Сопротивление измеряется в омах (Ом), а проводимость - в сименсах (См).
Сопротивление пассивного участка цепи в общем случае определяется по формуле:

$$R = \frac{P}{I^2},$$

где P - потребляемая мощность;
I - ток.

Индуктивностью называется идеальный элемент схемы замещения, характеризующий способность цепи накапливать магнитное поле. Полагают, что индуктивностью обладают только индуктивные катушки. Индуктивностью других элементов электрической цепи пренебрегают.

Индуктивность катушки, измеряемая в генри [Гн], определяется по формуле:

$$L = \frac{W \cdot \Phi}{i},$$

где W - число витков катушки;

Φ - магнитный поток катушки, возбуждаемый током i.

Емкостью называется идеальный элемент схемы замещения, характеризующий способность участка электрической цепи накапливать электрическое поле. Полагают, что емкостью обладают только конденсаторы. Емкостью остальных элементов цепи пренебрегают.

Емкость конденсатора, измеряемая в фарадах (Ф), определяется по формуле:

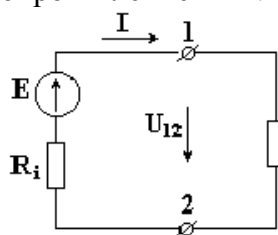
$$C = \frac{q}{U_c},$$

где q - заряд на обкладках конденсатора;

U_c - напряжение на конденсаторе.

Любой источник энергии можно представить в виде источника ЭДС или источника тока. Источник ЭДС - это источник, характеризующийся электродвижущей силой и внутренним сопротивлением. Идеальным называется источник ЭДС, внутреннее сопротивление которого равно нулю.

На рис. 1.1 изображен источник ЭДС, к зажимам которого подключено сопротивление R. R_i - внутреннее сопротивление источника ЭДС.



Стрелка ЭДС направлена от точки низшего потенциала к точке высшего потенциала, стрелка напряжения на зажимах источника U_{12} направлена в противоположную сторону от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом.

$$\text{Ток } I = \frac{E}{R_i + R},$$

Рис. 1.1 Схема с источником ЭДС

$$E = R_i \cdot I + I \cdot R = R_i \cdot I + U_{12},$$

$$U_{12} = I \cdot R = E - I \cdot R_i.$$

У идеального источника ЭДС внутреннее сопротивление $R_i=0$, $U_{12}=E$.

Из формулы видно, что напряжение на зажимах реального источника ЭДС уменьшается с увеличением тока. У идеального источника напряжение на зажимах не зависит от тока и равно электродвижущей силе. Возможен другой путь идеализации источника: представление его в виде источника тока.

Источником тока называется источник энергии, характеризующийся величиной тока

и внутренней проводимостью. Идеальным называется источник тока, внутренняя проводимость которого равна нулю.

Поделим левую и правую части уравнения на R_i и получим:

$$\frac{E}{R_i} = U_{12} \frac{1}{R_i} + I,$$

где $\frac{E}{R_i} = I$ - ток источника тока;

$\frac{1}{R_i} = g_i$ - внутренняя проводимость.

$$J = U_{12} \cdot g_i + I$$

У идеального источника тока $g_i = 0$ и $J = I$.

Ток идеального источника не зависит от сопротивления внешней части цепи. Он остается постоянным независимо от сопротивления нагрузки.

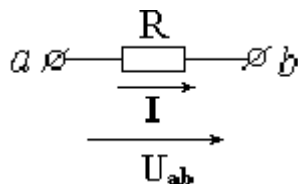
Любой реальный источник ЭДС можно преобразовать в источник тока и наоборот. Источник энергии, внутреннее сопротивление которого мало по сравнению с сопротивлением нагрузки, приближается по своим свойствам к идеальному источнику ЭДС.

Если внутреннее сопротивление источника велико по сравнению с сопротивлением внешней цепи, он приближается по своим свойствам к идеальному источнику тока.

1.2. Законы электротехники

1.2.1. Закон Ома

Изобразим участок цепи с сопротивлением R .



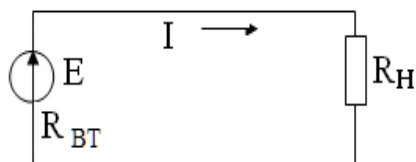
$$I = \frac{U}{R}$$

где I – сила тока на участке цепи,
 U – напряжение, приложенное к этому участку,
 R – сопротивление проводника.

Рис. 1.2 Участок цепи

Выражение является законом Ома для участка цепи: **сила тока на участке цепи прямо пропорциональна напряжению, приложенному к этому участку.**

Закон Ома справедлив для линейных цепей ($R = \text{const}$)



$$I = \frac{E}{R + R_{\text{вт}}},$$

где $R_{\text{вт}}$ – внутреннее сопротивление источника тока.

Рис. 1.3 Полная цепь

Выражение является законом Ома для всей цепи: **сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника.**

1.2.2. Законы Кирхгофа

1 закон Кирхгофа: алгебраическая сумма токов в любом узле цепи равна нулю:

$$\sum_3^n I_i = 0$$

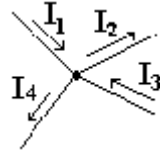


Рис. 1.4 Токи в узле

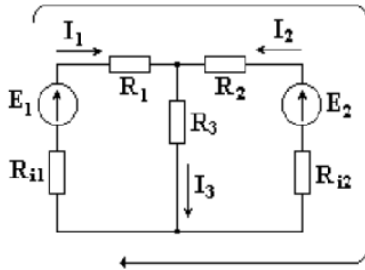
Рассмотрим схему и запишем для нее уравнение по первому закону Кирхгофа.

Токам, направленным к узлу, присвоим знак "плюс", а токам, направленным от узла - знак "минус". Получим следующее уравнение:

$$I_1 - I_2 + I_3 - I_4 = 0 \quad \text{или} \quad I_1 + I_3 = I_2 + I_4$$

2 закон Кирхгофа: алгебраическая сумма ЭДС вдоль любого замкнутого контура равна алгебраической сумме падений напряжений в этом контуре:

$$\sum E = \sum U$$

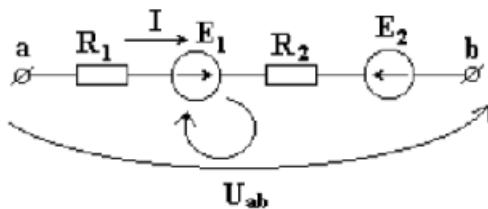


Рассмотрим схему и запишем для внешнего контура этой схемы уравнение по второму закону Кирхгофа.

Выберем произвольно направление обхода контура, например, по часовой стрелке. ЭДС и падения напряжений записываются в левую и правую части уравнения со знаком "плюс", если направления их совпадают с направлением обхода контура, и со знаком "минус", если не совпадают.

Рис. 1.5. Напряжения в контурах

При определении тока в ветви, содержащей источник ЭДС, используют закон Ома для активной ветви. Возьмем ветвь, содержащую сопротивления и источники ЭДС.



Ветвь включена к узлам a-b, известно направление тока в ветви.

Возьмем замкнутый контур, состоящий из активной ветви и стрелки напряжения U_{ab} , и запишем для него уравнение по второму закону Кирхгофа. Выберем направление обхода контура по часовой стрелке.

Рис. 1.6 Ток в контуре

Получим

$$I \cdot R_1 + I \cdot R_2 - U_{ab} = E_1 - E_2$$

Из этого уравнения выведем формулу для тока

$$I = \frac{U_{ab} + E_1 - E_2}{R_1 + R_2}$$

В общем виде:

$$I = \frac{U_{ab} + \sum E}{\sum R},$$

где $\sum R$ - сумма сопротивлений ветви;

$\sum E$ - алгебраическая сумма ЭДС.

ЭДС в формуле записывается со знаком "плюс", если направление ее совпадает с направлением тока и со знаком "минус", если не совпадает.

1.2.3. Закон Джоуля-Ленца

Если электрическую цепь замкнуть, то в ней возникнет электрический ток. При этом энергия источника будет расходоваться.

Когда в цепи с сопротивлением R существует ток, электроны, перемещаются под действием поля, при этом кинетическая энергия электронов передается ионам, что приводит к увеличению амплитуды колебательного движения ионов, и, следовательно, к нагреванию проводника. Количество теплоты, выделенной в проводнике, равно:

$$Q = I^2 R t$$

Приведенная зависимость носит название закона Ленца — Джоуля: количество теплоты, выделяемой при прохождении тока в проводнике, пропорционально квадрату силы тока, сопротивлению проводника и времени прохождения тока.

Преобразование электрической энергии в тепловую имеет большое практическое значение и широко используется в различных нагревательных приборах, как в промышленности, так и в быту. Однако часто тепловые потери являются нежелательными, так как они вызывают непроизводительные расходы энергии, например в электрических машинах, трансформаторах и других устройствах, что снижает их КПД.

1.3. Эквивалентные преобразования. Методы расчета цепей постоянного тока

При расчете цепей приходится сталкиваться с различными схемами соединения потребителей. Задача расчета такой цепи состоит в том, чтобы определить токи и напряжения отдельных ее участков.

На рис. 1.7 изображена электрическая цепь с последовательно соединенными резисторами (сопротивлениями).

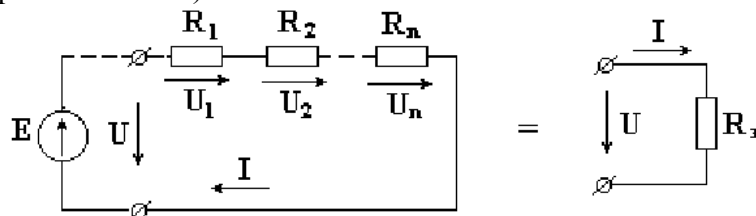


Рис. 1.7 Последовательное соединение резисторов

Напряжение на зажимах источника ЭДС равно величине электродвижущей силы. Поэтому часто источник на схеме не изображают. Падения напряжений на сопротивлениях определяются по формулам:

$$U_1 = I \cdot R_1, \quad U_2 = I \cdot R_2, \quad U_n = I \cdot R_n.$$

В соответствии со вторым законом Кирхгофа, напряжение на входе электрической цепи равно сумме падений напряжений на сопротивлениях цепи.

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n = I \cdot R_1 + I \cdot R_2 + \dots + I \cdot R_n = I \cdot (R_1 + R_2 + \dots + R_n) = I \cdot R_3,$$

где R_3 - эквивалентное сопротивление.

Эквивалентное сопротивление электрической цепи, состоящей из n последовательно включенных элементов, равно сумме сопротивлений этих элементов.

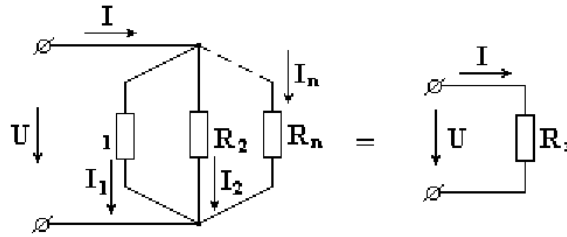


Рис. 1.8. Параллельное соединение резисторов

Токи в параллельных ветвях определяются по формулам:

$$I_1 = \frac{U}{R_1} = U \cdot g_1; \quad I_2 = \frac{U}{R_2} = U \cdot g_2; \quad I_n = \frac{U}{R_n} = U \cdot g_n,$$

где g_i - проводимости 1-й, 2-й и n-й ветвей.

В соответствии с первым законом Кирхгофа, ток в неразветвленной части схемы равен сумме токов в параллельных ветвях:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n = U \cdot g_1 + U \cdot g_2 + \dots + U \cdot g_n = U \cdot (g_1 + g_2 + \dots + g_n) = U \cdot g_3,$$

где $g_3 = g_1 + g_2 + \dots + g_n$

Эквивалентная проводимость электрической цепи, состоящей из n параллельно включенных элементов, равна сумме проводимостей параллельно включенных элементов.

Эквивалентным сопротивлением цепи называется величина, обратная эквивалентной проводимости.

Пусть электрическая схема содержит три параллельно включенных сопротивления. Эквивалентная проводимость:

$$g_3 = g_1 + g_2 + g_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2}{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3};$$

$$R_3 = \frac{1}{g_3} = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_2}$$

Эквивалентное сопротивление схемы, состоящей из n одинаковых элементов, в n раз меньше сопротивлений R одного элемента:

$$R_3 = \frac{R}{n}.$$

1.4. Баланс мощностей

Для схемы уравнение справедливо: $E = U + RI + R_i I$

После умножения всех членов этого уравнения на I получим

$$\pm \sum I E = \pm \sum U I + \sum R I^2,$$

т.е. алгебраическая сумма мощностей источников, отдаваемая (потребляемая) в цепь, равна сумме мощностей, потребляемой пассивными элементами.

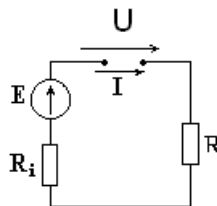


Рис. 1.9 Схема для расчета

Коэффициент полезного действия (к.п.д.) в электрических цепях,

$$\eta = P_{\text{пол.}} / P_{\text{пол.}}$$

$$P_{\text{затр.}} = P_{\text{пол.}} + P_{\text{потерь}},$$

где $P_{\text{пол.}}$ – мощности, потребляемые источниками (зарядка ЭДС) и выделяемые в нагрузке;

$P_{\text{потерь}}$ – мощности, обусловленные потерями энергии в источнике питания (внутренних сопротивлениях $R_{\text{вн}}$) и сетях (потери в проводах $R_{\text{пр.}}$),

Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие токи называются переменным и постоянным?
- 2) Как рассчитывается эквивалентное сопротивление при последовательном и параллельном соединении резисторов?
- 3) Сформулировать закон Ома.
- 4) Сформулировать законы Кирхгофа.
- 5) Сформулировать закон Джоуля-Ленца.
- 6) Какова цель расчета электрической цепи?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника. М., Высшая школа, 2007. - 560 с.; - ISBN 078-5-06-005607-5
2. Лачин В.И., С. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X

Дополнительная

3. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника. Уч. пособие для вузов / Жаворонков М.А., Кузин А.В. М.: Академия, 2005.- 400с.; - ISBN 5-7695-1703-4
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; -ISBN 5-11-001360-8

Лекция 2

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

2.1. Величины, характеризующие синусоидальный электрический ток

Широкое применение в электрических цепях электро-, радио- и других установок находят периодические ЭДС, напряжения и токи. Периодические величины изменяются во времени по значению и направлению, причем эти изменения повторяются через некоторые равные промежутки времени T , называемые *периодом*.

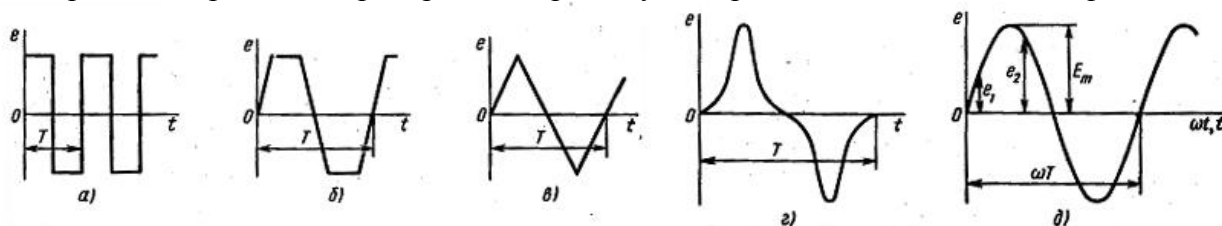


Рис. 2.1. Переменные периодические ЭДС различной формы

В настоящее время практически вся вырабатываемая электроэнергия является энергией синусоидального тока. Лишь некоторую долю этой электроэнергии при использовании преобразуют в энергию постоянного тока.

Электрические цепи, в которых действуют синусоидальные ЭДС и токи, называются электрическими цепями синусоидального тока. К ним относятся понятия схемы цепи, контура, ветви и узла, которые были даны ранее для цепей постоянного тока.

Основными величинами, характеризующими синусоидально изменяющуюся величину, являются:

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

Максимальное значение или амплитуду ЭДС, напряжения и тока обозначают соответственно E_m , U_m , I_m .

Значение периодически изменяющейся величины в рассматриваемый момент времени называют **мгновенным** ее значением и обозначают e , u , i — ЭДС, напряжение и ток соответственно. Мгновенное значение величины показывает закон ее изменения и записывается в виде:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi)$$

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi)$$

$$e = E_m \sin(\omega t + \psi)$$

Максимальное значение — частный случай мгновенного значения.

Аргумент синуса $(\omega t + \psi)$ называется **фазой**.

Угол ψ равен фазе в начальный момент времени $t = 0$ и поэтому называется **начальной фазой**.

Угловая частота $\omega = 2\pi f$

Величина, обратная периоду, т. е. число полных изменений периодической величины за 1 с, называется **частотой**: $f = \frac{1}{T}$. Частоту выражают в герцах (Гц).

Во всех энергосистемах России и других европейских стран в качестве стандартной промышленной частоты принята $f = 50$ Гц, в США и Японии $f = 60$ Гц. Это обеспечивает получение оптимальных частот вращения электродвигателей переменного тока и отсутствие заметного для глаза мигания осветительных ламп накаливания. Некоторые электротехнические устройства работают при другой частоте.

На рис. 2.2 изображены графики синусоидальных токов одинаковой частоты, но с различными амплитудами и начальными фазами:

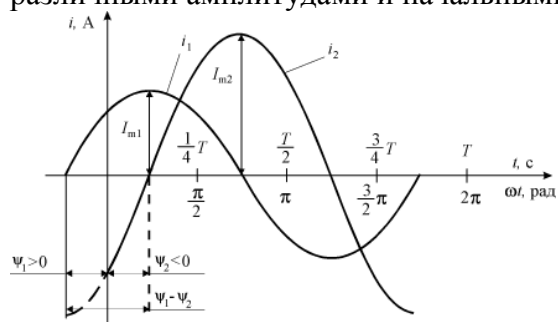


Рис. 2.2. Синусоидальные токи

синусоидального тока по совершаемой работе. Такое значение будет **действующим** для синусоидального тока.

Действующим значением синусоидального тока называется такое значение постоянного тока, при прохождении которого в одном и том же резисторе с сопротивлением R за время одного периода T выделяется столько же теплоты, сколько и при прохождении синусоидального тока.

При синусоидальном токе

$$i = I_m \sin \omega t,$$

где ω - угловая скорость вращения генератора

количество теплоты, выделяемое в резисторе R , за время T

$$Q_{\square} = \int_0^T i^2 R dt,$$

а при постоянном токе

$$Q_{\square} = I^2 RT$$

Согласно определению $Q_{\square} = Q_{\square}$,

тогда
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}.$$

Таким образом, *действующее значение синусоидального тока является его среднеквадратичным значением.*

В итоге получим:
$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0,707 I_m.$$

Аналогично, действующие значения ЭДС и напряжений равны соответственно:

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = 0,707E_m \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = 0,707U_m \cdot$$

Действующие значения синусоидальных величин в $\sqrt{2}$ раз меньше их амплитудных значений. Для периодических величин, изменяющихся по другому закону, это соотношение будет другим.

Действующие значения синусоидального тока, ЭДС и напряжения обозначают прописной буквой без индексов, как постоянные ток, ЭДС и напряжение.

В большинстве электроизмерительных приборов, измеряющих ток и напряжение, используется принцип теплового, или электродинамического, эффекта. Поэтому они всегда показывают действующее значение, зная которое можно вычислить амплитуду.

Под **средним значением** синусоидальной величины понимают ее среднеарифметическое значение. Если определять среднее значение синусоидальных величин за период, то оно будет равно нулю, так как положительная и отрицательная полуволны синусоидальных кривых совпадают по форме. Поэтому среднее значение синусоидального тока, ЭДС и напряжения определяют за полпериода.

За среднее значение синусоидального тока можно принять такое значение постоянного тока, при котором за полпериода переносится такой же электрический заряд, что и при синусоидальном токе.

Согласно этому можно написать:

$$I_{cp} \frac{T}{2} = \int_0^{\frac{T}{2}} i dt,$$

где I_{cp} — среднее значение тока.

Для синусоидального тока

$$i = I_m \sin \omega t$$

$$\int_0^{\frac{T}{2}} i dt = I_m \int_0^{\frac{T}{2}} \sin \omega t = I_m \frac{T}{\pi}.$$

Отсюда получим:

$$I_{cp} = \frac{2I_m}{\pi} = 0,637I_m$$

Аналогично, для ЭДС и напряжения:

$$E_{cp} = \frac{2E_m}{\pi} = 0,637E_m \quad U_{cp} = \frac{2U_m}{\pi} = 0,637U_m$$

Среднее значение меньше действующего. Отношение действующего значения к среднему называется **коэффициентом формы** периодической кривой.

Для синусоидальной кривой коэффициент формы = 1,11

В общем случае аргумент синусоидальной функции, называемый **фазовым углом** или просто **фазой**, равный $\omega t + \psi$ или $\omega t - \psi$, может отличаться от нуля при $t = 0$. Значение фазового угла при $t = 0$ называется **начальной фазой**.

Если синусоидальные величины одновременно проходят через нулевые и максимальные значения, говорят, что они **совпадают по фазе**. Синусоидальные величины будут также совпадать по фазе, если их начальные фазы равны.

Если две синусоидальные величины одновременно проходят через нулевые значения и одновременно принимают максимальные значения противоположных знаков, то такие величины **находятся в противофазе** или **сдвинуты по фазе** на угол π .

На практике чаще всего имеют место случаи, когда ЭДС, напряжения и токи не совпадают по фазе, т. е. через нулевые значения проходят не одновременно. Если такие ЭДС описываются уравнениями: $e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$; $e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \psi_2)$, то при $\psi_2 > \psi_1$ ЭДС e_2 опережает по фазе e_1 .

Разность фазовых углов $\psi = \psi_2 - \psi_1$ называется *разностью* или *сдвигом фаз*.

Особое значение имеет угол сдвига по фазе между напряжением и током $\varphi = \psi_u - \psi_i$, где ψ_u и ψ_i - начальные фазы напряжения и тока.

Для цепей синусоидального тока также справедливы законы Кирхгофа, сформулированные ранее для цепей постоянного тока. Но так как синусоидальные величины (ЭДС, напряжение, ток) характеризуются мгновенными, максимальными и действующими значениями, то для каждого из них существуют свои формулировки законов Кирхгофа.

Для мгновенных значений законы Кирхгофа справедливы в алгебраической форме.

Первый закон состоит в том, что алгебраическая сумма мгновенных значений токов в узле равна нулю.

По второму закону алгебраическая сумма ЭДС в контуре равна алгебраической сумме падений напряжений в этом контуре.

Для максимальных и действующих значений законы Кирхгофа справедливы только в векторной или комплексной форме.

2.2. Активное сопротивление, индуктивность и емкость в цепи переменного синусоидального тока

2.2.1. Резистивный элемент

При движении электроны сталкиваются с атомами проводящего вещества и кинетическая энергия электронов, запасенная ими при ускорении, превращается в тепловую энергию, затрачиваемую на нагрев проводника и рассеиваемую в окружающую среду. Это необратимый активный процесс преобразования электрической энергии, который количественно определяется сопротивлением R . Поэтому его называют активным сопротивлением. Элементы электрической цепи, обладающие только активным сопротивлением R , называют резисторами.

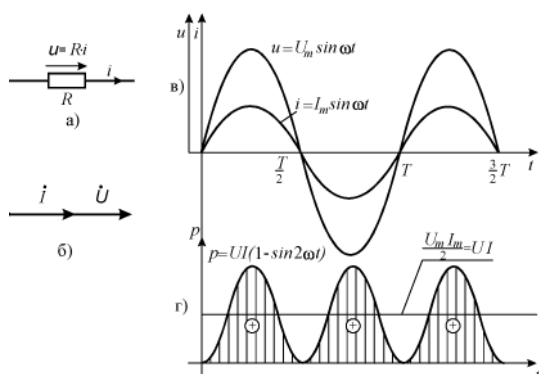
Пусть к зажимам цепи с активным сопротивлением R приложено напряжение $u = U_m \sin \omega t$. В цепи будет протекать ток:

$$i = \frac{U_m \sin \omega t}{R} = \frac{U_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t, \quad \text{где } I_m = \frac{U_m}{R}$$

Вывод 1: ток и напряжение в резистивном элементе совпадают по фазе (изменяются синфазно) (рис. 2.3).

Вывод 2: закон Ома выполняется как для амплитудных значений тока и напряжения: $U_m = RI_m$, так и для действующих значений тока и напряжения: $U = RI$.

Выразим мгновенную мощность p через мгновенные значения тока и напряжения:



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

Анализ графика и формулы позволяют сделать выводы:

- мгновенная мощность p имеет постоянную составляющую $\frac{U_m I_m}{2} = UI$ и переменную составляющую $\frac{U_m I_m}{2} \cos 2\omega t$, изменяющуюся с частотой 2ω ;

Рис. 2.3. Мощность в резистивном элементе

- мощность в любой момент времени положительна ($p > 0$). Это значит, что в резистивном элементе происходит необратимое преобразование электрической энергии в другие виды энергии («потребление» энергии);

- постоянная составляющая в формуле есть среднее значение мгновенной мощности за промежуток времени равный периоду T . Следовательно, энергия, преобразуемая в резистивном элементе в течение периода, подсчитывается по формуле:

$$W = \frac{U_m \cdot I_m \cdot T}{2} = U \cdot I \cdot T.$$

2.2.2. Индуктивный элемент

При протекании в индуктивном элементе тока $i_L = I_m \sin \omega t$ согласно закону электромагнитной индукции напряжение на нем:

$$u_L = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d(L \cdot i)}{dt} = L \frac{di_L}{dt},$$

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

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

Подставляя получим:

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

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

Величина $X_L = \omega \cdot L$ называется индуктивным сопротивлением, измеряется в Ом.

Таким образом, можно сделать выводы:

1. Ток в индуктивном элементе отстает по фазе от напряжения на угол $\frac{\pi}{2}$.

2. Индуктивный элемент оказывает синусоидальному (переменному) току сопротивление, модуль которого $X_L = \omega L$, прямо пропорционален частоте.

3. Закон Ома выполняется как для амплитудных значений тока и напряжения: $U_m = X_L \cdot I_m$, так и для действующих значений:

$$U_m = X_L \cdot I_m \Rightarrow \frac{U_m}{\sqrt{2}} = X_L \frac{I_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow U = X_L \cdot I$$

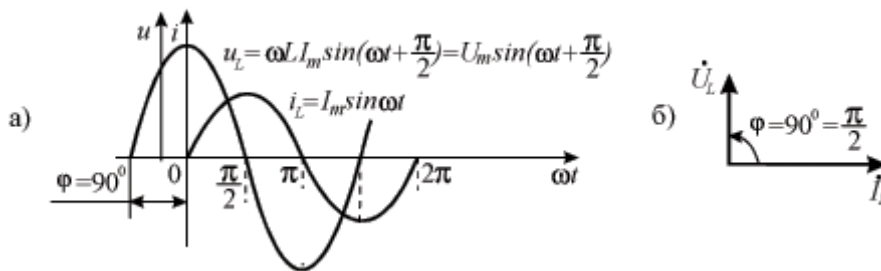


Рис. 2.4. Графики тока и напряжения в индуктивном элементе

Выразим мгновенную мощность p через i и u

$$p = u \cdot i = U_m \cos \omega t \cdot I_m \sin \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t$$

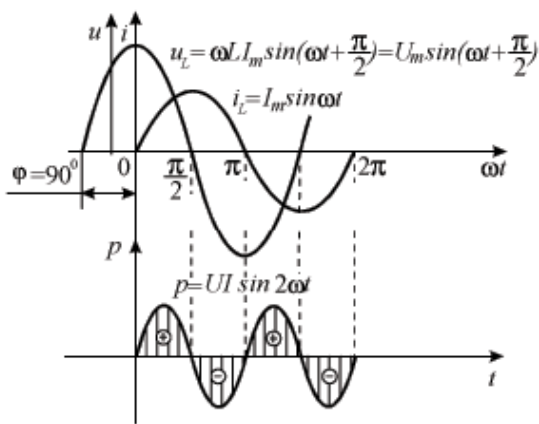


Рис.2.5. График изменения мощности p со временем

Анализ графика и формул позволяют сделать выводы:

1. Мгновенная мощность на индуктивном элементе имеет только переменную составляющую, изменяющуюся с двойной частотой.

2. Мощность периодически меняется по знаку: то положительна, то отрицательна. Это значит, что в течение одних четвертьпериодов, когда $0 > p$, энергия запасается в индуктивном элементе (в виде энергии магнитного поля), а в течение других четвертьпериодов, когда $0 < p$, энергия возвращается в электрическую цепь.

2.2.3. Емкостной элемент

Пусть к емкостному элементу приложено напряжение $u_C = U_m \sin \omega t$. На пластинах емкостного элемента появится заряд q , пропорциональный приложенному напряжению: $q = C u_C$

Тогда ток в емкостном элементе:

$$i_C = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt} = \omega C U_m \cos \omega t = I_m \sin(\omega t + 90^\circ),$$

где $I_m = \omega \cdot C \cdot U_m = \frac{U_m}{\frac{1}{\omega C}} = \frac{U_m}{X_C}$;

$X_C = \frac{1}{\omega C}$ – емкостное сопротивление, измеряется в Омах.

Сопоставляя выражения, приходим к выводам:

1. Ток в емкостном элементе опережает по фазе напряжение, приложенное к нему, на 90° .

2. Емкостный элемент оказывает синусоидальному (переменному) току сопротивление, модуль которого обратно пропорционален частоте.

3. Закон Ома выполняется как для амплитудных значений тока и напряжения: $U_m = X_C I_m$, так и для действующих значений:

$$U_m = X_C \cdot I_m \Rightarrow \frac{U_m}{\sqrt{2}} = X_C \frac{I_m}{\sqrt{2}} \Rightarrow U = X_C \cdot I$$

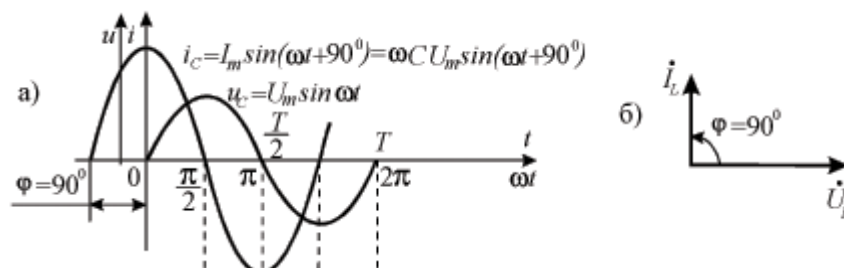


Рис. 2.6. Графики тока и напряжения в емкостном элементе
Мгновенная мощность p :

$$p = u \cdot i = U_m \sin \omega t \cdot I_m \cos \omega t = \frac{U_m I_m}{2} \sin 2\omega t = UI \sin 2\omega t$$

Анализ графика и формул позволяет сделать выводы:

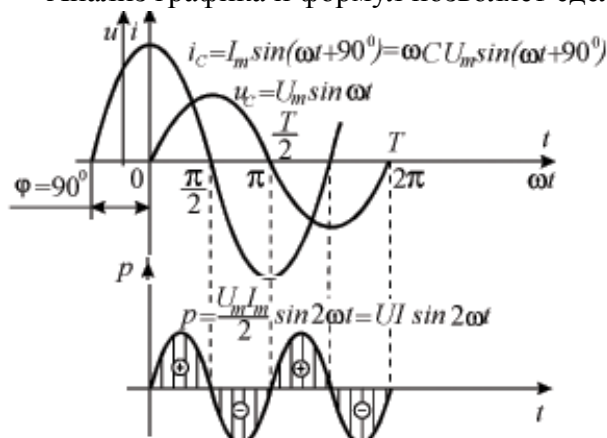


Рис. 2.7. График изменения мощности со временем

1. Мгновенная мощность на емкостном элементе имеет только переменную составляющую, изменяющуюся с двойной частотой.

2. Мощность периодически меняется по знаку – то положительна, то отрицательна. Это значит, что в течение одних четвертьпериодов, когда $p > 0$, энергия запасается в емкостном элементе (в виде энергии электрического поля), а в течение других четвертьпериодов, когда $p < 0$, энергия возвращается в электрическую цепь.

2.3. Активная и реактивная мощности

$$P = UI \cos \phi$$

$$Q = UI \sin \phi$$

$$S = UI$$

2.4. Последовательное и параллельное соединение активного, индуктивного и емкостного элементов. Полное сопротивление последовательной цепи

При прохождении гармонического тока $i = I_m \cos \omega t$ через электрическую цепь, состоящую из последовательно соединенных элементов R, L, C , на зажимах этой цепи создается гармоническое напряжение, равное алгебраической сумме гармонических напряжений на отдельных элементах (второй закон Кирхгофа): $u = u_R + u_L + u_C$.

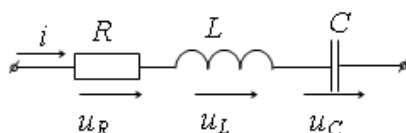


Рис. 2.8. Последовательно соединенные элементы R, L и C

Напряжение u_R на сопротивлении R совпадает по фазе с током i , напряжение u_L на индуктивности L опережает, а напряжение u_C на емкости C отстает от i на $\pi/2$.

Следовательно, напряжение u на зажимах всей цепи равно:

$$U = U_m \cos(\omega t + \varphi) = RI_m \cos \omega t + \omega LI_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) + \\ + \frac{1}{\omega C} I_m \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = RI_m \cos \omega t + (\omega L - \frac{1}{\omega C}) I_m \cos(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

Данное уравнение представляет тригонометрическую форму записи второго закона Кирхгофа для мгновенных значений напряжений. Входящая в него величина $X = X_L - X_C = \omega L - \frac{1}{\omega C}$ называется реактивным сопротивлением цепи, которое в зависимости от

знака может иметь индуктивный ($X > 0$) или емкостный ($X < 0$) характер. В отличие от реактивного сопротивления X активное сопротивление R всегда положительно.

Падение напряжения в активном и реактивном сопротивлениях изображается катетами прямоугольного треугольника напряжения, гипотенуза которого изображает напряжение на зажимах цепи. Отсюда:

$$U = \sqrt{(RI)^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} I^2 \quad \text{или} \quad U = \sqrt{R^2 + X^2} I.$$

Полученное выражение показывает, что действующие значения (так же, как и амплитуды) напряжения на зажимах цепи и тока, проходящего через данную цепь, связаны соотношением, аналогичным закону Ома:

$$U = zI; \quad U_m = zI_m,$$

где величина
$$z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

называется полным сопротивлением рассматриваемой цепи.

Из векторных диаграмм следует, что угол фазового сдвига тока i относительно напряжения u равен:

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

Если задано напряжение $u = U_m \cos(\omega t + \psi)$ на зажимах цепи с последовательно соединенными R , L и C , то ток определяется по формуле: $i = \frac{U_m}{z} \cos(\omega t + \psi - \varphi)$.

Угол φ , равный разности начальных фаз напряжения и тока, отсчитывается по оси ωt в направлении от напряжения к току и является углом острым, прямым или равным нулю $|\varphi| \leq \frac{\pi}{2}$.

Угол φ положителен при индуктивном характере цепи, т.е. при $X > 0$; при этом ток отстает по фазе от напряжения, и φ отсчитывается в положительном направлении: на

временной диаграмме вправо от напряжения к току (рис. 4, а), а на векторной диаграмме против хода часовой стрелки от тока I к напряжению U .

Угол φ отрицателен при емкостном характере цепи, т.е. при $x < 0$, при этом ток опережает по фазе напряжение, и φ отсчитывается в отрицательном направлении: на временной диаграмме влево от напряжения к току, а на векторной диаграмме – по ходу часовой стрелки от тока I к напряжению U .

Ток совпадает с напряжением по фазе при $X = X_L - X_C = 0$, т.е. при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений. Такой режим работы электрической цепи называется резонансом напряжений.

Таким образом, активное и реактивное сопротивления цепи связаны с полным сопротивлением формулами:

$$R = z \cos \varphi; \quad x = z \sin \varphi$$

Умножив правые и левые части выражений на действующее значение тока I , получим действующие значения напряжений на активном и реактивном сопротивлениях, изображаемые катетами треугольника напряжений и называемые активной и реактивной составляющими напряжения:

$$U_a = RI = z \cos \varphi I = U \cos \varphi,$$

$$U_p = XI = z \sin \varphi I = U \sin \varphi.$$

Если к зажимам электрической цепи, состоящей из параллельно соединенных элементов R , L , C , приложено гармоническое напряжение $u = U_m \cos \omega t$, то гармонический ток, проходящий через эту цепь, равен алгебраической сумме гармонических токов в параллельных ветвях (первый закон Кирхгофа): $i = i_R + i_L + i_C$.

Ток i_R в сопротивлении R совпадает по фазе с напряжением u , ток i_L в индуктивности L отстает, а ток i_C в емкости C опережает напряжение на $\pi/2$.

Ток совпадает с напряжением по фазе при $b = b_R - b_C = 0$, т.е. при равенстве индуктивной и емкостной проводимостей. Такой режим работы электрической цепи называется резонансом токов.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие токи называются переменным и постоянным?
- 2) Перечислить величины, характеризующие переменный синусоидальный ток.
- 3) Что называется действующим значением переменного синусоидального тока?
- 4) Что называется средним значением переменного синусоидального тока?
- 5) Чему равно полное сопротивление цепи переменного тока?
- 6) Что такое активная и реактивная мощность?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника. М.: Высшая школа, 2007. - 560 с.; - ISBN 078-5-06-005607-5
2. Лачин В.И., С. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X

Дополнительная

3. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника. Уч. пособие для вузов / Жаворонков М.А., Кузин А.В. М.: Академия, 2005.- 400с.; - ISBN 5-7695-1703-4

4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; ISBN 5-11-001360-8

Лекция 3

ТРЕХФАЗНАЯ СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

3.1. Принцип получения трехфазной симметричной синусоидальной системы ЭДС

Трехфазная система электрических цепей представляет собой совокупность электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные ЭДС одной и той же частоты, сдвинутые друг относительно друга по фазе и создаваемые общим источником энергии.

Если все три ЭДС равны по значению и сдвинуты по фазе на 120° по отношению друг к другу, то такая система ЭДС называется симметричной. Аналогично определяются трехфазные системы напряжений и токов.

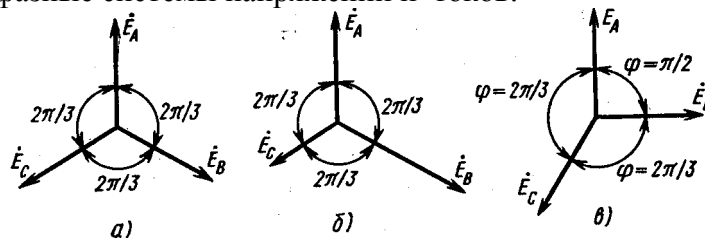


Рис. 3.1. Трехфазная система ЭДС: а — симметричная; б, в — несимметричная

Часть трехфазной системы электрических цепей, в которой может протекать один из токов трехфазной системы, называется фазой. Таким образом, фазой являются обмотка генератора, в которой индуцируется ЭДС, и приемник, присоединенный к этой обмотке. Это второе значение термина «фаза», которое широко используется в практической электротехнике.

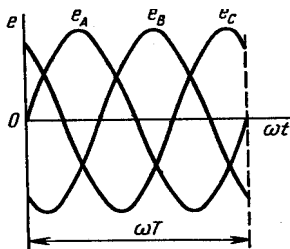
Преимущества трехфазной системы - экономичная и на большие расстояния передача электрической энергии и превосходное качество двигателей.

Трехфазная система ЭДС создается трехфазными генераторами. В неподвижной части генератора (статоре) размещают три обмотки сдвинутые в пространстве на 120° . На вращающейся части генератора (роторе) располагают обмотку возбуждения, которая питается от источника постоянного тока. Ток обмотки возбуждения создает магнитный поток Φ_0 , постоянный (неподвижный) относительно ротора, но вращающийся вместе с ним с частотой ω . Вращение ротора осуществляется каким-либо двигателем.

Благодаря конструктивным приемам магнитный поток Φ_0 в воздушном зазоре между статором и ротором распределяется по синусоидальному закону по окружности. Поэтому при вращении ротора вращающийся вместе с ним магнитный поток пересекает проводники обмоток статора и индуцирует в них синусоидальные ЭДС. Таким образом, ЭДС в каждой последующей фазе будет отставать от ЭДС в предыдущей фазе на $1/3$ периода, т. е. на угол $2\pi/3$. Если принять, что для фазы А начальная фаза равна нулю, то ЭДС фазы А

а ЭДС фаз В и С

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin(\omega t) , \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 2\pi/3) , \\ e_C &= E_m \sin(\omega t - 4\pi/3) , \end{aligned}$$



Максимальные (амплитудные) значения всех ЭДС и их частоты будут одинаковыми, так как число витков фазных обмоток одинаково и ЭДС индуцируются одним потоком Φ_0 .

Рис. 3.2. Изменение мгновенных значений трехфазной системы ЭДС

3.2. Схемы соединения элементов трехфазных устройств. Понятия о линейных и фазных токах и напряжениях

Если все нагрузочные сопротивления равны по значению и имеют одинаковый характер, нагрузка называется симметричной, в противном случае нагрузка называется несимметричной.

Возможны различные схемы соединения обмоток генератора или фаз приемника — звездой или треугольником.

3.2.1. Соединение обмоток генератора и фаз приемника звездой

Каждая фаза трехфазного генератора может являться источником питания для однофазного приемника. В этом случае схема электрической цепи имеет вид, изображенный на рис. 3.3, т. е. каждая фаза работает отдельно от других, хотя в целом цепь является трехфазной. Это трехфазная несвязанная система (на практике она никогда не применяется, но для рассмотрения вопроса очень удобна).

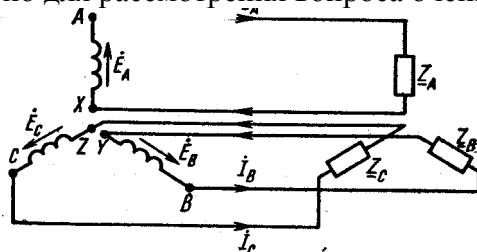


Рис. 3.3. Схема трехфазной несвязанной электрической цепи

Принимая равными потенциалы точек, соответствующих концам X, Y и Z обмоток фаз генератора, можно объединить их в одну точку N (рис. 3.4.). Концы фаз приемников (Z_A , Z_B и Z_C) также соединяем в одну точку n. Такое соединение обмоток генератора называется соединением звездой. Звездой можно соединять также фазы приемника. Точки N и n называются нейтральными, а провод, соединяющий точку N генератора с точкой n приемника, — нейтральным. Провода A—A', B—B' и C—C', соединяющие начала фаз генератора и приемника, называются линейными.

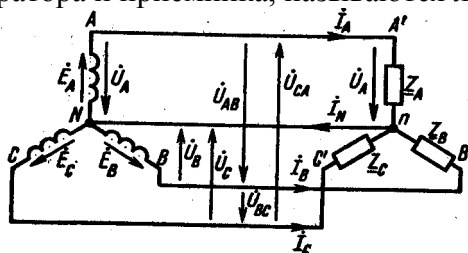


Рис. 3.4. Схема связанной четырехпроводной трехфазной цепи.

Напряжение между началом и концом фазы — фазное напряжение \dot{U}_ϕ . Таким образом, имеется три фазных напряжения — \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C . Обычно за условное положительное направление ЭДС генератора принимают направление от конца к началу фазы. Положительное направление тока в фазах совпадает с положительным направлением ЭДС, а положительное направление падения напряжения (напряжение) на фазе приемника совпадает с положительным направлением тока в фазе. Положительным направлением напряжения на фазе генератора, как и на фазе

приемника, является направление от начала фазы к ее концу, т. е. противоположное положительному направлению ЭДС.

Напряжение между линейными проводами — линейное напряжение \dot{U}_L . Таким образом, имеется три линейных напряжения — \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} , условные положительные направления которых приняты от точек, соответствующих первому индексу, к точкам, соответствующим второму индексу. Линейные напряжения определяются через известные фазные напряжения. Это соотношение может быть получено из уравнения, написанного по второму закону Кирхгофа для контура ANBA, если принять направление обхода контура от точки А к точке N и т. д. Отсюда

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A$$

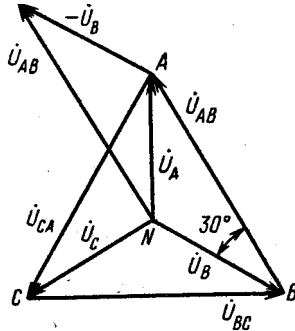


Рис. 3.5. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений при соединении фаз звездой

Таким образом, действующее значение линейных напряжений равно векторной разности соответствующих фазных напряжений.

При построении векторных диаграмм напряжений удобно принимать потенциалы нейтральных точек N и n равными нулю, т. е. совпадающими с началом координатных осей комплексной плоскости. Таким образом, на векторной диаграмме удобно направить векторы фазных напряжений от точки N к точкам A, B и C, т. е. противоположно условному положительному направлению напряжений на схемах..

Для нахождения вектора линейного напряжения $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$ необходимо к вектору напряжения \dot{U}_A добавить вектор напряжения \dot{U}_B противоположным знаком. После переноса вектора \dot{U}_{AB} параллельно самому себе он соединит точки A и B на векторной диаграмме фазных напряжений.

Аналогично строят векторы линейных напряжений \dot{U}_{BC} и \dot{U}_{CA} .

На векторной диаграмме напряжений векторы фазных напряжений образуют звезду, а векторы линейных напряжений — замкнутый треугольник. Вследствие этого векторная сумма линейных напряжений всегда равна нулю, т. е. $\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$

Так как при симметричной системе треугольник линейных напряжений равносторонний, то, чтобы найти соотношение между линейными и фазными напряжениями, надо опустить перпендикуляр из точки N на вектор напряжения \dot{U}_{AB} . Тогда $AB = U_{AB} = 2 U_B \cos 30^\circ$.

Так как $U_{AB} = U_L$, а $U_B = U_\Phi$, то $U_L = 2\sqrt{3} U_\Phi / 2 = \sqrt{3} U_\Phi$.

Таким образом, если система напряжений симметрична, то при соединении звездой линейное напряжение в $\sqrt{3} = 1,73$ раза больше фазного напряжения.

Предусмотренные ГОСТом и применяемые на практике напряжения переменного тока 127, 220, 380 и 660В как раз и отличаются друг от друга в 1,73 раза. Если $U_L = 220$

В, то $U_{\phi} = 127 \text{ В}$, что обозначают как 220/127 В. Кроме того, применяют системы 380/220 и 660/380 В.

В четырехпроводной трехфазной цепи имеется два уровня напряжения, различающихся в 1,73 раза, что позволяет использовать приемники с различным номинальным напряжением.

При подключении приемников к трехфазному генератору, обмотки которого соединены звездой, ток протекает по обмоткам генератора, линейным проводам и фазам приемника. Ток в фазах генератора или приемника называется фазным током \dot{I}_{ϕ} . Ток в линейных проводах называется линейным током $\dot{I}_{\text{л}}$. Так как обмотка генератора, линейный провод и приемник, принадлежащие одной фазе, соединяются последовательно, то при соединении звездой линейный ток равен фазному: $\dot{I}_{\text{л}} = \dot{I}_{\phi}$.

Ток в нейтральном проводе \dot{I}_N может быть определен по первому закону Кирхгофа, на основании которого для точки n можно записать уравнение $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C - \dot{I}_N = 0$

$$\text{Откуда} \quad \dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

Следовательно, ток в нейтральном проводе равен геометрической сумме фазных токов.

3.2.2. Соединение обмоток генератора и фаз приемника треугольником

Соединение обмоток генератора или фаз приемника, при котором начало одной фазы соединяется с концом другой, образуя замкнутый контур, называется соединением треугольником.

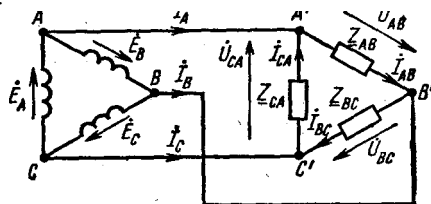


Рис. 3.6. Соединение треугольником

Напряжение между началом и концом фазы при соединении треугольником — это напряжение между линейными проводами. Поэтому при соединении треугольником линейное напряжение равно фазному напряжению: $U_{\text{л}} = U_{\phi}$.

Линейные токи можно определить из уравнений, записанных по первому закону Кирхгофа:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$$

Итак, линейные токи при соединении треугольником равны векторной разности фазных токов тех фаз, которые соединены с данным линейным проводом.

Векторная сумма линейных токов всегда равна нулю: $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$

Система линейных (фазных) напряжений при соединении треугольником образует такой же замкнутый треугольник, как и при соединении звездой. Фазные токи при симметричной нагрузке равны по значению и сдвинуты по отношению к векторам напряжений на одинаковый угол ϕ .

Линейные токи при симметричной нагрузке, соединенной треугольником, в $\sqrt{3}=1,73$ раза больше фазных. $\dot{I}_{\text{л}} = \sqrt{3} \dot{I}_{\phi}$. В общем случае, когда нагрузка несимметрична, системы фазных и линейных токов также несимметричны.

Схема соединения фаз приемника (звезда или треугольник) не зависит от схемы соединения обмоток источника питания. Электроприемник присоединяют к источнику питания, имеющему три или четыре зажима.

При трех зажимах (А, В, С) обмотки источника питания могут быть соединены как звездой без вывода нейтральной точки, так и треугольником.

При четырех зажимах (А, В, С и N) обмотки источника питания соединены звездой с выведенной нейтральной точкой. Фазы приемника могут быть соединены звездой с нейтральным проводом только в этом случае.

Преимуществом соединения источника энергии и приемника по схеме треугольник по сравнению с соединением по схеме звезда без нейтрального провода является взаимная независимость фазных токов.

3.3. Режимы работы трехфазной системы без нулевого провода и с нулевым проводом; защитное заземление

Из большого числа возможных несимметричных режимов трехфазных цепей рассмотрим только те, которые создаются приемником. При этом будем полагать, что система линейных напряжений источника питания остается симметричной и неизменной. Потенциал нейтральной точки источника питания при соединении его обмоток звездой также остается неизменным.

3.3.1. Соединение фаз приемника звездой с нейтральным проводом

Рассмотрим схему соединения фаз приемника. Сопротивление нейтрального провода, как и линейных проводов, примем равным нулю $Y_N = \infty$. При условии $U_N = 0$ звезда фазных напряжений приемника остается симметричной и неизменной при любых проводимостях фаз приемника. Ток в нейтральном проводе определяется фазными токами.

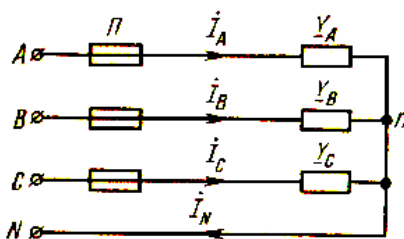


Рис. 3.7. Схема соединения фаз приемника звездой

Рассмотрим частный случай несимметричного режима, когда при симметричной активной нагрузке ($Y_A = Y_B = Y_C = G$) происходит обрыв провода.

В исходном режиме фазные токи образуют симметричную систему и ток в нейтральном проводе равен нулю. При обрыве провода А ток $I_A = 0$. Токи в фазах В и С $I_B = G\dot{U}'_B$; $I_C = G\dot{U}'_C$ останутся неизменными по значению и по фазе. Ток в нейтральном проводе $I_N = I_B + I_C$, т. е. по значению равен току I_A в исходном режиме, а по направлению противоположен ему.

При наличии нейтрального провода фазные напряжения приемника остаются постоянными при любых нагрузках фаз, и ток каждой фазы зависит только от

проводимости данной фазы. Нейтральный провод, по которому протекает ток I_N , выравнивает фазные напряжения приемника.

3.3.2. Соединение фаз приемника звездой без нейтрального провода

При отсутствии нейтрального провода нужно принять $Y_N = 0$. Тогда напряжение между точками N и n

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \cdot \underline{Y}_A + \dot{U}_B \cdot \underline{Y}_B + \dot{U}_C \cdot \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}$$

Изменение положения точки n приводит к изменению значений фазных напряжений U_A , U_B и U_C приемника, а, следовательно, и токов в его фазах. По этой причине соединение фаз приемника звездой без нейтрального провода никогда не применяют, если заведомо известно, что нагрузка по фазам будет несимметричной.

3.3.3. Соединение фаз приемника треугольником

При соединении треугольником фазное и линейное напряжения равны. Поэтому при заданных неизменных линейных напряжениях фазные напряжения на зажимах приемника останутся постоянными при любом сопротивлении фаз.

На практике несимметричные режимы, обусловленные приемником, могут быть следствием нарушения его нормальной работы.

3.3.4. Назначение нулевого провода. Защитное заземление

Система ЭДС обмоток трехфазного генератора, работающего в энергосистеме, всегда симметрична. ЭДС поддерживаются строго постоянными по амплитуде и сдвинутыми по фазе на 120° . Нагрузка же может быть как симметричной, так и несимметричной.

При симметричной нагрузке, когда сопротивления $Z_A = Z_B = Z_C$ и имеют одинаковый характер, векторы токов I_A , I_B , I_C равны по абсолютному значению и образуют трехлучевую звезду, у которой углы между лучами равны 120° . В этом случае векторная сумма токов равна нулю. Таким образом, при симметричной нагрузке нулевой провод не нужен.

Если же нагрузка несимметрична, будут неравны и токи I_A , I_B , I_C , их векторная сумма будет не равна нулю. При симметрии фазных напряжений и не симметрии нагрузки в нулевом проводе есть ток.

Представим, что нулевой провод оборвался (и ток в нем равен нулю). При этом токи в фазах должны измениться так, чтобы их векторная сумма оказалась равной нулю. Но при заданных сопротивлениях нагрузки токи могут измениться только за счет изменения фазных напряжений. При этом симметричные фазные напряжения станут несимметричными. Это приведет к нарушению нормальной работы потребителей, рассчитанных на определенное рабочее напряжение.

Таким образом, нулевой провод в четырехпроводной цепи предназначен для обеспечения симметрии фазных напряжений при несимметричной нагрузке.

Не симметрия фазных напряжений недопустима, так как приводит к нарушению нормальной работы потребителей, рассчитанных на определенное напряжение.

Нейтральный провод позволяет подключать к трехфазной сети однофазные приемники с номинальным напряжением, в $\sqrt{3}$ раз меньшим номинального линейного напряжения сети.

При прохождении электрического тока через организм человека в первую очередь поражается центральная нервная система, в результате чего нарушается работа сердечной мышцы и органов дыхания. Степень поражения зависит от силы и частоты тока, а также от пути прохождения тока через организм человека. При прочих равных условиях наибольшее физиологическое воздействие на организм человека оказывают токи частотой 50—60 Гц. Что касается силы тока, то неприятные ощущения возникают уже при токах в несколько миллиампер. При токе 25 мА (0,025 А) наступает судорожное сокращение мышц и человек оказывается не в состоянии самостоятельно разжать пальцы и освободиться от провода, находящегося под током. При токе 100 мА (0,1 А) практически мгновенно наступает паралич дыхания и сердца. Правилами техники безопасности за безусловно опасный принят ток 50 мА (0,05 А).

Значительным электрическим сопротивлением обладает только поверхностный слой кожи человека. Это сопротивление зависит от многих причин (влажности кожи, степени расширения кожных капилляров и др.) и колеблется в широких пределах — от 800 до 100000 Ом. Сопротивление резко снижается, например, при употреблении алкоголя. Если принять сопротивление тела человека равным 1000 Ом, то опасным будет ток при напряжении $U = 0,05 \cdot 1000 = 50$ В. При этом источник должен отдавать мощность $P = 50 \cdot 0,05 = 2,5$ Вт. Если мощность источника значительно меньше указанной цифры, то высокие напряжения не приводят к общему поражению организма человека, но вызывают неприятные ощущения.

При неисправности изоляции токоведущих частей электротехнических установок неизолированные металлические конструкции могут оказаться под напряжением. Под напряжением окажется и человек, коснувшийся такой металлической конструкции. Назовем это напряжение напряжением прикосновения $U_{пр}$.

Правила техники безопасности считают опасными для человека следующие напряжения прикосновения:

в сухом помещении $U_{пр} = 65$ В;

в сырых помещениях с относительной влажностью 75% и токопроводящими полами $U_{пр} = 36$ В;

в особо опасных помещениях (металлические кабины, котлы, помещения с относительной влажностью 100%) $U_{пр} = 12$ В.

При погружении в воду сопротивление тела человека значительно снижается вследствие увеличения поверхности соприкосновения тела с проводящей средой и уменьшения удельного сопротивления кожи, поэтому даже сравнительно невысокие напряжения могут оказаться смертельно опасными. По этой причине, в частности, в ванных комнатах не устанавливают розеток электропитания и выключателей, а осветительные приборы закрывают прозрачными колпаками.

Вследствие того, что сопротивление изоляции проводов электрической сети ограничено (не бесконечно велико), между линейными проводами существуют токи утечки, которые замыкаются через землю.

В почве на достаточной глубине устанавливается проводник (металлическая пластина), которая соединяется с заземляемыми деталями стальными полосами (шинами).

Если произойдет повреждение изоляции и корпус двигателя окажется соединенным с проводом сети, то человеку, прикоснувшемуся к заземленному двигателю, не

угрожает опасность. Действительно, в этом случае ток утечки распределяется между параллельными ветвями: человек - шина.

Так как сопротивление человека значительно больше, чем сопротивление заземлителя, то почти весь ток утечки пройдет через заземлитель. Это справедливо, если заземлитель правильно рассчитан и тщательно выполнен. При повышенном сопротивлении заземлителя опасность поражения человека токами утечки остается.

При нарушении изоляции проводов через параллельно соединенные заземлитель и тело человека будет проходить уже не ток утечки, а ток короткого замыкания и, несмотря на то, что сопротивление заземлителя много меньше, чем сопротивление человека, относительно небольшая часть тока короткого замыкания, проходящая через человека, в абсолютном значении может значительно превышать опасный ток 50 мА.

Иначе обстоит дело в четырехпроводных цепях трехфазного тока. Здесь можно построить такую систему защиты, которая надежно срабатывала бы при каждом пробое изоляции и попадании напряжения на корпус двигателя. Для этого достаточно корпус двигателя и другие металлические части электротехнических установок, нормально не находящиеся под напряжением, надежно соединить с помощью стальных полос или проводов с нулевым проводом. Теперь пробой изоляции приводит к короткому замыканию фазы генератора. Соответствующая плавкая вставка в течение долей секунды перегорает и отключает от сети поврежденный участок.

Такое соединение металлических частей электротехнических установок с нулевым проводом иногда называют занулением.

Для перегорания плавкой вставки нужно некоторое время. В течение этого времени человек, прикоснувшийся к поврежденному двигателю, будет соединен с линейным проводом и через его тело пройдет ток утечки. Чтобы защитить человека от тока утечки, корпус двигателя (и все металлические части электротехнических установок, не находящиеся под напряжением) нужно заземлить. Однако проще заземлить сам нулевой провод, так как все металлические части уже соединены с ним, и тогда нет необходимости тянуть дополнительные шины к электротехническим установкам. Полученная схема получила широкое распространение. Ее называют четырехпроводной сетью с заземленной нейтралью.

Категорически запрещается в четырехпроводной сети трехфазного тока с заземлением нейтралью заземлять корпуса электротехнических установок, не соединив эти корпуса с нулевым проводом.

3.5. Мощности в трехфазной системе

Мгновенное значение мощности отдельной фазы или, *фазной мощности*, определяется так же, как мощность однофазной цепи, произведением мгновенных значений фазных напряжений и тока:

$$P_A = u_A \cdot i_A, P_B = u_B \cdot i_B, P_C = u_C \cdot i_C$$

При симметричной системе фазных напряжений

$$u_A = U_{\phi m} \sin \omega t; u_B = U_{\phi m} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3});$$

$$u_C = U_{\phi m} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3})$$

В общем случае несимметричной нагрузки фазные токи равны соответственно

$$i_A = I_{\phi m} \sin(\omega t - \varphi_A); i_B = I_{\phi m} \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi_B);$$

$$i_C = I_{\phi m} \sin(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi_C)$$

Подставляя выражения для фазных напряжений и токов, получим значения фазной мощности для каждой фазы:

$$P_A = U_A I_A [\cos \varphi_A - \cos(2\omega t - \varphi_A)]; P_B = U_B I_B [\cos \varphi_B - \cos(2\omega t - \varphi_B)];$$

$$P_C = U_C I_C [\cos \varphi_C - \cos(2\omega t - \varphi_C)]$$

Постоянные составляющие мгновенных значений фазных мощностей, т. е. активные фазные мощности

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

Активная мощность трехфазного приемника равна сумме активных мощностей фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C.$$

При симметричной системе напряжений ($U_A = U_B = U_C = U_\phi$) и симметричной нагрузке ($I_A = I_B = I_C = I_\phi$; $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C$) фазные мощности равны ($P_A = P_B = P_C = U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$). Активная мощность трехфазного приемника в этом случае

$$P_A = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi$$

Мощность трехфазного приемника всегда удобнее вычислять через линейные напряжение и ток, так как линейные величины всегда легче измерять. Принимая во внимание, что при соединении фаз приемника звездой $U_\phi = U_L / \sqrt{3}$, $I_\phi = I_L$; а при соединении треугольником $U_\phi = U_L$, $I_\phi = I_L / \sqrt{3}$ формула примет вид $P = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi$.

Эта формула справедлива как для соединения звездой, так и для соединения треугольником, но только если приемник симметричен. При этом надо помнить, что угол φ является углом сдвига фаз между фазным напряжением и током. При симметричном приемнике его полная трехфазная мощность $S = \sqrt{3} U_L I_L$, а реактивная мощность $Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi$.

Рассмотрим как изменяется мощность при пересоединении фаз приемника со звезды на треугольник.

При соединении фаз приемника треугольником

$$I_{L\Delta} = \sqrt{3} I_{\phi\Delta} = \sqrt{3} U_{\Delta\phi} / Z_\phi = \sqrt{3} U_L / Z_\phi.$$

При соединении фаз приемника звездой

$$I_{LY} = I_{\phi Y} = U_{Y\phi} / Z_\phi = U_L / (\sqrt{3} Z_\phi).$$

Тогда соотношение линейных токов $\frac{I_{L\Delta}}{I_{LY}} = 3$.

Таким образом, при неизменном линейном напряжении, переключая приемник со звезды в треугольник, его мощность увеличивают в три раза: $P_\Delta = P_Y$

Действительно, при соединении фаз приемника треугольником фазное напряжение становится равным линейному, т. е. увеличивается в $\sqrt{3}$ раза по сравнению с фазным напряжением при соединении фаз приемника звездой. Следствием этого является

увеличение фазного тока $I_\phi = U_\phi / Z_\phi$ также в $\sqrt{3}$ раза. Фазная мощность увеличится в три раза, во столько же раз увеличится мощность трехфазного приемника. Этим свойством можно воспользоваться, если приемник допускает увеличение напряжения на его зажимах в $\sqrt{3}$ раза.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Принцип получения трехфазной системы ЭДС?
- 2) Каково соотношение между линейными и фазными токами и напряжениями при различных схемах подключения нагрузки?
- 3) Каково назначение нулевого провода?
- 4) Какие напряжения называются фазным и линейным?
- 5) Как найти мощность в трехфазной системе?
- 6) Для чего и как выполняется заземление?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника. М., Высшая школа, 2007. - 560 с.; - ISBN 078-5-06-005607-5
2. Лачин В.И., С. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X

Дополнительная

3. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника. Уч. пособие для вузов / Жаворонков М.А., Кузин А.В. М.: Академия, 2005.- 400с.; - ISBN 5-7695-1703-4
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; ISBN 5-11-001360-8

Лекция 4

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ. ТРАНСФОРМАТОРЫ

4.1. Назначение трансформатора

Трансформатором называется статическое устройство, предназначенное для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Первичная и вторичная системы токов и напряжений отличаются друг от друга величиной токов и напряжений, при этом полная мощность передаваемой энергии не изменяется.

$$S_1 = U_1 I_1 = S_2 = U_2 I_2$$
$$U_1 I_1 = U_2 I_2$$

Обычно приемники электроэнергии расположены на некотором расстоянии от электростанций. При передаче электрической энергии от источника до потребителя в проводах возникают потери энергии. Генераторы электростанций вырабатывают электроэнергию напряжением не выше 10—20 кВ. Энергия большой мощности при небольшом значении напряжения может быть передана только при большом значении тока. Для этого требуются провода больших сечений, иначе потери мощности $P_{\text{п}} = I^2 R_{\text{пров}} = I^2 R_0 L$, (R_0 —сопротивление 1 км линии передачи, Ом/км; L — длина линии, км) будут большими. Чем больше мощность и длина линии передачи, тем больше потери мощности. При некоторых значениях S и L передача электроэнергии становится экономически невыгодной.

Если ту же самую мощность передавать при более высоком напряжении, то ток уменьшится. Такое изменение напряжения при практически неизменной передаваемой мощности осуществляется с помощью повышающих трансформаторов. Трансформаторы могут повышать напряжение генераторов электростанций до 35, 110, 220, 330, 500, 750 кВ.

На местах потребления электроэнергии напряжение должно быть понижено до такого уровня, которое является номинальным для электроприемников (220, 380В). Для этой цели также используют понижающие трансформаторы.

4.2. Классификация трансформаторов

В зависимости от назначения:

1. **Силовые трансформаторы** - для питания потребителей электрической энергией. Увеличение напряжения осуществляется с помощью повышающих трансформаторов, уменьшение — понижающих.

2. **Специальные трансформаторы**

- сварочные,
- нагревательные,
- осветительные.

3. **Измерительные трансформаторы** - для подключения измерительных приборов.

4. **Трансформаторы радиоэлектронных устройств** подразделяют на:

- низкочастотные;
- высокочастотные.

5. *Разделительные* – отделяют участки сети с повышенной опасностью от обычной сети.

В зависимости от количества обмоток различают:

двухобмоточный трансформатор;

трехобмоточный и т. д. **многообмоточные.**

По числу фаз трансформаторы делятся на:

однофазные и трехфазные.

По способу охлаждения

- *сухие* (естественное воздушное охлаждение или с помощью вентиляторов);

- *масляные* (трансформатор в баке, заполненном трансформаторным маслом).

По расположению обмоток относительно друг друга:

- *концентрические;*

- *чередующиеся.*

По типу конфигурации магнитопроводов:

- *стержневые*, в которых обмотки охватывают стержни сердечника;

- *броневые*, в которых обмотки частично охватываются сердечником.

4.3. Конструкция и принцип действия, коэффициент трансформации

Трансформатор представляет собой замкнутый магнитопровод, на котором расположены две или несколько обмоток.

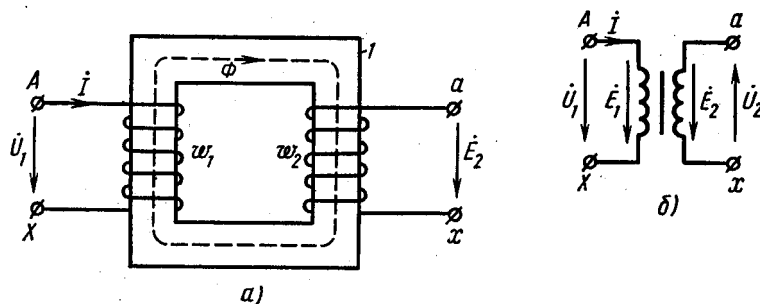


Рис. 4.1. Электромагнитная схема трансформатора (а) и его условное изображение на электрических схемах (б).

Магнитопровод трансформаторов изготавливают из стальных листов специальной электротехнической стали толщиной 0,35—0,5 мм. Стальные листы изолированы друг от друга бумажной, лаковой изоляцией (толщиной 0,04—0,6 мм) или окалиной, что позволяет уменьшить потери мощности в магнитопроводе за счет того, что вихревые токи замыкаются в плоскости поперечного сечения отдельного листа. Чем меньше толщина листа, тем меньше сечение проводника, по которому протекает вихревой ток, и тем больше его сопротивление. В результате вихревой ток и потери мощности на нагрев магнитопровода уменьшаются.

Части магнитопровода, на которых располагаются обмотки, называются стержнями. Горизонтальные части магнитопровода, не охваченные обмотками, называются верхним и нижним ярмом.

Магнитопровод броневое типа применяется для сухих трансформаторов малой мощности. Наружные броневые стержни этого магнитопровода частично защищают обмотки трансформатора от механических повреждений.

Магнитопроводы стержневых и броневых трансформаторов малой мощности можно навивать из узкой ленты электротехнической стали. Это позволяет уменьшить

воздушные зазоры в магнитопроводе и снизить магнитное сопротивление, а, следовательно, и ток холостого хода. В большинстве случаев ленточные магнитопроводы разрезают, чтобы на них легче было посадить заранее намотанные обмотки. Затем половинки магнитопроводов соединяют.

В трансформаторах, работающих при высокой частоте, магнитопроводы изготовляют из порошковых материалов (пермаллой, ферриты).

Обмотки трансформаторов обычно выполняют из медного или алюминиевого провода круглого или прямоугольного сечения. Их располагают на одном и том же сердечнике или на разных, рядом или одну под другой. Для лучшей магнитной связи между обмотками их стремятся расположить как можно ближе друг к другу. Обмотки изолируют как от стержня и ярма магнитопровода, так и друг от друга. В качестве изоляции применяют электротехнический картон, специальную бумагу или ткань, пропитанную лаком.

К одной из обмоток подводят напряжение \dot{U}_1 от источника питания. Эта обмотка называется *первичной* и имеет w_1 витков. Другая обмотка, имеющая w_2 витков, называется *вторичной*, к ней подсоединяется нагрузка.

Под действием переменного напряжения u_1 по виткам первичной обмотки протекает переменный ток i , создающий переменную магнитодвижущую силу $i w_1$, которая, в свою очередь, создает переменный основной *магнитный поток* Φ , замыкающийся по стальному магнитопроводу. Применение магнитопровода с большой магнитной проводимостью способствует увеличению магнитного потока и усилению электромагнитной связи между обмотками. Замыкаясь, магнитный поток Φ оказывается сцепленным как с первичной, так и со вторичной обмотками.

При синусоидальном первичном напряжении магнитный поток также будет синусоидальным: $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$. Магнитный поток индуцирует в первичной обмотке ЭДС *самоиндукции*, пропорциональную числу витков обмотки и скорости изменения магнитного потока:

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

где $E_{1m} = \omega w_1 \Phi_m$ — амплитуда первичной ЭДС

Как видно из формулы, ЭДС первичной обмотки отстает по фазе от магнитного потока на угол $\pi/2$.

Синусоидальный магнитный поток, сцепленный со вторичной обмоткой, индуцирует в ней ЭДС *взаимоиндукции*:

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} = -\omega w_2 \Phi_m \cos \omega t = E_{2m} \sin(\omega t - \pi/2),$$

где $E_{2m} = \omega w_2 \Phi_m$ — амплитуда вторичной ЭДС

Сравнивая, видим, что вторичная ЭДС совпадает по фазе с первичной ЭДС, т. е. также отстает по фазе от магнитного потока на угол $\pi/2$, так как обе ЭДС индуцируются одним и тем же магнитным потоком.

Так как частота ЭДС одинакова и индуцируются они одним и тем же магнитным потоком, то первичная ЭДС отличается от вторичной только в том случае, если число витков обмоток неодинаково. Чем больше число витков обмотки, тем большая ЭДС в ней индуцируется.

Отношение первичной ЭДС к вторичной называется *коэффициентом трансформации трансформатора* и равно отношению числа витков обмоток.

Коэффициент трансформации может быть как больше, так и меньше единицы.

Таким образом, при подключении первичной обмотки трансформатора к источнику переменного тока на зажимах вторичной обмотки индуцируется переменная ЭДС и вторичная обмотка становится источником питания, к которой можно присоединить какой-либо электроприемник.

Расчетные мощности трансформаторов различны – от долей вольт-ампер до десятков тысяч киловольт-ампер; рабочие частоты – от единиц герц до сотен килогерц.

4.4. Потери энергии в трансформаторе и его КПД. Внешняя характеристика трансформатора

Трансформатор – простой, надежный и экономичный электрический аппарат. Он не имеет движущихся частей и скользящих контактных соединений, его КПД достигает 99%. КПД трансформатора, определяемый как отношение мощности на выходе к мощности на входе, зависит от нагрузки. Современные трансформаторы рассчитывают таким образом, что максимум КПД достигается при нагрузке, равной примерно половине номинального значения.

Подводимая к трансформатору мощность $P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi$.

Мощность потерь в трансформаторах при холостом ходе складывается из мощности потерь в магнитопроводе и мощности потерь в проводах первичной обмотки. При этом ввиду малости тока холостого хода мощность потерь в проводах ничтожна по сравнению с мощностью потерь в магнитопроводе (кроме трансформаторов, номинальная полная мощность которых менее 1000 ВА). При номинальной полной мощности 5-50 кВА его мощность потерь составляет лишь 1,4 – 0,9 % номинальной.

Отношение отдаваемой мощности к потребляемой мощности называется коэффициентом полезного действия трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Разность между значениями P_2 , и P_1 , равная потерям мощности в трансформаторе, очень мала. Если для определения коэффициента полезного действия в формулу подставлять показания ваттметров, измеряющих мощности, то это может привести к большим ошибкам, так как точность показаний ваттметров находится в пределах разности между P_2 , и P_1 (при определенных условиях можно даже получить значение к. п. д., превышающее 100%). Поэтому КПД трансформатора определяют косвенным путем, основанным на прямом измерении мощности потерь в трансформаторе. Учитывая, что $P_2 = P_1 - \Delta P$; $P_1 = P_2 + \Delta P$, получим:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = 1 - \frac{\Delta P}{P_2 + \Delta P}.$$

Мощность потерь ΔP в трансформаторе равна сумме мощностей потерь в магнитопроводе P_c и в проводах обмоток P_{np} . При номинальных значениях первичных напряжения и тока мощности потерь в магнитопроводе и проводах обмоток практически равны активным мощностям трансформатора в опытах холостого хода и короткого замыкания соответственно.

КПД трансформатора зависит от нагрузки. Современные трансформаторы рассчитывают таким образом, что максимум КПД достигается при нагрузке, равной примерно половине номинального значения.

Внешней характеристикой трансформатора называется зависимость вторичного напряжения от тока нагрузки при постоянных значениях первичного напряжения и коэффициента мощности нагрузки: $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$.

Напряжение на вторичной обмотке отличается от напряжения при холостом ходе на значение потери напряжения в трансформаторе. Если перейти к относительным единицам, то зависимость изменения напряжения от характера нагрузки и роста тока нагрузки предстанет в виде:

$$U_2 = 100 - \beta u_k \sin \varphi_2,$$

где $\beta = \frac{I_2}{I_{2\text{ном}}}$ - коэффициент нагрузки трансформатора;

u_k - напряжение короткого замыкания трансформатора.

При активно-индуктивной нагрузке φ_2 положителен, и чем он больше, тем больше потери напряжения и тем значительнее снижение напряжения U_2 с ростом тока нагрузки. При активно-емкостной нагрузке φ_2 отрицателен, и потери напряжения также отрицательны (рис. 4.2а)

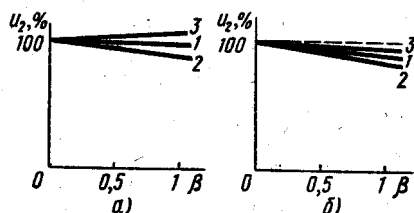


Рис. 4.2. Внешние характеристики трансформатора

Внешние характеристики трансформатора являются практически прямыми линиями. Снижение напряжения при номинальной нагрузке в очень большой степени зависит от коэффициента мощности нагрузки и напряжения короткого замыкания. Для трансформаторов малой мощности нельзя пренебрегать снижением напряжения при активной нагрузке.

4.5. Регулирование вторичного напряжения трансформатора

Различают несколько режимов работы трансформатора:

1) номинальный

При номинальном режиме:

номинальное значение напряжения $U = U_{1\text{ном}}$

тока первичной обмотки трансформатора $I = I_{1\text{ном}}$

номинальная мощность $S_{\text{ном}} = S_{1\text{ном}} = U_{1\text{ном}} I_{1\text{ном}}$

2) рабочий

напряжение первичной обмотки близко к номинальному значению или равно ему $U \approx U_{1\text{ном}}$, а ток I_1 определяется нагрузкой трансформатора;

3) режим холостого хода

Это режим ненагруженного трансформатора, при котором к первичной обмотке подведено напряжение сети, а цепь вторичной обмотки разомкнута ($I_2 = 0$) или подключена к приемнику с очень большим сопротивлением нагрузки (например, вольтметр). При холостом ходе трансформатора в его первичной обмотке течет ток, называемый током холостого хода.

В режиме холостого хода трансформатор превращается по существу в катушку с магнитопроводом.

Опыт холостого хода – это испытание трансформатора при разомкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном первичном напряжении. На основании этого опыта по показаниям измерительных приборов определяют коэффициент трансформации и мощности потерь в магнитопроводе трансформатора.

При номинальном первичном напряжении ток холостого хода составляет 3-10% от номинального первичного тока (тем меньше, чем больше номинальная полная мощность трансформатора). Кроме того, при разомкнутой цепи вторичной обмотки всегда $U_{2x} = E_{2x}$. Поэтому, измерив вольтметром первичное и вторичное напряжения в

режиме холостого хода, определяют коэффициент трансформации:
$$n = \frac{w_2}{w_1} = \frac{U_{2x}}{U_{1x}}.$$

Этот коэффициент указывается на щитках трансформаторов в виде отношения номинальных напряжений трансформатора при холостом ходе, например, 6000\230В (как отношение высшего напряжения к низшему).

При холостом ходе $I_{1x} \ll I_{1ном}$ и мощность потерь в проводах ничтожна по сравнению с мощностью потерь в магнитопроводе. Поэтому опыт холостого хода служит для определения мощности потерь в магнитопроводе трансформатора.

Режимы холостого хода и короткого замыкания возникают при авариях или специально создаются при испытаниях трансформатора.

4) режим короткого замыкания.

Режимом короткого замыкания трансформатора называется такой режим, когда выводы вторичной обмотки замкнуты токопроводом с сопротивлением, равным нулю.

При этом режиме вторичная обмотка трансформатора коротко замкнута ($U_2 = 0$) или подключена к приемнику с очень малым сопротивлением нагрузки.

Следует различать режим короткого замыкания в эксплуатационных условиях и опыт короткого замыкания. Первый представляет собой аварийный режим работы трансформатора, т.к. трансформатор сильно нагревается и перегрев может вызвать его разрушение.

Опыт короткого замыкания – это испытание трансформатора при короткозамкнутой цепи вторичной обмотки и номинальном первичном токе. Этот опыт служит для определения важнейших параметров трансформатора: мощности потерь в проводах, внутреннего падения напряжения и т.п.

В лабораторных условиях можно провести испытательное короткое замыкание трансформатора, при котором накоротко замыкают зажимы вторичной обмотки, а к первичной подводят такое напряжение U_k , при котором ток в первичной обмотке не превышает номинального значения. При этом выраженное в процентах напряжение U_k , при котором $I_k = I_{1ном}$ обозначают u_k и называют напряжением короткого замыкания трансформатора. Это характеристика трансформатора, указываемая в паспорте.

Если необходимо повысить напряжение источника питания, то число витков вторичной обмотки делают больше числа витков первичной обмотки. Такой трансформатор называется *повышающим*. Если это напряжение надо понизить, то в этом случае трансформатор будет *понижающим*. Если требуется несколько различных значений вторичного напряжения, то на тот же магнитопровод наматывают несколько вторичных обмоток с различным числом витков.

В тех случаях, когда требуется плавно изменять вторичное напряжение, применяют скользящий контакт для изменения числа витков обмотки (примерно так, как это

делается в ползунковых реостатах). Скользящий контакт используют в автотрансформаторах, рассчитанных на регулирование напряжения в небольших пределах.

Для увеличения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток увеличивают поток рассеяния, вводя в магнитопровод трансформатора шунтирующий магнитопроводящий стержень, через который замыкается часть основного магнитного потока. Изменяя значение воздушного зазора в шунтирующем стержне, можно изменять магнитный поток рассеяния. Средний подвижный стержень, выполняющий функции магнитного шунта, предусмотрен, например, в конструкции отечественного сварочного трансформатора СТАН-1.

Применяют и другие способы изменения индуктивного сопротивления рассеяния обмоток.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Назначение трансформатора.
- 2) Классификация трансформаторов.
- 3) Пояснить принцип действия трансформатора.
- 4) Что такое коэффициент трансформации, как его определить?
- 5) Чем определяются потери энергии в трансформаторе?
- 6) Что такое опыт короткого замыкания?
- 7) Как можно изменить коэффициент трансформации трансформатора?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника. М.: Высшая школа, 2007. - 560 с.; - ISBN 078-5-06-005607-5
2. Лачин В.И., С. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X

Дополнительная

3. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника. Уч. пособие для вузов / Жаворонков М.А., Кузин А.В. М.: Академия, 2005.- 400с.; - ISBN 5-7695-1703-4
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; ISBN 5-11-001360-8

Лекция 5

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

5.1. Классификация электрических машин

Электрическими машинами называются машины, принцип работы которых основан на электромагнитных явлениях (возникновение ЭДС и электромагнитного момента) и которые служат для преобразования электрической энергии в механическую или наоборот. Характерной особенностью их работы является наличие подвижной части.

По назначению все электрические машины подразделяются на **генераторы** и **двигатели**.

Генератором называется электрическая машина, предназначенная для преобразования механической энергии, подводимой к ее валу, в электрическую энергию сети. Работа генератора основана на использовании закона электромагнитной индукции, согласно которому в проводнике, движущемся в магнитном поле и пересекающем магнитный поток, индуцируется ЭДС

В двигателе происходит обратное явление: преобразование электрической энергии сети в механическую энергию, снимаемую с вала двигателя. Работа двигателя основана на создании на своем валу вращающего момента. Возникновение этого момента обусловлено действием магнитного поля статора на ротор двигателя.

Электрические машины обладают принципом обратимости, т.е. одни и те же электрические машины могут быть использованы в качестве, как двигателей, так и генераторов. Однако в зависимости от режима их применения они имеют принципиально небольшие, но существенные конструктивные отличия.

По роду тока электрические машины подразделяются на **машины постоянного тока** и **машины переменного тока**. Род тока в этом случае определяется родом тока сети, к которой подключена электрическая машина.

У электрических машин постоянного тока магнитное поле в пространстве неподвижно и при заданном режиме неизменно по величине. У машин переменного тока магнитное поле является вращающимся или пульсирующим.

В зависимости от устройства электрические машины могут быть **коллекторными** и **бесколлекторными**.

Коллектором называется полый цилиндр, устанавливаемый на вращающемся валу и собранный из изолированных одна от другой и от вала машины медных пластин. Эти пластины соединены проводниками с обмотками вала (ротора). Таким образом, через щетки, скользящие по коллектору, подается питание на вращающиеся обмотки.

Коллекторные машины применяются главным образом для работы на постоянном токе, но ряд коллекторных машин небольшой мощности используется для работы, как на постоянном, так и на переменном токе и называются они универсальными электрическими машинами.

Бесколлекторные машины – это машины переменного тока и в зависимости от принципа действия они подразделяются на **синхронные** и **асинхронные** машины.

У синхронных машин скорость вращения n находится в строго постоянном отношении к частоте сети:

$$n = \frac{60f}{p} \quad \text{или} \quad f = \frac{pn}{60},$$

где f - частота сети;

n - скорость вращения;

p - число пар полюсов.

Таким образом, у синхронных двигателей скорость вращения зависит только от частоты сети, а у синхронных генераторов частота ЭДС определяется скоростью их вращения. У асинхронных машин однозначной зависимости между скоростью вращения и частотой сети не существует.

Машины переменного тока и могут быть как *однофазными*, так и *многофазными*.

Однофазными часто выполняются асинхронные машины малой мощности, что позволяет использовать их в устройствах, питающихся от двухпроводной сети. Такие машины находят широкое применение в бытовой технике.

В зависимости от мощности электрические машины делятся на:

микромашин, имеющие мощность от долей ватта до 500 Вт;

машины малой мощности - от 0,5 кВт до 10 кВт;

машины средней мощности - от 10 кВт до нескольких сотен кВт,

машины большой мощности - свыше нескольких сотен кВт.

Единичная мощность современных электрогенераторов достигает 1500 МВт.

В зависимости от частоты вращения электрические машины подразделяются на:

средней быстроходности 300 – 1500 об/мин;

быстроходные 1500 – 6000 об/мин;

сверхбыстроходные свыше 6000 об/мин.

В свою очередь генераторы постоянного тока различаются *по способу возбуждения: с независимым возбуждением и с самовозбуждением*.

Под возбуждением генераторов понимается создание в них номинального значения основного магнитного потока. При независимом возбуждении для создания такого потока используется энергия независимого источника. В генераторах с самовозбуждением для этого используется часть мощности самого же генератора.

Следует отметить группу специальных синхронных машин – двигателей и генераторов, которые применяются в устройствах автоматики. Синхронные двигатели малой мощности этой группы различаются на следующие основные типы:

синхронные двигатели с постоянными магнитами;

реактивные двигатели;

гистерезисные двигатели;

редукторные (индукторные) двигатели;

шаговые двигатели.

Для обеспечения характеристик устройств автоматики, вычислительной техники, радиосвязи и других специальных устройств их элементы питаются напряжением переменного тока повышенной частоты, которое получается с помощью генераторов особой конструкции:

индукторные синхронные генераторы;

синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов (магнитоэлектрические генераторы).

5.2. Электрические машины переменного тока. Асинхронный двигатель. Конструкция и принцип действия асинхронного двигателя

Асинхронная машина – это бесколлекторная машина переменного тока, у которой в установившемся режиме магнитное поле, участвующее в основном процессе преобразования энергии, и ротор вращаются с разными скоростями.

Наибольшее распространение получили асинхронные двигатели, причем из всех электрических двигателей они являются самыми распространенными. Преимущества асинхронного двигателя состоят в простоте устройства, изготовления и эксплуатации, а также в большой надежности и сравнительно низкой стоимости. Широкое применение находит трехфазный асинхронный двигатель, изобретенный в конце XIX в. М.О. Доливо-Добровольским. Используют также однофазный асинхронный двигатель. Трехфазные двигатели применяют во всех отраслях народного хозяйства, однофазные – в основном в схемах автоматики, для привода электроинструмента, бытовых машин и т.п.

Промышленность выпускает асинхронные двигатели на рабочее напряжение от 127 В до 10 кВ, мощностью от долей ватта до нескольких тысяч киловатт. Однофазные асинхронные двигатели имеют мощность, как правило, не превышающую 0,5 кВт. Двигатели максимальной мощности изготавливаются на напряжение 6—10 кВ. При частоте 50 Гц синхронная частота вращения двигателей различного типа колеблется от 500 до 3000 об/мин.

Асинхронные машины могут работать в режиме генератора. Но асинхронные генераторы как источники электрической энергии не применяются, так как они не имеют собственного источника возбуждения магнитного потока и могут работать только параллельно с другими (синхронными) генераторами, имеющими лучшие показатели.

Асинхронные машины малой мощности используются как генераторы для измерения частоты вращения валов (*тахогенераторы*).

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

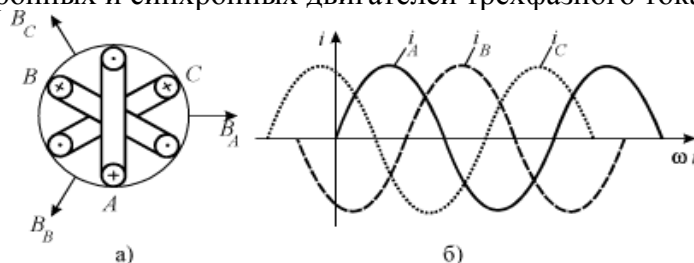


Рис. 5.1. Схема расположения катушек при получении вращающегося магнитного поля (а) и волновая диаграмма трехфазной симметричной системы токов, текущих по катушкам (б)

Вращающееся магнитное поле получают, пропуская трехфазную систему токов (рис. 5.1.б) по трем одинаковым катушкам С, В, А, оси которых расположены под углом 120° относительно друг друга.

На рис. 5.1.а показаны положительные направления токов в катушках и направления индукций магнитных полей, создаваемых каждой из катушек в отдельности.

Анализ рисунков позволяет сделать выводы:

- индукция результирующего магнитного поля с течением времени меняет свое направление (вращается);
- частота вращения магнитного поля такая же, как и частота изменения тока.

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

Асинхронный двигатель состоит из *статора* — неподвижной части и *ротора* — вращающейся части.

Статор представляет собой полый цилиндр, набранный из стальных пластин, имеющих вид кольца и изолированных друг от друга. Они образуют неподвижную часть магнитопровода. Пластины стягивают болтами. Выполнение магнитопровода из отдельных пластин уменьшает потери мощности в стали, вызываемые вихревыми токами. Стальной сердечник магнитопровода статора закрепляется в стальном или алюминиевом корпусе. С боков сердечник магнитопровода закрывается крышками, в которых имеются места для подшипников. При штамповке стальных пластин на внутренней стороне делают выступы различной формы. В результате при сборке на внутренней поверхности цилиндра статора получаются пазы, направленные вдоль образующей цилиндра. В пазы закладывают обмотку статора, которая у трехфазного асинхронного двигателя состоит из трех фазных обмоток, смещенных по окружности цилиндра друг относительно друга на 120° . Начала и концы фазных обмоток выводят наружу, они могут быть присоединены к зажимам специального щитка.

Выводы обмоток охватываются алюминиевыми хомутиками, на которых обозначены буквы и цифры, принятые для обозначения выводов. а щитке двигателя располагают выводы обмоток. Это позволяет легко и удобно с помощью коротких плоских пластин соединять обмотки статора звездой или треугольником. На паспортной пластинке, укрепленной на корпусе двигателя, указывают два номинальных линейных напряжения, различающихся в $\sqrt{3}$ раза. Если номинальное линейное напряжение источника питания равно наибольшему напряжению, указанному в паспорте двигателя, то обмотку его статора соединяют звездой, в противном случае — треугольником. При этом на зажимах фазной обмотки во всех случаях будет одно и то же значение фазного напряжения. В некоторых случаях обмотки соединены внутри двигателя и снаружи имеется только три вывода.

Ротор асинхронного двигателя также набирают из стальных штампованных листов в форме диска. Насажены на вал, они образуют ротор, имеющий форму цилиндра. По окружности диска выштамповывают отверстия, образующие пазы ротора, в которые закладывают обмотку. Форма пазов может быть различной. Двигатели большой мощности имеют ротор с вентиляционными отверстиями для охлаждения.

По конструктивному исполнению обмотки ротора асинхронные двигатели подразделяют на двигатели с короткозамкнутым ротором и двигатели с фазным ротором. Короткозамкнутая обмотка образуется медными или латунными неизолированными стержнями, помещаемыми в пазы ротора. Поперечное сечение этих стержней имеет форму паза. По торцам стержни соединяют медными короткозамыкающими кольцами, Получается обмотка, не имеющая никаких выводов.

У машин малой мощности (до 100 кВт) пазы ротора заливают расплавленным алюминием. При этом сразу отливаются стержни обмотки, короткозамыкающие кольца и вентиляционные лопасти.

Обмотку фазного ротора выполняют из изолированных проводников. В пазы ротора, аналогичные пазам статора, укладывают три фазные обмотки, сдвинутые в пространстве на 120° . Таким образом, обмотка ротора получается такой же, как и обмотка статора. Фазные обмотки ротора соединяют звездой, при этом их начала соединяют контактными кольцами, насаженными на вал и изолированными как от вала, так и друг от друга. Контактные кольца вращаются вместе с валом. По ним скользят неподвижные щетки, которые могут быть замкнуты накоротко или подсоединены к реостатам, соединенным звездой.

Пусть каждая из обмоток статора представлена в виде одного витка. Витки сдвинуты в пространстве на 120° один относительно другого. От источника питания к

обмоткам подводится трехфазная система напряжения, под действием которой по обмоткам протекает трехфазная система токов:

$$i_A = I_m \sin \omega t ;$$

$$i_B = I_m \sin [\omega t - (2 \pi / 3)];$$

$$i_C = I_m \sin [\omega t - (4 \pi / 3)];$$

Таким образом, в асинхронном двигателе с тремя фазными обмотками статора, соединенными звездой, создается вращающееся магнитное поле. Направление вращения поля определяется порядком следования фаз. Для изменения направления вращения поля достаточно поменять местами любые 2 фазы из 3-х.

Пусть это поле вращается в направлении часовой стрелки со скоростью n_1 .

При своем вращении магнитное поле статора пересекает стержни (проводники) обмотки неподвижного ротора и индуцирует в них ЭДС, а так как обмотка ротора замкнута, то в стержнях ее потекут токи.

Таким образом, проводники обмотки ротора с током находятся в магнитном поле статора и на каждый из них действует сила f . Совокупность сил f , приложенных к отдельным проводникам, создает на роторе относительно его продольной оси вращающий (электромагнитный) момент M . Если момент сопротивления M_c на валу двигателя меньше вращающего момента M , то ротор придет во вращение в направлении вращения поля статора с некоторой скоростью n_2 .

Следовательно, принцип действия трехфазного асинхронного двигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного поля статора с токами, индуцируемыми этим полем в замкнутой обмотке ротора. В результате такого взаимодействия на валу двигателя возникает вращающий момент M , который заставляет вращаться ротор двигателя.

Достичь частоты вращения поля ротор не может, т.к. тогда бы стержни его обмотки оказались бы неподвижны относительно магнитных силовых линий и индуцированные токи в обмотке ротора исчезли бы. Поэтому ротор вращается с частотой, меньше частоты вращения поля, т.е. не синхронно с полем, или асинхронно.

Если силы, тормозящие вращение ротора невелики, то ротор достигает частоты вращения, близкой к частоте вращения поля. При увеличении механической нагрузки на валу двигателя частота вращения ротора уменьшится, токи в обмотке ротора увеличиваются, что приводит к увеличению вращающего момента двигателя. При некоторой частоте вращения ротора устанавливается равновесие между тормозным и вращающим моментами.

5.3. Скольжение асинхронного двигателя и его механическая характеристика; КПД асинхронного двигателя

Если число пар полюсов двигателя p , то скорость вращения поля статора n_1 , называемая также синхронной скоростью, равна: $n_1 = \frac{60f_1}{p}$.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя – n_2 . Всегда $n_2 < n_1$.

Частоту вращения магнитного поля относительно ротора, т.е. разность $n_1 - n_2$, называют скольжением. Обычно скольжение выражают в долях частоты вращения пол

и обозначают буквой s : $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}$.

Тогда
$$n_2 = (1 - s) \frac{60f_1}{p}$$

Скольжение зависит от нагрузки двигателя. При номинальной нагрузке его значение составляет около 0,05 у машин небольшой мощности и около 0,02 у мощных машин, т.е. 2 – 5 %.

Со скольжением $s = 0$ двигатель работать не может, так как при этом скорость вращения ротора должна соответствовать скорости вращения поля статора. Но в этом случае магнитное поле статора не пересекает обмотку ротора и ток в ней равен нулю, а следовательно, двигатель не может создать вращающего момента. Чтобы преодолеть момент сопротивления, ротор двигателя должен вращаться с некоторым скольжением, при котором будет создаваться необходимый вращающий момент.

Механическая характеристика.

Механической характеристикой называется зависимость частоты вращения двигателя от вращающего момента: $n_2 = f(M)$ при $U_1 = \text{const}$

Механическая характеристика асинхронного двигателя имеет вид:

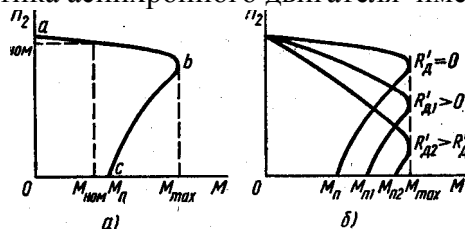


Рис 5.2. Механические характеристики асинхронного двигателя:
а – с короткозамкнутым ротором; б – с фазным ротором

На ней можно отметить:

- максимальный момент $M_{\text{макс}}$;
- пусковой момент $M_{\text{п}}$ (при пуске двигателя, т. е. при $n_2 = 0$);
- номинальный момент $M_{\text{ном}}$, соответствующий номинальному режиму работы двигателя (ему соответствует номинальная частота вращения ротора $n_{2\text{ном}}$, указываемая в паспорте двигателя).

Чтобы двигатель начал вращаться под нагрузкой, необходимо, чтобы его пусковой момент был больше пускового момента приводимого во вращение механизма. Двигатель разгоняется в соответствии с механической характеристикой: разгон начинается с точки c , затем проходит точка b и двигатель оказывается в установившемся режиме. т. е. вращается с частотой n_2 на участке $a—b$ в точке, соответствующей условию $M = M_m$ (где M_m — тормозной момент). Таким образом, точки характеристики на участке $b—c$ соответствуют разгону, а рабочим участком является участок $a—b$, на котором при изменении вращающего момента от 0 до $M_{\text{макс}}$ частота вращения двигателя меняется мало. Такая механическая характеристика называется жесткой характеристикой.

Устойчивая работа двигателя, т. е. работа при $n_2 = \text{const}$, возможна только на участке $a—b$. Если производственный механизм создает тормозной момент, увеличивающийся при увеличении частоты вращения, то устойчивая работа возможна и на участке $c—b$, но допускать такую работу не следует, так как потери в обмотках увеличиваются и двигатель может выйти из строя.

Допустим, что в исходном режиме двигатель работает в точке a' механической характеристики, т. е. имеет частоту вращения n_2^I и развивает вращающий момент M^I . Если при этом увеличивается тормозной момент от M_m^I до M_m^{II} , то возникает

неравенство моментов: $M_m < M_m^1$. Так как тормозной момент больше вращающего, ротор двигателя начинает тормозиться, увеличиваются скольжение, ЭДС и ток ротора, а следовательно, и вращающий момент двигателя. Замедление ротора продолжается до тех пор, пока не наступит равенство моментов: $M'' = M'_m$. При этом устанавливается постоянная частота вращения $n_2 = \text{const.}(n_2^{11} < n_2^1)$. Этим значениям соответствует точка a^{11} . При уменьшении тормозного момента рассматриваемые величины изменяются в обратном порядке. Таким образом, как бы ни изменялся тормозной момент, в пределах участка $a-b$ двигатель может так изменить вращающий момент, что условие его устойчивой работы всегда сохраняется. В этом заключается свойство *внутреннего саморегулирования* асинхронного двигателя.

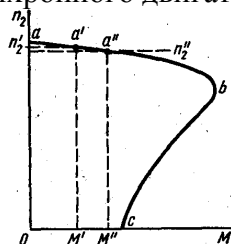


Рис. 5.3. Механическая характеристика для пояснения устойчивой работы асинхронного двигателя

Когда тормозной момент становится равным максимальному, вращающий момент начинает уменьшаться и равенств $M = M_m$, становится невозможным — двигатель останавливается. Поэтому максимальный момент называют также *опрокидывающим моментом*. По значению отношения максимального момента к номинальному ($M_{max}/M_{ном} = \gamma$) судят о перегрузочной способности двигателя. У асинхронных двигателей $\gamma = 1,7—2,5$. Для устойчивой работы двигателя нельзя допускать $\gamma < 1,7$.

Потери энергии в асинхронном двигателе складываются из потерь в обмотках статора и ротора, потерь в магнитопроводе, механических потерь и добавочных потерь.

Потери в обмотках P_m (потери в меди) пропорциональны квадрату тока и существенно изменяются при изменении нагрузки двигателя.

Потери на гистерезис и вихревые токи в магнитопроводе P_c (потери в стали) практически не зависят от нагрузки, так как магнитный поток асинхронного двигателя при изменении нагрузки почти не меняется.

Механические потери $P_{мех}$ обусловлены трением в подшипниках и о воздух вращающихся частей двигателя.

Добавочные потери $P_{доб}$ определяются пульсациями магнитного потока вследствие зубчатого строения магнитопровода и другими трудно учитываемыми факторами. Добавочные потери невелики и составляют при номинальной нагрузке около половины процента от подводимой мощности.

Для определения потерь ставят опыты холостого хода и короткого замыкания асинхронного двигателя.

КПД двигателя рассчитывают по формуле:

$$\eta = \frac{P_1 - (P_m + P_c + P_{мех} + P_{доб})}{P_1}$$

КПД асинхронного двигателя зависит от нагрузки. При номинальном режиме работы двигателя $\eta = 0,9—0,95$. Чем больше расчетная мощность двигателя, тем выше его КПД.

5.4. Электрические машины постоянного тока

В любой машине постоянного тока четко выделяются подвижная и неподвижная части. Подвижную (вращающуюся) часть машины называют ротором, неподвижную — статором.

Часть машины, в которой индуцируется электродвижущая сила, принято называть якорем, а часть машины, в которой создается магнитное поле возбуждения, — индуктором. Как правило, в машине постоянного тока статор служит индуктором, а ротор — якорем.

Обмотка вращающегося якоря соединяется с помощью коллектора и щеток с неподвижными клеммами, через которые машина включается в электрическую сеть.

Электрическое соединение вращающейся обмотки якоря с неподвижными клеммами машины осуществляется с помощью щеток, скользящих по коллектору.

Щетки вставляются в специальные обоймы щеткодержателя и прижимаются к коллектору спиральными или пластинчатыми пружинами. Щеткодержатели крепятся к траверсе, которую вместе со щетками можно поворачивать относительно статора на некоторый угол в ту или другую сторону.

Работа любой электрической машины (генератора или двигателя постоянного и переменного тока) характеризуется взаимодействием двух направленных навстречу друг другу вращающихся моментов, один из которых создается механическими, а другой — электромагнитными силами. Кроме того, работа двигателя и генератора характеризуется взаимодействием напряжения сети и ЭДС, возникающей в обмотке якоря.

5.4.1. Генераторы постоянного тока

Двигатель, в качестве которого обычно используют турбину, или двигатель внутреннего сгорания, вращает якорь в магнитном поле возбуждения. Вследствие этого вращения изменяется магнитный поток, пронизывающий витки обмотки якоря. При этом индуцируется ЭДС, пропорциональная скорости изменения магнитного потока. Для индуцирования постоянной ЭДС необходимо равномерно с (с постоянной скоростью) увеличивать или уменьшать магнитный поток Φ . Однако равномерное увеличение или уменьшение магнитного потока в течение длительного времени технически осуществить невозможно. Поэтому получение постоянной ЭДС в устройствах, основанных на законе электромагнитной индукции, невозможно.

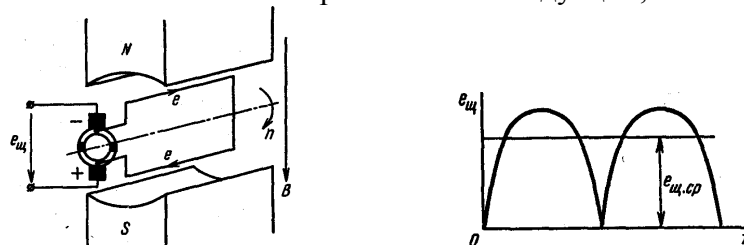


Рис. 7.4. Простейший генератор постоянного тока

Работа генератора основана на использовании закона электромагнитной индукции, согласно которому в проводнике, движущемся в магнитном поле и пересекающем магнитный поток, индуцируется ЭДС

Значение ЭДС генератора постоянного тока может изменяться, но ее полярность остается постоянной. Полюсы постоянного магнита создают магнитный поток. Представим, что обмотка якоря состоит из одного витка, концы которого присоединены к

различным полукольцам, изолированным друг от друга. Эти полукольца образуют коллектор, который вращается вместе с витком обмотки якоря. По коллектору при этом скользят неподвижные щетки.

При вращении витка в магнитном поле в нем индуцируется ЭДС. Когда плоскость витка совпадает с плоскостью осевой линии полюсов (виток расположен вертикально), проводники пересекают максимальный магнитный поток и в них индуцируется максимальное значение ЭДС. Когда виток занимает горизонтальное положение, ЭДС в проводниках равна нулю.

Направление ЭДС в проводнике определяется по правилу правой руки. Когда при вращении проводник переходит под другой полюс, направление ЭДС в нем меняется на обратное. Но так как вместе с витком вращается коллектор, а щетки неподвижны, то с верхней щеткой всегда соединен проводник, находящийся под северным полюсом, ЭДС которого направлена от щетки. В результате полярность щеток остается неизменной а, следовательно, остается неизменной по направлению ЭДС на щетках.

Хотя ЭДС простейшего генератора постоянного тока постоянна по направлению, по значению она изменяется, принимая за один оборот витка два раза максимальное и два раза нулевые значения. ЭДС с такой большой пульсацией не пригодна для большинства приемников постоянного тока и в строгом смысле слова ее нельзя назвать постоянной. Для уменьшения пульсаций обмотку якоря генератора постоянного тока выполняют из большого числа витков (катушек), а коллектор — из большого числа коллекторных пластин, изолированных друг от друга.

В реальном генераторе постоянного тока магнитный поток, пронизывающий каждый виток обмотки якоря, периодически изменяется. Соответственно изменяется и ЭДС в каждом витке обмотки по значению и направлению. Теоретически такие машины следует рассматривать как генераторы переменного тока, имеющие коллектор с бесконечно большим числом пластин.

Для получения постоянной ЭДС используют различные методы.

При большом числе витков, сдвинутых по окружности якоря на небольшие углы, пульсации результирующей ЭДС на зажимах генератора становятся пренебрежимо малыми. В этом случае машина вырабатывает напряжение, практически постоянное по значению и направлению.

При разомкнутых выходных зажимах генератора ток в обмотке якоря равен нулю. При этом генератор работает вхолостую, а приводной двигатель преодолевает только моменты трения, затрачивая минимальную механическую энергию. При подключении к генератору электрической нагрузки по обмотке якоря начинает проходить ток.

Проводники обмотки находятся в магнитном поле. В соответствии с законом Ампера возникают механические силы, направление которых определяется правилом левой руки. Нетрудно убедиться, что эти силы создают вращающий момент, направленный противоположно моменту приводного двигателя.

Чем больше мощность потребителей электрической энергии, подключенных к генератору, тем больше ток в обмотке якоря и больше силы, препятствующие его вращению. Соответственно увеличиваются и затраты механической энергии на вращение якоря генератора.

Различают:

- 1) генераторы с независимым возбуждением, обмотка возбуждения которых питается от постороннего источника (аккумулятора или другого источника постоянного тока). У генераторов малой мощности (десятки ватт) основной магнитный поток может создаваться постоянными магнитами;

2) генераторы с самовозбуждением, обмотка возбуждения которых питается от самого генератора. По схеме соединения обмоток якоря возбуждения по отношению к внешней цепи бывают: генераторы параллельного возбуждения, у которых обмотка возбуждения включен параллельно с обмоткой якоря (шунтовые генераторы); генератор последовательного возбуждения, у которых эти обмотки включены последовательно (сериесные генераторы); генераторы смешанного возбуждения, у которых одна обмотка возбуждения включена параллельно обмотке якоря, а вторая — последовательно (компаундные генераторы).

5.4.2. Двигатели постоянного тока

Если подключить машину постоянного тока к электрической сети, через обмотку якоря потечет ток. В соответствии с законом Ампера на проводники обмотки якоря, находящиеся в магнитном поле возбуждения, действуют механические силы. Эти силы создают вращающий момент, под действием которого якорь начинает раскручиваться.

Вращающийся вал якоря используют для привода в действие различных механизмов: подъемных и транспортных средств, станков, швейных машин и т. д.

Исходя из закона сохранения энергии можно считать, что мощность, потребляемая двигателем из сети, тем больше, чем больше механическая нагрузка на его валу. Однако для понимания сущности работы электрического двигателя важно проследить, каким образом изменение механической нагрузки сказывается на электрической мощности, потребляемой двигателем.

Обмотка якоря двигателя вращается в магнитном поле возбуждения. В этих условиях в соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотке якоря возникает ЭДС. Применяя правило правой руки, нетрудно установить, что она направлена навстречу приложенному напряжению сети. Поэтому ее назвали противо-ЭДС. Именно противо-ЭДС является фактором, регулирующим потребление электрической мощности из сети.

По закону электромагнитной индукции противо-ЭДС прямо пропорциональна скорости изменения магнитного потока, пронизывающего витки обмотки якоря. Следовательно, с уменьшением частоты вращения якоря уменьшается и противо-ЭДС.

Если механическая нагрузка на валу двигателя отсутствует (двигатель работает вхолостую) вращающему моменту двигателя препятствуют только моменты трения, и частота вращения якоря достигает максимального значения. При этом противо-ЭДС почти полностью компенсирует напряжение сети и через обмотку якоря проходит минимальный ток. Соответственно электрическая мощность, потребляемая из сети, минимальна.

При подключении механической нагрузки частота вращения якоря уменьшается, а, следовательно, уменьшится и значение противо-ЭДС. Ток и электрическая мощность, потребляемые двигателем из сети, возрастут.

Таким образом, противо-ЭДС в двигателе выполняет функции дросселя, регулирующего поступление мощности из сети.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Что такое скольжение двигателя? К каким электрическим машинам это понятие относится?
- 2) Назначение коллектора в электрической машине.
- 3) Чем обусловлены потери в электрических машинах?

- 4) Пояснить принцип действия асинхронного двигателя.
- 5) Классификация электрических машин.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника. М., Высшая школа, 2007. - 560 с.; - ISBN 078-5-06-005607-5
2. Лачин В.И., С. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X

Дополнительная

3. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника. Уч. пособие для вузов / Жаворонков М.А., Кузин А.В. М.: Академия, 2005.- 400с.; - ISBN 5-7695-1703-4
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; ISBN 5-11-001360-8

Лекция 6

ЭЛЕМЕНТНАЯ БАЗА ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

6.1. Классификация элементной базы

Элементной базой современных электронных устройств являются электровакуумные и полупроводниковые приборы.

Электровакуумные приборы – электронные приборы, в которых проводимость осуществляется посредством электронов или ионов, движущихся между электродами через вакуум или газ.

Электровакуумные приборы подразделяются на **электронные и ионные**.

Электронные - через них проходят электроны, не создавая ионизации. Длина свободного пробега электрона больше расстояния между электродами, давление 10^{-6} мм рт. ст.

Ионные (газоразрядные) - создается ионизация, давление 10^{-3} мм рт. ст.

В н.в. применение электронных ламп ограничено в связи с развитием полупроводниковой техники. Однако при больших частотах и мощностях лампы еще находят широкое применение.

Полупроводниковые приборы – электронные приборы, в которых применяются вещества, проводимость которых зависит от их кристаллической решетки и внешних воздействий (температура, свет, эл. поле, потоки быстрых частиц).

Полупроводниковые приборы подразделяются на: **диоды, транзисторы, фотоприборы, индикаторные приборы**.

6.2. Электропроводимость полупроводников

Все вещества образованы атомами, состоящими из положительно заряженных ядер и вращающихся вокруг них отрицательно заряженных электронов. Структура полупроводника напоминает кристаллическую решётку алмаза. Полупроводник имеет жёсткую структуру за счёт ковалентных связей между атомами. Важнейшим свойством полупроводников является сильная зависимость их проводимости от температуры окружающей среды, светового потока, примесей, ионизирующего облучения.

Носителями тока в полупроводниках являются электроны и дырки.

Дырка – условный термин, который применяется к атому кристаллического вещества, у которого выбит один электрон. Дырка характеризуется положительным зарядом, равным по величине заряду электрона.

В идеальных кристаллах электроны и дырки являются всегда парами, так что концентрации обоих типов носителей равны. Электроны и дырки могут перемещаться в полупроводнике под действием электрического поля. Это делает кристалл способным проводить электрический ток. Проводимость, обусловленная образовавшимися зарядами, называется собственной проводимостью полупроводника.

В реальных кристаллах, содержащих примеси и дефекты структуры, это равенство может нарушаться и проводимость осуществляется только одним типом носителей. В отличие от собственной проводимости полупроводников, проводимость, обусловленная примесными атомами, называется примесной. Характером носителей зарядов и значением примесной электропроводности можно управлять, подбирая состав и концентрацию примесей.

Если в решетку германия внести примесь пятивалентного вещества, например сурьмы, то четыре ее электрона вступят в ковалентную связь с соседними атомами германия. Пятый электрон сурьмы слабо связан с кристаллической решеткой и, легко отрываясь, становится свободным. На месте ушедшего электрона образуется неподвижный положительный ион. При наличии электрического поля перемещаться могут только электроны. Поэтому полупроводники такого типа получили название полупроводников n-типа.

Если в германий добавить трехвалентную примесь, например, индия, то для образования устойчивой структуры индию не хватит одного электрона и одно место в решетке окажется вакантным. На это место может перейти электрон из соседнего атома. Тогда на месте ушедшего электрона образуется дырка, а примесный атом индия превращается в связанный отрицательный заряд. В электрическом поле будут перемещаться только дырки. Полупроводники такого вида получили название p-полупроводники.

В полупроводниках различают два вида токов.

1. **Ток проводимости.** Ток проводимости возникает в полупроводниках за счет перемещения электрических зарядов под действием электрического поля.

2. **Ток диффузии.** Током диффузии называется перемещение электрических зарядов за счет разности концентраций этих зарядов.

Электронно-дырочным переходом называют контакт между полупроводниками, обладающими соответственно электронной и дырочной проводимостью. Такой переход сокращенно называют **p—n -переходом**. Рассмотрим явления на переходе.

До соединения оба полупроводника были электрически нейтральны. После соединения, за счет разности концентраций, возникает диффузия электронов в p-область, где они рекомбинируют с основными носителями, и дырок в n-область. В результате этого p-область зарядится отрицательно, а n-область положительно и между ними возникнет электрическое поле. Участок соприкосновения будет обеднен свободными носителями. Этот участок получил название запирающего слоя. Возникшее электрическое поле прекратит дальнейшую диффузию зарядов, и на переходе возникнет равновесие.

Установившееся равновесие – динамическое. За счет температуры в запирающем слое все время генерируются пары, которые под действием электрического поля создают ток проводимости, направленный от n к p- области. Ток проводимости уменьшает величину электрического поля (потенциальный барьер), что приводит к поддержанию тока диффузии, направленного от p к n-области. Таким образом, через p—n- переход все время проходят два тока — ток диффузии и ток проводимости, равные по величине и обратные по направлению. Величина тока проводимости определяется температурой и изменяется по закону экспоненты. Для практических расчетов можно считать, что ток проводимости увеличивается в два раза при изменении температуры на 10°.

Прямой p-n переход называется переход, подключенный к источнику напряжения. Причем p - область подключена к плюсу, а n - область к минусу источника. В результате такого подключения внешнее поле источника накладывается на внутреннее поле перехода и потенциальный барьер уменьшается. Так как ток проводимости зависит только от температуры, то он остается постоянным. Ток диффузии увеличивается, и результирующий ток через переход равен их разности и имеет направление тока диффузии. Увеличение тока диффузии происходит потому, что через переход могут диффундировать только те дырки, энергия которых больше величины потенциального барьера.

Обратным переходом называется переход, образованный при подключении p-области к минусу источника, а n-области к его плюсу. В этом случае потенциальный барьер увеличивается.

При отсутствии внешнего электрического поля дырки перемещаются хаотически. Если же приложить к кристаллу разность потенциалов, то под действием созданного электрического поля движение дырок и электронов становится упорядоченным и в кристалле возникает электрический ток. Таким образом, проводимость полупроводника обусловлена перемещением как отрицательно заряженных электронов, так и положительно заряженных дырок. Соответственно различают два типа проводимости – *электронную*, или проводимость n-типа, и *дырочную*, или проводимость p-типа.

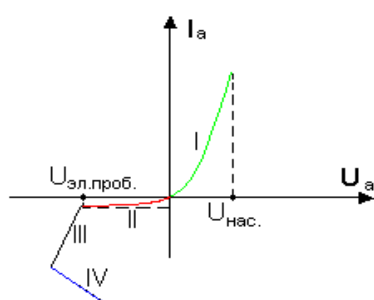
Полярность внешнего напряжения, приводящая к снижению потенциального барьера, называется прямой, открывающей, а созданный ею ток – прямым. При подаче такого напряжения p-n-переход открыт.

Если к p-n-структуре приложить напряжение обратной полярности, эффект будет противоположным. Тем не менее, при обратном напряжении наблюдается протекание небольшого тока $I_{обр}$. Этот ток в отличие от прямого определяется носителями не примесной, а собственной проводимости, образующейся в результате генерации пар «свободный электрон – дырка» под воздействием температуры. Значение обратного тока практически не зависит от внешнего напряжения. Это объясняется тем, что в единицу времени количество генерируемых пар «электрон – дырка» при неизменной температуре остается постоянным, и даже при $U_{обр}$ в доли вольт все носители участвуют в создании обратного тока.

При подаче обратного напряжения p-n-переход уподобляется конденсатору, пластинами которого являются p- и n-области, разделенные диэлектриком. Роль диэлектрика выполняет приграничная область, почти свободная от носителей заряда. Эту емкость p-n-перехода называют *барьерной*. Она тем больше, чем меньше ширина p-n-перехода и чем больше его площадь.

6.3. Полупроводниковые диоды

Полупроводниковым диодом называется устройство, представляющее собой два соединенных полупроводника различной проводимости.



При приложении внешнего напряжения к диоду в прямом направлении («+» на анод, а «-» на катод) уменьшается потенциальный барьер, увеличивается диффузия – диод открыт. При приложении напряжения в обратном направлении увеличивается потенциальный барьер, прекращается диффузия – диод закрыт.

$U_{эл.проб.} = 10 \div 1000$ В – напряжение электрического пробоя. $U_{нас.} = 0,3 \div 1$ В – напряжение насыщения.

Рис. 6.1. ВАХ полупроводникового диода

Основные параметры полупроводниковых диодов:

Максимально допустимый средний за период прямой ток ($I_{пр. ср.}$) – это такой ток, который диод способен пропустить в прямом направлении.

По прямому току диоды делятся на три группы:

- 1) Диоды малой мощности ($I_{пр. ср.} < 0,3$ А)
- 2) Диоды средней мощности ($0,3 < I_{пр. ср.} < 10$ А)

3) Диоды большой мощности ($I_{пр.ср} > 10 \text{ A}$)

Диоды малой мощности не требуют дополнительного теплоотвода (тепло отводится с помощью корпуса диода). Для диодов средней и большой мощности, которые не эффективно отводят тепло своими корпусами, требуется дополнительный теплоотвод.

Постоянное прямое напряжение ($U_{пр.}$)

Постоянное прямое напряжение – это падение напряжения между анодом и катодом при протекании максимально допустимого прямого постоянного тока. Проявляется особенно при малом напряжении питания.

$U_{пр. Ge} \approx 0.3 \div 0.5 \text{ В}$ (Германиевые) $U_{пр. Si} \approx 0.5 \div 1 \text{ В}$ (Кремниевые)

Повторяющееся импульсное обратное максимальное напряжение ($U_{обр. max}$)

Электрический пробой идет по амплитудному значению (импульсу) $U_{обр. max} \approx 0.7 U_{Эл. пробоя}$ (10÷100 В). Для мощных диодов $U_{обр. max} = 1200 \text{ В}$.

Этот параметр иногда называют классом диода (12 класс - $U_{обр. max} = 1200 \text{ В}$)

Максимальный обратный ток диода ($I_{max.обр.}$)

Соответствует максимальному обратному напряжению (составляет единицы мА).

Для кремниевых диодов максимальный обратный ток в два раза меньше, чем для германиевых.

Дифференциальное (динамическое) сопротивление: $R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I}$.

В зависимости от конструкции и материала диоды имеют различное назначение:

Выпрямительные диоды. Имеют большую площадь контакта и используются для выпрямления переменного тока.

Детекторные диоды. Имеют малую собственную емкость перехода и используются для работы на высоких частотах.

Стабилизаторы. Изготавливаются из специального материала, не разрушающегося при пробое. У такого диода при пробое напряжение остается постоянным. Применяется для ограничения электрических сигналов по току и напряжению. (Используются в стабилизаторах напряжения.)

Варикапы. На p-n-переходе образуются связанные заряды, которые создают емкость перехода. Величина этих зарядов зависит от величины приложенного напряжения. Такие диоды используются как конденсаторы переменной емкости за счет изменения напряжения на переходе. С увеличением напряжения емкость варикапа уменьшается.

Туннельные диоды. Изготавливаются из полупроводников с большим количеством примеси. В результате этого при малых напряжениях возникает туннельный эффект и ток через переход резко увеличивается. Наличие участка с падающей характеристикой позволяет использовать туннельный диод в качестве генератора высокочастотных колебаний.

Динистор. Представляет собой три последовательно включенных p-n-перехода. В результате такого включения в исходном состоянии через прибор протекает малый ток. При увеличении напряжения возникает лавинный пробой.

Тиристор. По своему устройству напоминает динистор, но у него имеется вывод от первого p-слоя, на который подается управляющее напряжение. В результате подачи прямого напряжения на управляющий вывод появляется возможность регулировать величину напряжения пробоя. Тиристор – полупроводниковый прибор с несколькими чередующимися слоями n-p проводимости, чаще четырехслойной структуры p-n-p-n. Тиристоры предназначены для ключевого управления электрическими сигналами в режиме открыт - закрыт (управляемый диод).

6.4. Транзисторы

Транзистором называется прибор, состоящий из трех слоев полупроводника (р-п-р или п-р-п) и двух р-п переходов. Каждый слой полупроводника через контакт металл-полупроводник подсоединен к внешнему выводу. Средний слой и соответствующий вывод называют базой, один из крайних слоев и соответствующий вывод называют эмиттером, другой крайний слой и соответствующий вывод – коллектором. Количество примеси в базе значительно меньше, чем в коллекторе и эмиттере.

Транзистор называют биполярным, т.к. в процессе протекания электрического тока участвуют носители электричества двух знаков – электроны и дырки.

Работа биполярного транзистора основана на взаимодействии двух р-п – переходов. Это взаимодействие обеспечивается тем, что толщину средней области транзистора (базы), разделяющей переходы, выбирают меньше длины свободного пробега (диффузионной длины) носителей заряда в этой области. Биполярные транзисторы предназначены для усиления сигналов и управления током в схемах полупроводниковой электроники

Существует два типа транзисторов: с прямой проводимостью (р-п-р) и с обратной проводимостью (п-р-п).

Э-Б – эмиттерный переход Б-К – коллекторный переход.

Особенности конструкции: толщина базы должна быть меньше длины свободного пробега носителей зарядов. Концентрация основных носителей (примеси) в эмиттере должна быть много больше, чем в базе (для р-п-р перехода).

Полевой транзистор — это полупроводниковый прибор, имеющий три электрода: исток, сток и затвор. Между истоком и стоком в кристалле полупроводника, из которого выполнен полевой транзистор, расположен канал, через который течет ток транзистора. Канал выполняется из полупроводника одного типа — п или р. Управление током, текущим через канал, осуществляется путем изменения проводимости канала, которая зависит от напряжения между затвором и истоком. В отличие от биполярных транзисторов, в которых ток транзистора от эмиттера к коллектору течет последовательно через два р-п-перехода, в полевых транзисторах ток течет через канал, который образуется в полупроводнике одного типа проводимости, и через р-п-переходы не течет. Так как направление тока в полевом транзисторе—от истока — через канал — к стоку, а управление током осуществляется напряжением между затвором и истоком, то исток соответствует эмиттеру биполярного транзистора, сток — коллектору, а затвор — базе. Изменение проводимости канала может осуществляться двумя способами. В зависимости от этого полевые транзисторы делятся на два основных вида: транзисторы с управляющим р-п- переходом и транзисторы с изолированным затвором.

Преимущества полевых транзисторов:

- 1) высокое входное сопротивление в схеме с ОИ;
- 2) малый уровень собственных шумов, так как перенос тока осуществляют только основные для канала носители и, следовательно, нет рекомбинационного шума;
- 3) высокая устойчивость против температурных и радиоактивных воздействий;
- 4) высокая плотность расположения элементов при изготовлении интегральных схем.

Индикаторными приборами называют приборы, предназначенные для визуального представления информации.

Фотоэлектрическими называют электронные приборы, преобразующие энергию светового излучения в электрическую энергию.

Фоторезистор — полупроводниковый прибор, электрическое сопротивление которого изменяется в зависимости от интенсивности и спектрального состава внешнего излучения.

Фотодиод по структуре аналогичен обычному полупроводниковому диоду. Отличие состоит в том, что его корпус снабжен дополнительной линзой, создающей внешний световой поток, направленный, как правило, перпендикулярно плоскости р-п-перехода.

Фототранзистор по структуре аналогичен структуре биполярного транзистора. Он обладает более высокой чувствительностью, чем фотодиод.

Оптоэлектронный прибор содержит одновременно источник и приемник световой энергии. Для оптопары как входным, так и выходным параметром является электрический сигнал, причем гальваническая связь между входной и выходной цепями отсутствует. В качестве излучателя оптопары могут быть использованы инфракрасный излучающий диод, светоизлучающий диод, люминесцентный излучатель или полупроводниковый лазер. Наибольшее распространение в настоящее время получил инфракрасный излучающий диод, что объясняется простотой его структуры, управления и высоким кпд. В качестве приемника оптопары находят применение рассмотренные, выше фотоэлектрические приборы: фоторезистор, фотодиод, фототранзистор и др.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие приборы являются элементной базой электроники?
- 2) В чём отличие электронных и ионных приборов?
- 3) Какие виды токов протекают в полупроводниках, чем они вызываются?
- 4) Что называется полупроводниковым переходом, какой переход называется прямым и обратным?
- 5) Перечислить типы полупроводниковых диодов.
- 6) Какие параметры характеризуют диоды?
- 7) Какие типы транзисторов Вы знаете?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Миловзоров О.В. Электроника: Уч. пособие для вузов / Миловзоров О.В., Панков И.Г. М.: Высшая школа, 2006. - 288с.; - ISBN 5-06-004428-9
2. Бородин И.Ф. Основы электроники: Уч. пособие для вузов / Бородин И.Ф., Шогенов А.Х., Судник Ю.Ф. М.: КолосС, 2009. – 207с.; - ISBN 978-5-9532-0712-6

Дополнительная

3. Лачин В.И. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; ISBN 5-11-001360-8

Лекция 7

ЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

7.1. Общие сведения об электронных устройствах

Основными задачами электроники являются приём, обработка, передача и хранение информации. Выполнение этих задач производится с помощью электронных устройств.

Электронное устройство – это изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы электроники.

В зависимости от характера используемых сигналов электронные устройства подразделяются на аналоговые и цифровые (дискретные).

Основными типами **аналоговых** электронных устройств являются:

усилители; фильтры; генераторы; источники вторичного электропитания.

Цифровые (дискретные) электронные устройства – это электронные устройства, использующие сигналы двух уровней – высокого и низкого. При этом обычно имеют в виду уровни напряжения, а не тока.

Цифровые электронные устройства конструируют таким образом, чтобы воздействие некоторого сигнала определялось не конкретным значением его напряжения, а тем, к какому из двух разновидностей сигнала (высокого или низкого уровня) этот сигнал относится.

7.2. Средства электропитания электронной аппаратуры

Для питания электронных и других устройств используются источники вторичного электропитания. Генераторы, аккумуляторные батареи – это первичные источники электропитания потребителей. Но потребители могут требовать для их питания напряжения других величин, токи другого рода. Эти преобразования осуществляются с помощью вторичных источников электрической энергии. К ним можно отнести электромашинные и статические преобразователи (трансформаторы, выпрямители).

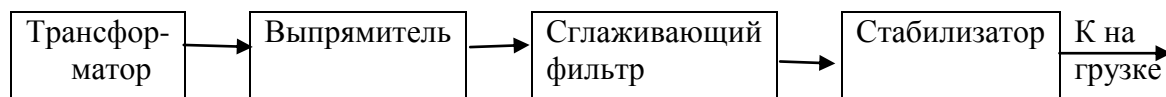
$\sim \rightarrow \sim$ трансформаторы;

$\sim \rightarrow =$ выпрямители;

$= \rightarrow \sim$ электромашинные и статические преобразователи. С их помощью может также вестись преобразование ($\square \rightarrow \square$), если необходимо производить изменение частоты);

$= \rightarrow =$ делители напряжения, усилители. Данное преобразование может осуществляться многоступенчато.

Типичная структурная схема такого источника имеет вид:



Трансформатор изменяет напряжение сети U_c до значения, необходимого для вентильной группы, электрически отделяет потребителя от сети.

Вентильная группа преобразует переменный ток в пульсирующий однонаправленный. В простейшем случае вентильная группа может состоять из одного

диода (однополупериодный выпрямитель), на четырех диодах может быть построена вентиляльная группа двухполупериодного выпрямителя.

Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации выпрямленного напряжения до величины, допустимой для работы нагрузки. Простейший фильтр состоит из одного конденсатора или одного дросселя. Более сложные – из соединения дросселя и конденсатора или конденсатора и резистора. Для улучшения сглаживания пульсаций применяют многосвязные фильтры, состоящие из нескольких последовательно включенных звеньев.

Стабилизатор поддерживает напряжение на нагрузке постоянным при изменяющемся входном напряжении и токе нагрузки в некотором диапазоне.

Выпрямители широко применяются в различных электронных аппаратах, так как большинства блоков этих аппаратов требует питания постоянным током.

Современные выпрямители различают по типу вентиляей, схеме их включения и числу фаз источника переменного напряжения.

Выпрямители подразделяют также на управляемые и неуправляемые. В неуправляемых выпрямительных устройствах для преобразования синусоидального тока в постоянный применяются полупроводниковые диоды, в управляемых выпрямительных устройствах – тиристоры.

При питании от однофазной сети применяются следующие схемы выпрямителей:

- однополупериодные;
- двухполупериодные.

7.3. Однофазные выпрямительные устройства

7.3.1. Однополупериодный выпрямитель

На рис. 7.1.а представлена схема однополупериодного выпрямителя:

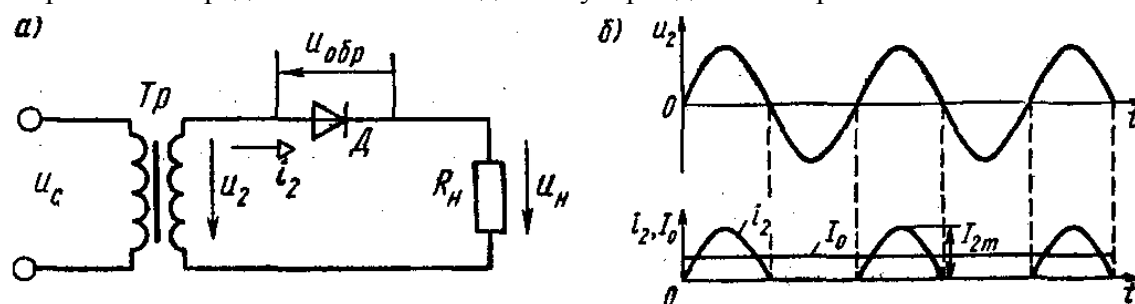


Рис. 7.1. Схема однополупериодного выпрямителя и напряжение на зажимах вторичной обмотки трансформатора и ток в нагрузке

Переменное синусоидальное напряжение u_2 (рис.3.3.) подают на диод. За счет односторонней проводимости диодов ток i_2 проходит только в положительные полупериоды напряжения u_2 и, следовательно, имеет импульсную форму. Постоянная составляющая этого тока I_0 определяется средним значением тока i_2 , проходящего через нагрузку R_H за полупериод.

Среднее значение тока за полупериод: $I_0 = 0,318 I_{2m}$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения на R_H определяется законом Ома:

$$U_0 = I_0 R_H = 0,318 I_{2m} R_H = 0,318 U_{2m}$$

Однополупериодная схема наиболее проста и содержит всего один диод. В положительный полупериод напряжения на вторичной обмотке трансформатора диод находится в проводящем состоянии и через него протекает ток в нагрузку; а в отрицательный - диод закрыт, и тока в нагрузке нет. Следовательно, ток в нагрузке протекает в одном направлении и только в один положительный полупериод напряжения вторичной обмотки трансформатора.

7.3.2. Двухполупериодный выпрямитель

Наиболее широкое распространение получила мостовая схема двухполупериодного выпрямителя:

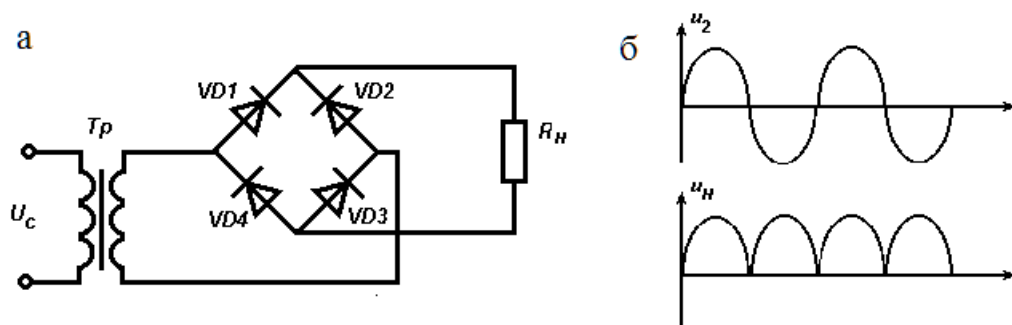


Рис. 7.2. Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя

Схема состоит из силового трансформатора T_p и четырех диодов $D_1—D_4$. К диагонали моста ac подключена вторичная обмотка трансформатора, к диагонали bd — сопротивление нагрузки R_n .

В положительный полупериод напряжения u_2 , когда потенциал точки a выше потенциала точки c , открыты диоды D_1 и D_3 и ток проходит по цепи: точка a , диод D_1 , сопротивление нагрузки R_n , диод D_3 , точка c . В отрицательный полупериод напряжения u_2 открыты диоды D_2 и D_4 и теперь ток проходит по цепи: точка c , диод D_2 , R_n , диод D_4 , точка a . Через сопротивление нагрузки R_n ток проходит все время в неизменном направлении. Таким образом, ток в нагрузке имеет форму, показанную на рис.3.4.б, что и соответствует двухполупериодному выпрямлению.

Постоянная составляющая тока нагрузки I_0 определяется, как и в схеме однополупериодного выпрямителя, средним значением тока i_n :

$$I_0 = 2 \int_0^{\pi} 0,318 I_{2m} = 0,636 I_{2m} ,$$

т. е. в двухполупериодном выпрямителе постоянная составляющая тока в два раза больше, чем в однополупериодном.

Так как в мостовой схеме через вторичную обмотку трансформатора проходит синусоидальный ток i_2 , то $I_{2m} = \sqrt{2} I_2$ и, $I_0 = 0,9 I_2$.

Сравнив это значение тока с I_0 для однополупериодного выпрямителя, приходим к выводу, что в данной схеме гораздо лучше используются обмотки трансформатора по току. Это позволяет значительно уменьшить габариты трансформатора.

Найдем теперь соотношение между U_0 и U_2 . Так как постоянная составляющая напряжения $U_0 = I_0 R_n$, то $U_0 = 0,636 I_{2m} R_n$. Если учесть, что $R_n \ll R_{пр.д}$, то

$$I_{2m} R_n = U_{2m} , \quad \text{т.е. } U_0 = 0,636 U$$

Так как $U_{2m} = \sqrt{2} U_2$, то получим $U_0 = 0,9 U_2$.

Обратное напряжение, действующее на каждый диод в данной схеме такое же, как в схеме однополупериодного выпрямителя. Действительно, когда диоды D_1 и D_3

открыты, к диоду D_2 приложено полное обратное напряжение вторичной обмотки через открытый диод D_1 . Точно такое же обратное напряжение приложено и к диоду D_4 . Следовательно, $U_{обрм} = U_{2m} = \sqrt{2} U_2 = 1,57 U_0$.

Данная схема характеризуется хорошим использованием элементов выпрямителя и трансформатора. Поэтому в настоящее время она находит наибольшее применение для выпрямления однофазного тока.

7.4. Фильтры

Так как выпрямленное напряжение – пульсирующее, для получения постоянного напряжения на выходе выпрямителя обычно ставят сглаживающий фильтр. Сглаживающий фильтр – это устройство, предназначенное для уменьшения переменной составляющей выпрямленного напряжения. Степень пульсации выпрямленного напряжения характеризуется коэффициентом пульсаций, который равен отношению амплитуды первой (основной) гармоники пульсаций к среднему значению выходного напряжения:

$$K_n = \frac{\tilde{U}_{\max}}{U_{cp}},$$

где \tilde{U}_{\max} – амплитуда переменной составляющей;

U_{cp} – среднее значение выпрямленного напряжения.

Сглаживающее действие фильтра характеризуется его коэффициентом сглаживания, который равен отношению коэффициента пульсации на входе фильтра к коэффициенту пульсации на выходе фильтра.

Наиболее простым из фильтров является конденсатор, включенный параллельно нагрузке:

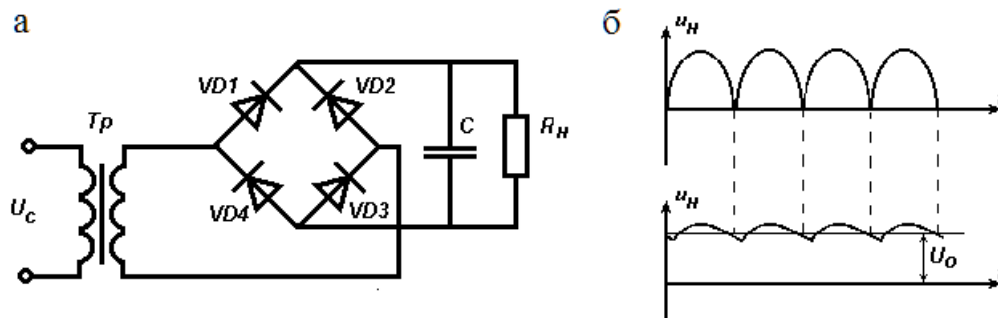


Рис. 7.3. Схема двухполупериодного выпрямителя с фильтром.

На протяжении положительного полупериода ток через диод будет протекать лишь тогда, когда напряжение вторичной обмотки больше напряжения на конденсаторе. Конденсатор в эти промежутки времени будет заряжаться током, протекающим через диод. Напряжение на конденсаторе и нагрузке возрастает по экспоненциальному закону, а скорость нарастания зависит от постоянной времени цепи заряда конденсатора $\tau_3 \approx C r_0$, где C – емкость конденсатора, а r_0 – внутреннее сопротивление выпрямителя, которое для данной схемы равно сумме внутреннего сопротивления диода и активного сопротивления вторичной обмотки трансформатора.

Когда диод не проводит ток, конденсатор разряжается на сопротивление нагрузки, причем ток в нагрузке имеет прежнее направление. Напряжение на конденсаторе

уменьшается по экспоненциальному закону, и скорость разряда зависит от постоянной цепи разряда конденсатора $\tau_p \approx Cr_H$.

Если $\tau_p > T_C$, где T_C - период напряжения сети, то к моменту начала следующего заряда конденсатор не успеет разрядиться и напряжение на нагрузке не падает до нуля. Временные диаграммы напряжений на выходе выпрямителя u_H представлены на рис.3.5.б. Таким образом, пульсации выпрямленного напряжения меньше, если на выходе выпрямителя установлен фильтр.

Полупроводниковые диоды характеризуются допустимым обратным напряжением $U_{обр.д.}$. Во время отрицательного полупериода напряжения u_2 диод находится под действием обратного напряжения, максимум которого равен $U_{2m} = 3,14 U_0$

Отсюда следует, что при выборе диода для работы в схеме однополупериодного выпрямления надо соблюдать неравенство: $U_{обр.д.} > 3,14 U_0$

Если такой диод подобрать не удастся, прибегают к последовательному включению нескольких диодов.

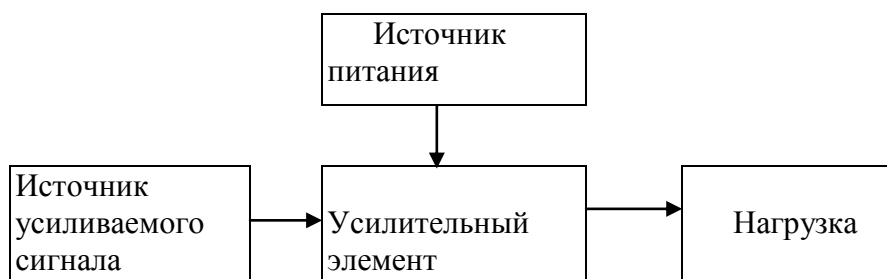
Среднее значение тока, проходящего через диод, не должно превышать $I_{ср.д.}$. Для однополупериодного выпрямителя $I_{ср} = I_0$ и, следовательно, $I_0 \leq I_{ср.д.}$

Если последнее неравенство не выполняется для диодов имеющихся типов, необходимо выключить несколько диодов параллельно.

Для однополупериодного выпрямителя значение коэффициента пульсации $k_{п1} = 1,57$, что для велико и является главным недостатком данной схемы, для двухполупериодного выпрямителя малое значение $k_{п2} = 0,67$ также является преимуществом данной схемы.

7.5. Усилители электрических сигналов

Усилитель — это электронное устройство, управляющее потоком энергии, идущей от источника питания к нагрузке. Причем мощность, требующаяся для управления, намного, как правило, меньше мощности, отдаваемой в нагрузку, а формы входного (усиливаемого) и выходного (на нагрузке) сигналов совпадают.



Усилители подразделяются:

- по роду усилительных элементов:
 - ламповые,
 - транзисторные;
- по характеру усиливаемых сигналов:
 - усилители аналоговых сигналов,
 - усилители импульсных сигналов;
- по роду усиливаемой величины:
 - усилители напряжения,
 - тока,

- мощности;
- по числу каскадов:
 - одно,
 - двух,
 - многокаскадные;
- по диапазону частот усиливаемых сигналов:
 - усилители постоянного тока,
 - усилители переменного тока:
 - усилители низкой частоты (звуковой, $f < 30$ кГц),
 - усилители высокой частоты (30 кГц $< f < 300$ МГц),
 - усилители сверхвысокой частоты ($f > 300$ МГц);
 - широкополосные усилители,
 - избирательные усилители.

Усилители низкой частоты (УНЧ) служат для усиления непрерывных периодических сигналов в диапазоне низких частот (от десятков герц до десятков килогерц). Особенностью УНЧ является то, что отношение верхней усиливаемой частоты к нижней велико и имеет значение от нескольких сотен до нескольких тысяч.

Усилители постоянного тока (УПТ) предназначены для усиления медленно меняющихся напряжений и токов в диапазоне частот от нуля до некоторой наибольшей частоты.

Широкополосные усилители усиливают сигналы в единицы и десятки мегагерц.

Избирательные усилители, характеризующие небольшими значениями отношения верхней и нижней частот. Как правило, это усилители высокой частоты (УВЧ).

Импульсные, или широкополосные, усилители работают в диапазоне от нескольких килогерц до нескольких десятков мегагерц и используются в устройствах импульсной связи, радиолокации и телевидения.

7.6. Генераторы электрических сигналов

7.6.1. Транзисторный автогенератор типа LC

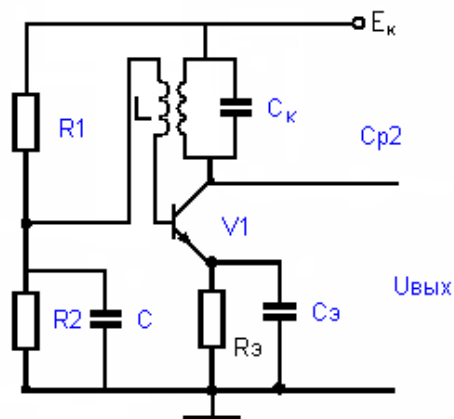


Рис. 7.4. Схема транзисторного автогенератора типа LC

Состав:

- колебательный контур, в котором возбуждаются колебания нужной частоты;
- усилительный элемент (транзистор), усиливающий сигнал, попадающий на его вход через цепь ОС;

- цепь положительной обратной связи, обеспечивающая подачу энергии с выхода схемы на ее вход;

- источник с постоянной ЭДС, энергия которого преобразуется в энергию колебательного контура.

Если ОС положительная, переменная составляющая коллекторного тока усиливает колебания в контуре, что вызывает увеличение амплитуды переменного напряжения на выходе транзистора. Это, в свою очередь, вызывает новые увеличения амплитуды коллекторного тока и т.д.

Для установления режима незатухающих колебаний в контуре недостаточно обеспечить только ПОС. Необходимо, чтобы потери энергии в контуре были полностью скомпенсированы усилителем за счет энергии источника постоянного тока. Эти 2 условия возникновения незатухающих колебаний в контуре генератора называются условиями самовозбуждения:

1. Баланс фаз. $\varphi + \psi = 2\pi n$ ($n=0,1,\dots$)

где φ - сдвиг по фазе для цепи прямой передачи (усилителя)

ψ - сдвиг по фазе для цепи ОС.

2. Баланс амплитуд. $U_{\text{вых}} = \kappa U_{\text{ос}} = \kappa U_{\text{вых}} \beta$ Отсюда получим: $\kappa\beta = 1$

LC генераторы применяются на частотах более 20кГц, для более низких частот конструкция таких колебательных контуров громоздка.

В транзисторном автогенераторе типа RC ПОС осуществляется через фазовращательную цепь, состоящую из трех RC звеньев. Применяется для получения синусоидальных колебаний на низких частотах. Существуют RC генераторы и других типов.

7.6.2. Кварцевые генераторы

Основа кварцевых генераторов – кварцевые резонаторы. Это пластинки кварца, закрепленные в кварцедержателях определенным образом, – электромеханическая колебательная система. Эти резонаторы относятся к пьезоэлектрическим элементам, принцип действия которых основан на использовании прямого и обратного пьезоэффекта:

Прямой – механическая нагрузка на материал элемента вызывает появление электрического напряжения между поверхностями элемента.

Обратный – электрическое напряжение между поверхностями элемента, создаваемое с помощью внешнего источника напряжения, вызывает появление механических напряжений, которые могут изменять форму и размеры элемента.

7.6.3. Генераторы импульсных сигналов

Наиболее распространены генераторы прямоугольных и линейно изменяющихся (пилообразных) импульсов напряжения.

Генераторы импульсных сигналов (импульсные генераторы) могут работать в одном из трех режимов: автоколебательном, ждущем или синхронизации.

В **автоколебательном режиме** генераторы непрерывно формируют импульсные сигналы без внешних воздействий. В **ждущем режиме** генераторы формируют импульсный сигнал лишь по приходе внешнего (запускающего) сигнала. В **режиме**

синхронизации генераторы вырабатывают импульсы напряжения, частота которых равна или кратна частоте синхронизирующего сигнала.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Назначение усилителя.
- 2) Назначение выпрямителя.
- 3) В чём отличие аналоговых и дискретных устройств?
- 4) Пояснить принцип действия однополупериодного выпрямителя.
- 5) Пояснить принцип действия двухполупериодного выпрямителя.
- 6) Назначение фильтра в выпрямителе.
- 7) Классификация усилителей.
- 8) Какие типы генераторов Вы знаете?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Миловзоров О.В. Электроника: Уч. пособие для вузов / Миловзоров О.В., Панков И.Г. М.: Высшая школа, 2006. - 288с.; - ISBN 5-06-004428-9
2. Бородин И.Ф. Основы электроники: Уч. пособие для вузов / Бородин И.Ф., Шогенов А.Х., Судник Ю.Ф. М.: КолосС, 2009. – 207с.; - ISBN 978-5-9532-0712-6

Дополнительная

3. Лачин В.И. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; ISBN 5-11-001360-8

Лекция 8

ДИСКРЕТНЫЕ УСТРОЙСТВА

8.1. Комбинационные и последовательностные цифровые устройства

Устройство, определяемое конечным числом состояний входов, конечным множеством состояний выходов и конечным числом внутренних состояний называется дискретным устройством (дискретный от латинского *discretus* - разделенный, прерывистый).

Дискретное устройство (ДУ) представляет собой устройство (рис. 1), имеющее n входов ($x_1 \dots x_n$) и m выходов ($y_1 \dots y_m$).

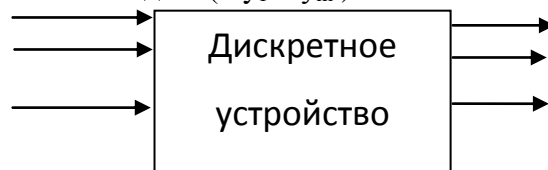


Рис. 8.1. Дискретное устройство.

Каждый входной сигнал принимает одно из значений некоторого множества X , а каждый из выходных сигналов - одно из значений некоторого множества Y . Число внутренних состояний ДУ, определяемых состоянием его элементов, является конечным и равным Z .

Изменение состояния ДУ происходит либо под влиянием входных воздействий, либо за счет изменения состояний его внутренних элементов. Дискретные устройства меняют свой состояния практически мгновенно, поэтому для описания его работы применяется дискретное время, которое принимает целочисленные значений.

Интервалы времени между моментами изменения состояния ДУ называются тактами. Такт, в котором состояние внутренних элементов соответствует состоянию их цепей включения, называется устойчивым. Он предшествует изменению состояния ДУ за счет входных воздействий. Такт, в котором состояние внутренних элементов не соответствует состоянию их цепей включения, называется неустойчивым. Он предшествует изменению состояния ДУ за счет изменения состояния его внутренних элементов.

Дискретные устройства могут быть:

комбинационные (однотактные) и последовательностные (многотактные), синхронные и асинхронные.

Комбинационное (однотактное ДУ, ДУ без памяти) характеризуется тем, что состояние его выходов однозначно определяется состоянием входов.

В последовательностном (многотактном ДУ, ДУ с памятью) состояние его выходов зависит не только от состояния входов в данный момент времени, но и от его внутреннего состояния в предшествующий момент времени. Функционирование последовательностного ДУ сводится к многотактному переключению его элементов.

По принципу действия последовательностные ДУ могут быть:

последовательного действия;

возвратного действия;

возвратно-последовательного действия.

Последовательностные ДУ последовательного действия характерны тем, что исполнительные органы предыдущего элемента стоят в цепи реагирующего органа последующего элемента ДУ.

Последовательностные ДУ возвратного действия характеризуются тем, что исполнительные органы последнего элемента ДУ стоят в цепи задействования реагирующего органа первого элемента.

Последовательностные ДУ возвратно-последовательного действия характеризуются сочетанием черт, присущих как ДУ последовательного действия, так и возвратного.

Синхронное ДУ - это такое устройство, такты функционирования которого задаются специальным тактовым генератором. Реакция синхронного ДУ на входное воздействие будет только в том случае, когда на его специальный вход подан сигнал от тактового генератора.

Асинхронное ДУ - это такое устройство, такты функционирования которого задаются с помощью реагирующих органов. Поэтому длительность такта для синхронных ДУ будет постоянной, а для асинхронных - переменной.

Наиболее широкое распространение в автоматике и цифровой вычислительной технике получили ДУ, входные и выходные сигналы которых являются двоичными. При этом считается, что если на i -м входе ДУ имеется сигнал, то $x_i=1$, а если нет, то $x_i=0$. Аналогично для j -го выхода ДУ. Из этого следует, что входная информация, поступающая на вход ДУ в виде двоичного кода, преобразуется им в другой двоичный код, который снимается с его выхода.

В таких устройствах все описание их работы может быть произведено с помощью двух цифр двоичной системы исчисления: «0» и «1». Поэтому такие устройства называли цифровыми. Электронные устройства цифровых и электронно-вычислительных машин и микропроцессоров реализуются с помощью логических элементов.

8.2. Типовые элементы логических устройств

Логические элементы предназначены для выполнения различных логических операций под дискретными сигналами при двоичном способе их представления.

Преимущественное распространение получили логические элементы потенциального типа. В них используется дискретные сигналы, нулевому значению которых соответствует уровень низкого потенциала, а единичному значению - уровень высокого потенциала. Связь потенциального логического элемента с предыдущим и последующим узлами в системе осуществляется непосредственно, без применения реактивных компонентов. Благодаря этому преимуществу именно потенциальные логические элементы нашли исключительное применение в интегральном исполнении в виде микросхем. С позиций использования логических микросхем потенциального типа и проводится далее рассмотрение логических элементов.

Алгоритм любой арифметической операции, выполняемой вычислительной техникой в двоичной системе счисления, может быть сведен к последовательности выполнения некоторых логических операций.

В вычислительной технике используется главным образом начальный раздел математической логики, называемый исчислением высказываний или алгеброй логики.

Под высказыванием понимают любое предложение, в отношении которого имеет смысл утверждение об его истинности или его ложности. Высказывание может быть либо истинным, либо ложным, но не может быть одновременно и тем, и другим.

В алгебре логики принято рассматривать не конкретное содержание высказывания, а лишь значение его истинности. Принято обозначение истинности высказываний: «1» – высказывание истинно, «0» – высказывание ложно. Такие высказывания чаще называют двоичными переменными.

Высказывания бывают простые и сложные. Функциональную зависимость сложного высказывания выражают через простые, т.е. $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$, где x_i – исходные простые высказывания. Объединения простых высказываний в сложные производится с помощью логических связей.

Рассмотрим наиболее часто встречающиеся логические связи и соответствующие им сложные высказывания.

а) Логическая связь НЕ

Отрицание высказывания « x » называется такое сложное высказывание, которое истинно, когда x ложно, и ложно, когда x истинно.

Запись высказывания имеет вид: $f(x) = \bar{x}$

Условное обозначение схемы и таблица истинности имеют вид:

x	\bar{x}
0	1
1	0



Рис. 8.2. Элемент «НЕ» и его таблица истинности

б) Логическая связь ИЛИ (дизъюнкция)

Дизъюнкцией нескольких простых высказываний называют такое сложное высказывание, которое ложно тогда, когда ложны все простые высказывания.

Запись высказывания имеет вид: $f(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = x_1 \vee x_2$

Условное обозначение схемы и таблица истинности имеют вид:

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

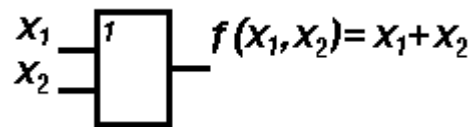


Рис. 8.3. Элемент «ИЛИ» и его таблица истинности

в) Логическая связь И (конъюнкция)

Конъюнкцией нескольких простых высказываний называют такое сложное высказывание, которое истинно только тогда, когда истинны все простые высказывания.

Математическая запись на примере двух простых высказываний имеет вид: $f(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2 = x_1 \wedge x_2 = x_1 \& x_2$

Условное обозначение схемы и таблица истинности имеют вид:

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

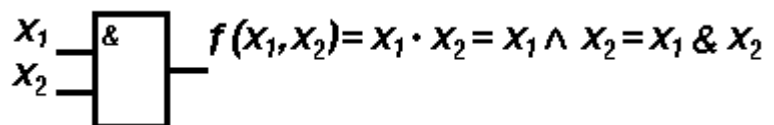


Рис. 8.4. Элемент «И» и его таблица истинности

г) Логическая связь ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ (сумматор по модулю 2)

Суммированием по модулю 2 нескольких простых высказываний называют такое сложное высказывание, которое истинно только тогда, когда истинно нечетное число высказываний.

Математическая запись на примере двух простых высказываний имеет вид: $f(x_1, x_2) = x_1 \oplus x_2$

Условное обозначение схемы и таблица истинности имеют вид:

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

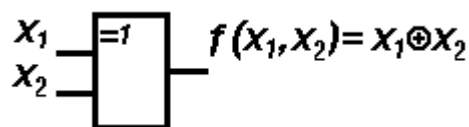


Рис. 8.5. Элемент «ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ» и его таблица истинности

Используя свойство функциональной полноты, комбинированные логические элементы Пирса и Шеффера позволяют реализовать различные сложные высказывания (функции), как-то И, ИЛИ, НЕ.

д) Элемент Пирса – двоичный логический элемент, реализующий операцию (сложное высказывание) логического сложения с отрицанием (дизъюнкцию с отрицанием).

Математическая запись функции, реализуемой элементом Пирса, имеет вид:

$$f(x_1, x_2) = x_1 + x_2 = x_1 \vee x_2$$

Условное обозначение элемента и таблица истинности, на примере двух простых высказываний, имеет вид:

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

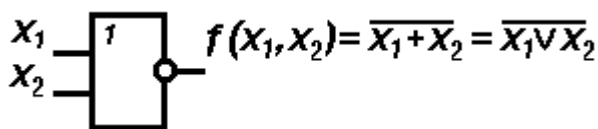


Рис. 8.6. Элемент «ИЛИ-НЕ» и его таблица истинности

На основе элементов Пирса можно реализовать:

а) логическую связь И; б) логическую связь НЕ; в) логическую связь ИЛИ.

Сложное высказывание представляет собой «1» (истинно) на выходе элемента всегда, кроме случая, когда простые высказывания имеют «1» на всех входах элемента.

Математическая запись функции, реализуемой элементом Шеффера, имеет вид:

$$f(x_1, x_2) = x_1 \cdot x_2 = x_1 \wedge x_2$$

Условное обозначение элемента и таблица истинности на примере двух простых высказываний имеет вид:

x_1	x_2	$f(x_1, x_2)$
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

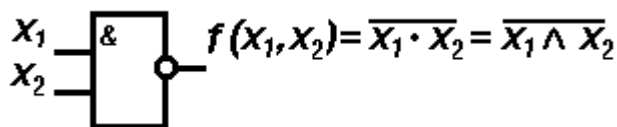


Рис. 8.7. Элемент «И-НЕ» и его таблица истинности

На основе элементов Шеффера можно реализовать логические связи НЕ, ИЛИ, И по аналогии реализации логических связей на элементах Пирса. По таблицам

истинности сложных высказываний с помощью аппарата алгебры логики, можно составить совершенные нормальные логические функции.

Пусть $f(x_1, x_2 \dots x_n)$ – произвольная логическая функция n аргументов. Промоделируем все возможные наборы значений аргументов x . Таких наборов будет 2^n . Обозначим их через $A_0, A_1 \dots A_i$, тогда $f(x_1, x_2 \dots x_n) = f(A_i)$.

Функцию $\theta(x_1, x_2 \dots x_n) = \theta_i(A_i)$, такую, что она равна единице для набора A_i и нулю для всех остальных наборов, называют конституэнтной единицы.

В алгебре логики доказывается, что любая функция $f(A_i)$ может быть представлена логической суммой конституэнт единицы, составленных для тех наборов A_i , для которых $f(A_i) = 1$. Логическую сумму конституэнт единицы, полученную по указанному правилу, называют совершенной дизъюнктивной нормальной формой функции (СДНФ).

Для получения конституэнты единицы некоторого набора необходимо логически перемножить все переменные данного набора, причем переменные, соответствующие нулям в наборе, в выражении конституэнты единицы входят с отрицанием.

Рассмотрим пример составления СДНФ:

Пусть функция $f(x_1, x_2)$ задана таблицей истинности

№ набора	x		$f(x_1, x_2)$
	x_1	x_2	
1	0	0	0
2	1	0	1
3	0	1	1
4	1	1	0

Сумматор по модулю два

$$f(x_1, x_2) = x_1 \oplus x_2$$

Функция $f(x_1, x_2) = 1$ для наборов 2 и 3. Конституэнты единицы для наборов $Q_2 = x_1 \bar{x}_2$, $Q_3 = \bar{x}_1 x_2$, тогда СДНФ будет: $f(x_1, x_2) = x_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_1 x_2$.

В алгебре логики доказывается также, что любая логическая функция может быть представлена совершенной конъюнктивной нормальной формой (СКНФ), которая получается логическим умножением конституэнт нуля для тех наборов A_i , для которых $f(x_1, x_2 \dots x_n) = 0$.

Для получения конституэнты нуля некоторого набора необходимо сложить все переменные набора, причем переменные, соответствующие единицам в наборе, в выражение конституэнты нуля входят с отрицанием.

По данным таблицы истинности предыдущего примера составим СКНФ.

Из таблицы видно, что $f(x_1, x_2) = 0$ для наборов 1 и 4. Конституэнты нуля для этих наборов $Q_1 = x_1 + x_2$, $Q_4 = \bar{x}_1 + \bar{x}_2$, тогда СКНФ функции:

$$f(x_1, x_2) = (x_1 + x_2)(\bar{x}_1 + \bar{x}_2).$$

Таким образом, любая логическая функция может быть представлена либо функцией СДНФ, либо функцией СКНФ. Для их получения требуется использование логических связей трех типов: «НЕ», «И», «ИЛИ». Эти связи образуют функционально полную систему логических связей.

Количество конституэнт, образующих совершенную нормальную функцию, определяет форму функциональной зависимости.

Рассмотренные математические построения могут моделироваться с помощью электрических или электронных схем.

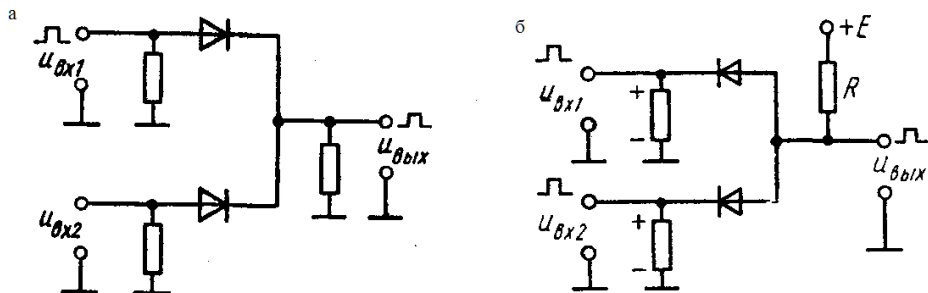


Рис. 8.8. Схемы логического сложения (а) и логического умножения (б).

Из схемы рис.8.8.а видно, что сигнал на выходе возникает, если сигнал поступит на первый или на второй вход или на оба входа сразу. Сопротивления предназначены для обеспечения согласования с выходами и входом схем. Полупроводниковые диоды обеспечивают отсутствие замыкания входов друг на друга.

На рис. 8.8.б изображена схема, в которой выходной сигнал появляется только тогда, когда на оба входа одновременно поданы сигналы. Действительно, при отсутствии на входе сигнала ток от источника (+) проходит через сопротивление R и одно или оба сопротивления, шунтирующие вход. При этом напряжение источника падает на сопротивлении R и напряжение на выходе схемы близко к нулю. Если на входы поступают импульсы, то на входных сопротивлениях появляется падение напряжения определенной полярности. Эти напряжения направлены навстречу ЭДС источника и ток через сопротивление R не проходит, вследствие чего на выходе действует высокое напряжение.

Схему на рис. 8.8.а условно изображают квадратом со словом «ИЛИ». Отсутствие сигнала обозначено «0», а наличие – «1». Анализируя состояния схемы при различных комбинациях сигналов на входе, можно составить следующую таблицу:

$$0+0=0, \quad 0+1=1, \quad 1+0=1, \quad 1+1=1.$$

Эта таблица совпадает (кроме последней строки) с таблицей сложения двоичных чисел. Поэтому схему ИЛИ называют схемой логического сложения или схемой дизъюнкции.

Схему на рис. 8.8.б обозначают квадратом с буквой «И», так как сигнал на выходе появляется тогда, когда есть сигнал на первом и втором входах. Для нее аналогичным образом можно составить таблицу, отражающую соотношение сигналов на входе и выходе:

$$0 \times 0 = 0, \quad 1 \times 0 = 0, \quad 0 \times 1 = 0, \quad 1 \times 1 = 1.$$

Эта таблица совпадает с таблицей умножения двоичных чисел. Поэтому схему «И» называют схемой логического умножения.

Данные и другие типы логических элементов выпускаются промышленностью в виде интегральных микросхем различных серий.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Какие типы дискретных устройств Вы знаете?
- 2) Какие типы логических элементов Вы знаете?
- 3) Составить таблицу истинности логического элемента «И».
- 4) Составить таблицу истинности логического элемента «ИЛИ».
- 5) Составить таблицу истинности логического элемента «И-НЕ».
- 6) Составить таблицу истинности логического элемента «ИЛИ-НЕ».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Миловзоров О.В. Электроника: Уч. пособие для вузов / Миловзоров О.В., Панков И.Г. М.: Высшая школа, 2006. - 288с.; - ISBN 5-06-004428-9
2. Бородин И.Ф. Основы электроники: Уч. пособие для вузов / Бородин И.Ф., Шогенов А.Х., Судник Ю.Ф. М.: КолосС, 2009. – 207с.; - ISBN 978-5-9532-0712-6

Дополнительная

3. Лачин В.И. С. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; ISBN 5-11-001360-8

Лекция 9

ЛОГИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Цифровых электронных устройств могут быть как комбинационные, так и последовательностные. К ним относят счетчики, регистры, сумматоры, шифраторы, дешифраторы, мультиплексоры и демультиплексоры, компараторы и др.

9.1. Триггеры

Триггер – простейшее последовательностное устройство, которое может находиться в одном из двух возможных состояний и переходить из одного состояния в другое под воздействием входных сигналов.

Триггер является базовым элементом последовательностных логических устройств. Триггеры нашли широкое распространение в вычислительной технике и составляют от 20 до 40% всего оборудования.

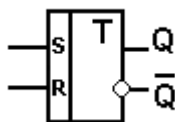


Рис. 9.1. RS – триггер

В качестве поясняющего символа для условного обозначения триггера применяют букву «Т», которую помещают в верхней части основного поля графического обозначения.

Входы триггера разделяют на информационные и управляющие (вспомогательные). Это разделение в значительной степени условно. Информационные входы используются для управления состоянием триггера. Управляющие входы обычно используются для предварительной установки триггера в некоторое состояние и для синхронизации.

Входы триггера имеют различные обозначения, связанные с выполняемыми ими функциями:

S — вход для установки в состояние «1»; S (от англ. set);

R — вход для установки в состояние «0»; R (от англ. reset);

J — вход для установки в состояние «1» в универсальном триггере;

K — вход для установки в состояние «0» в универсальном триггере;

T — счетный (общий) вход;

D — вход для установки в состояние «1» или в состояние «0»;

V — дополнительный управляющий вход для разрешения приема информации (иногда используют букву E вместо V).

Выходы триггера обозначают буквами Q и \bar{Q} , тогда если Q соответствует «1», то \bar{Q} - нулю и наоборот.

Триггеры классифицируют по следующим признакам:

- способу приема информации;
- принципу построения;
- функциональным возможностям.

По способу приема информации различают асинхронные и синхронные триггеры.

Асинхронный триггер изменяет свое состояние непосредственно в момент появления соответствующего информационного сигнала (рис. 8.1.).

Синхронные триггеры реагируют на информационные сигналы только при наличии соответствующего сигнала на так называемом входе синхронизации С (от англ. clock). Этот вход также обозначают терминами «строб», «такт».

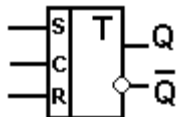


Рис. 9.2. Синхронный RS - триггер

Синхронные триггеры в свою очередь подразделяют на триггеры со статическим (статические) и динамическим (динамические) управлением по входу синхронизации С. Статические триггеры воспринимают информационные сигналы при подаче на вход С логической единицы (прямой вход) или логического нуля (инверсный вход). Динамические триггеры воспринимают информационные сигналы при изменении (перепаде) сигнала на входе С от 0 к 1 (прямой динамический С-вход) или от 1 к 0 (инверсный динамический С-вход).

Статические триггеры в свою очередь подразделяют на одноступенчатые (однотактные) и двухступенчатые (двухтактные). В одноступенчатом триггере имеется одна ступень запоминания информации, а в двухступенчатом — две такие ступени. Вначале информация записывается в первую ступень, а затем переписывается во вторую и появляется на выходе. Двухступенчатый триггер обозначают ТТ.

По функциональным возможностям триггеры разделяют на следующие классы:

- с отдельной установкой состояния 0 и 1 (RS - триггеры);
- универсальные (JK - триггеры);
- с приемом информации по одному входу D (D-триггеры, или триггеры задержки);
- со счетным входом Т (Т - триггеры).

Асинхронный RS триггер может быть реализован на двух элементах «ИЛИ-НЕ» или «И-НЕ» (рис. 8.3).

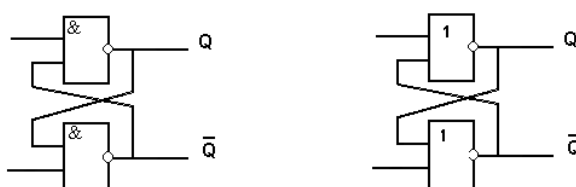


Рис. 93. RS – триггеры на логических элементах

Одновременная подача сигналов на оба входа триггера на элементах «ИЛИ-НЕ» запрещена, так как после нее триггер оказывается в состоянии (1 или 0), предсказать которое заранее невозможно.

В асинхронном RS-триггере на элементах «И-НЕ» переключение производится логическим «0», подаваемым на вход R или S. Запрещенная комбинация соответствует логическим «0» на обоих входах.

Синхронный RS-триггер, обозначаемый также буквами RST, имеет дополнительный С-вход (от англ. clock — часы), на который подают импульсы синхронизации. Синхронный триггер получают при подключении к входу асинхронного RS-триггера двух дополнительных элементов «И».

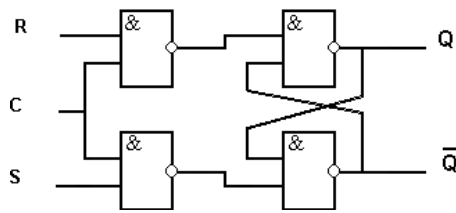


Рис. 9.4. Синхронный RS – триггеры на логических элементах

Если на входе С — логический «0», то и на выходе верхнего входного элемента «И-НЕ», и на выходе нижнего будет логическая «1». А это обеспечивает хранение информации. Таким образом, если на входе С — логический «0», то воздействие на входы R, S не приводит к изменению состояния триггера. Если же на вход синхронизации С подана логическая единица, то схема реагирует на входные сигналы точно так же, как и рассмотренная ранее.

Синхронный RS триггер может изменять свое состояние в любой момент на интервале действия сигнала $C=1$. Такой триггер называют триггером со статическим входом синхронизации.

Наибольшее практическое распространение получили триггеры с динамическим (импульсным) входом синхронизации. Суть построения такого триггера заключается в обеспечении его переключения лишь на интервале изменения сигнала входа С, т. е. либо по фронту, либо по срезу импульса синхронизации.

9.2. Счетчики импульсов

Счетчик импульсов (цифровой счетчик) — это последовательностное цифровое устройство, обеспечивающее хранение слова информации и выполнение над ним микрооперации счета, заключающейся в изменении значения числа в счетчике на 1.

По существу счетчик представляет собой совокупность соединенных определенным образом триггеров. Основным параметр счетчика — модуль счета. Это максимальное число единичных сигналов, которое может быть сосчитано счетчиком. Счетчики обозначают через СТ (от англ. *counter*).

Счетчики классифицируют:

по модулю счета:

- двоично-десятичные;
- двоичные;
- с произвольным постоянным модулем счета;
- с переменным модулем счета;

по направлению счета:

- суммирующие;
- вычитающие;
- реверсивные;

по способу формирования внутренних связей:

- с последовательным переносом;
- с параллельным переносом;
- с комбинированным переносом;
- кольцевые.

Цифровые счетчики можно получить, используя совокупность простейших триггерных и логических микросхем. Имеются также многообразные универсальные

счетчики, выполненные в виде одной микросхемы высокого уровня интеграции (например, микросхемы К155ИЕ7, К564ИЕ14 и др.).

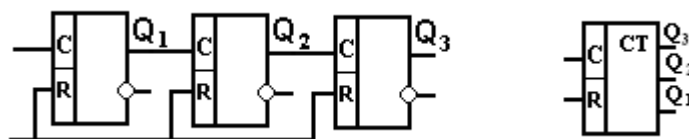


Рис. 9.5. Функциональная схема и условное обозначение трехразрядного счетчика

Принцип функционирования счетчика рассмотрим на примере трехразрядного счетчика, собранного на Т-триггерах. Его условное обозначение и функциональная схема показаны на рис. 9.5. Для обнуления счетчика (перед началом работы) используют специальную шину Уст «0», к которой подключены все R-входы триггеров.

Для построения счетчика импульсов используются триггеры со счетными входами, соединенные последовательно. Каждые 2 импульса, поступившие на первый триггер формируют импульс переноса, поступающий на второй триггер. В результате код состояний одноименных выходов триггеров соответствует двоичному коду числа поступивших импульсов.

9.3. Регистры

Регистр – это последовательностное логическое устройство, используемое для хранения n – разрядных двоичных чисел и выполнения преобразования над ними. Регистр представляет собой упорядоченную последовательность триггеров, число которых соответствует числу разрядов в слове. С каждым регистром обычно связано комбинационное цифровое устройство, с помощью которого обеспечивается выполнение некоторых операций над словами.

Типичными являются следующие операции:

- прием слова в регистр;
- передача слова из регистра;
- поразрядные логические операции;
- сдвиг слова вправо или влево на заданное число разрядов;
- преобразование последовательного кода в параллельный и обратно;
- установка регистра в начальное состояние (сброс).

Регистры классифицируются по следующим видам:

- накопительные (регистры памяти, хранения);
- сдвигающие.

В свою очередь сдвигающие регистры делятся:

По способу ввода-вывода информации:

- параллельные,
- последовательные,
- комбинированные

По направлению передачи информации:

- однонаправленные,
- реверсивные.

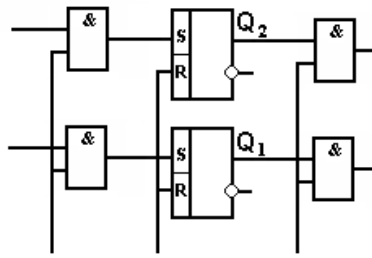


Рис. 9.6. Функциональная схема двухразрядного регистра

Для записи информации в двоичном коде сначала выполняют операцию обнуления триггеров путем подачи соответствующих сигналов на все R- и S-входы. После этого через S-входы осуществляют либо переключения триггеров (для записи «1»), либо не меняют их состояния (для сохранения «0»). Считывание информации, заключенной в регистре, производится с Q-выходов триггеров регистра.

Количество триггеров определяет разрядность регистра. Регистры могут выполнять также операции приема, передачи и преобразования информации, обеспечиваемые системой управления.

Важнейшими показателями регистра являются число разрядов и быстродействие устройства.

Фактически любое цифровое устройство можно представить в виде совокупности регистров, соединенных друг с другом при помощи комбинационных цифровых устройств.

9.4. Шифратор

Шифратор — это комбинационное устройство, преобразующее десятичные числа в двоичную систему счисления, причем каждому входу может быть поставлено в соответствие десятичное число, а набор выходных логических сигналов соответствует определенному двоичному коду. Шифратор иногда называют «кодером» (от англ. *coder*) и используют, например, для перевода десятичных чисел, набранных на клавиатуре кнопочного пульта управления, в двоичные числа. Если количество входов настолько велико, что в шифраторе используются все возможные комбинации сигналов на выходе, то такой шифратор называется полным, если не все, то неполным. Число входов и выходов в полном шифраторе связано соотношением $n = 2^m$, где n — число входов, m — число выходов.

Так, для преобразования кода кнопочного пульта в четырехразрядное двоичное число достаточно использовать лишь 10 входов, в то время как полное число возможных входов будет равно 16 ($n = 2^4 = 16$), поэтому шифратор 10 x 4 (из 10 в 4) будет неполным.

Для шифратора, показанного условно на рис. 5. $n=5, m=3$.

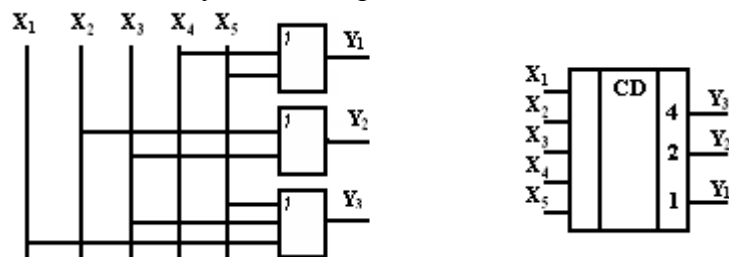


Рис. 9.7. Функциональная схема шифратора на элементах ИЛИ и его условное обозначение

9.5. Дешифратор

Дешифратором называется комбинационное устройство, преобразующее n -разрядный двоичный код в логический сигнал, появляющийся на том выходе, десятичный номер которого соответствует двоичному коду. Число входов и выходов в так называемом полном дешифраторе связано соотношением $m = 2^n$, где n – число входов, а m — число выходов. Если в работе дешифратора используется неполное число выходов, то такой дешифратор называется неполным. Так, например, дешифратор, имеющий 4 входа и 16 выходов, будет полным, а если бы выходов было 10, то неполным.

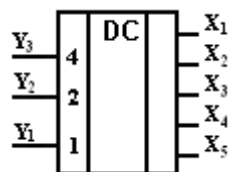


Рис. 9.8. Условное обозначение дешифратора.

Рассмотренные шифраторы и дешифраторы являются простейшими преобразователями кодов.

9.6. Преобразователи кодов

Преобразователями кодов, в общем случае, называют устройства, предназначенные для преобразования одного кода в другой, при этом они часто выполняют нестандартные преобразования кодов. Преобразователями кодов обозначают через X/Y.

Преобразователями кодов в виде микросхем выпускаются для таких операций, как преобразование двоично-десятичного кода в двоичный и обратного преобразования, для преобразования двоичного кода в код управления шкальными, матричными или сегментными индикаторами, и др.

9.7. Компаратор

Компаратор (цифровой) — логическое устройство, обеспечивающее сравнение двух многоразрядных двоичных чисел A и B , разряды каждого из которых подаются порознь на его входы (рис. 9).

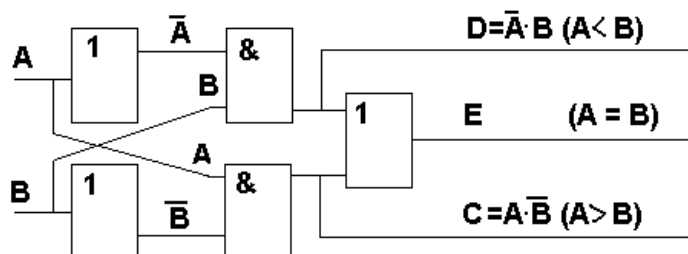


Рис. 9.9. Функциональная схема цифрового компаратора для сравнения двоичных чисел A и B

На практике одно из чисел (например, A) является неизменным, а другое (B) изменяет свое значение от такта к такту. В момент равенства их значений на выходе компаратора формируется сигнал 1.

Цифровые компараторы выполняют сравнение двух чисел, заданных в двоичном коде. Цифровые компараторы имеют три выхода и могут определять равенство двух двоичных чисел А и В с одинаковым количеством разрядов либо вид неравенства $A > B$ или $A < B$.

Цифровые компараторы выполняют, как правило, в виде самостоятельных микросхем.

Вопросы для самоконтроля

- 1) Пояснить, какие функции выполняет триггер.
- 2) Чем отличается синхронный триггер от асинхронного?
- 3) Назначение регистра.
- 4) Назначение преобразователя кодов, какие бывают преобразователи кодов?
- 5) Назначение и принцип работы компаратора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Миловзоров О.В. Электроника: Уч. пособие для вузов / Миловзоров О.В., Панков И.Г. М.: Высшая школа, 2006. - 288с.; - ISBN 5-06-004428-9
2. Бородин И.Ф. Основы электроники: Уч. пособие для вузов / Бородин И.Ф., Шогенов А.Х., Судник Ю.Ф. М.: КолосС, 2009. – 207с.; - ISBN 978-5-9532-0712-6

Дополнительная

3. Лачин В.И. С. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; ISBN 5-11-001360-8

Лекция 10

ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

10.1. Электрические измерения

Для измерения электрических и магнитных величин служат электроизмерительные приборы: амперметры, вольтметры, гальванометры и др., а также их комбинации.

Измерение — нахождение значения физической величины опытным путем с помощью специальных технических средств.

Процесс измерения состоит в сравнении измеряемой физической величины с ее значением, принятым за единицу.

Измерение одной величины можно заменить измерением другой, с ней связанной. Как правило, всякое измерение, в конечном счете, сводят к измерению перемещения стрелки или светового пятна на шкале.

Истинное значение физической величины — значение физической величины, которое идеальным образом отражает в качественном и количественном отношениях соответствующее свойство данного объекта. Истинное значение практически недостижимо.

Действительное значение физической величины — значение, полученное экспериментальным путем и настолько приближающееся к истинному значению, что для данной цели может быть использовано вместо него.

Прямое измерение — измерение, при котором искомое значение величины находят непосредственно из основных данных. Например: измерение напряжения при помощи вольтметра, тока при помощи амперметра и др.

Косвенное измерение — измерение, при котором искомое значение величины находят на основании известной зависимости между этой величиной и величинами, подвергаемыми прямым измерениям. Например: измерение электрической мощности постоянного тока при помощи вольтметра и амперметра ($P = UI$).

Совместные измерения — производимые одновременно измерения двух или нескольких неоднородных величин с целью нахождения зависимости между ними.

Единица физической величины — физическая величина, которой по определению присвоено числовое значение 1. Единицы делятся на *основные*, выбираемые произвольно при построении системы единиц, и *производные*, образуемые в соответствии с уравнениями связи с другими единицами данной системы единиц.

Принцип измерения — совокупность физических явлений, на которых основано данное измерение.

Метод измерения — совокупность приемов использования принципов и средств измерений. Простейшим является *метод непосредственной оценки*, в котором значение измеряемой величины определяют непосредственно по отсчетному устройству измерительного прибора. Наиболее точным является *метод сравнения* измеряемой величины с однородной независимой известной величиной.

Погрешность измерения — отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины.

Точность измерения — качество измерения, отражающее близость его результатов к истинному значению измеряемой величины. Высокая точность измерений соответствует малым погрешностям.

Погрешность измерительного прибора — разность между показанием прибора и истинным значением измеряемой величины.

Результат измерения — значение величины, найденное путем ее измерения. Измерение может быть однократным, и тогда показание прибора является результатом измерения, и многократным—тогда результат измерения находят путем статистической обработки результатов каждого наблюдения

Средствами измерения называют технические средства, используемые при измерениях и имеющие нормированные метрологические характеристики, т.е. характеристики, влияющие на результаты и на точность измерений. По конструктивному исполнению и по форме представления измерительной информации средства измерений подразделяют на меры, измерительные приборы, измерительные установки, измерительные системы, измерительные преобразователи.

Мера – средство измерений, предназначенное для воспроизведения одного или нескольких фиксированных значений физической величины (мера массы – гиря, мера индуктивности – образцовая катушка индуктивности, многозначная мера индуктивности – магазин индуктивностей).

Измерительный прибор – средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. В зависимости от формы представления информации различают аналоговые и цифровые приборы. Аналоговым называют измерительный прибор, показания которого являются непрерывной функцией измеряемой величины, например, стрелочный вольтметр, ртутно-стеклянный термометр. В цифровом приборе осуществляется преобразование аналогового сигнала измерительной информации в цифровой код, и результат измерения отражается на цифровом табло. *Измерительные приборы* обладают высокой точностью и надежностью работы, возможностью автоматизации процесса измерений и передачи показаний на дальние расстояния, простотой ввода результатов измерений в электрические вычислительные устройства и т. д. Поэтому они широко используются в системах ручного или автоматического контроля и поддержания на заданном уровне параметров промышленных установок и технологических процессов.

Измерительная установка – совокупность функционально объединенных средств измерений и вспомогательных устройств, соединенных между собой каналами связи, предназначенная для выработки, передачи и (или) использования в системах управления, контроля, диагностирования и т.п.

Измерительный преобразователь – средство измерений, предназначенное для преобразования сигналов измерительной информации в форму, целесообразную для передачи, обработки или хранения. Измерительная информация на выходе измерительного преобразователя, как правило, недоступна для непосредственного восприятия наблюдателем. Измерительные преобразователи очень разнообразны, однако, все они обладают нормированными метрологическими характеристиками. Так, к измерительным преобразователям относятся термопары, измерительные трансформаторы тока и напряжения, измерительные усилители и др.

10.2. Общие сведения об электроизмерительных приборах, их классификация

Электроизмерительные приборы классифицируются по различным признакам. В зависимости от основной приведенной погрешности электроизмерительные приборы

разбиты на классы точности. Класс точности указывается на шкале прибора и обозначает наибольшую приведенную погрешность в процентах.

В зависимости от *принципа действия* имеются следующие наиболее употребительные системы приборов:

- магнитоэлектрическая;
- электромагнитная;
- электродинамическая;
- термоэлектрическая;
- индукционная;
- электростатическая;
- тепловая;
- электронная.

По *роду измеряемой величины* электроизмерительные приборы делятся на:

- вольтметры (для измерения напряжения и ЭДС);
- амперметры (для измерения силы тока);
- ваттметры (для измерения электрической мощности);
- счетчики (для измерения электрической энергии);
- омметры, мегаомметры (для измерения электрического сопротивления);
- частотомеры (для измерения частоты переменного тока);
- фазометры (для измерения угла сдвига фаз).

По *роду тока* различают электроизмерительные приборы

- постоянного тока,
- переменного тока и
- комбинированные.

По *способу установки* различают щитовые приборы, предназначенные для монтажа на приборных щитах и пультах управления, и переносные приборы.

На шкалу электроизмерительного прибора наносятся условные обозначения, основные из которых приведены в табл.

1,5	Класс точности 1,5
—	Постоянный ток
⏏	Переменный (однофазный) ток
⏏	Постоянный и переменный токи
≈	Трехфазный ток
⏏	Прибор магнитоэлектрической системы
⏏	Прибор электромагнитной системы
⏏	Прибор электродинамической системы
⊙	Прибор индукционной системы
⏏; ⊥; ∠60°	Прибор устанавливается горизонтально; вертикально; под углом 60°
☆	Изоляция прибора испытана при напряжении 2 кВ
А	Для закрытых отапливаемых помещений
Б	Для закрытых неотапливаемых помещений
В	Для полевых и морских условий

Электромеханические измерительные приборы относятся к приборам прямого преобразования, в которых электрическая измеряемая величина непосредственно преобразуется в показание отсчетного устройства. Таким образом, любой электромеханический прибор состоит из следующих главных частей: неподвижной, соединенной с корпусом прибора, и подвижной, механически или оптически связанной с отсчетным устройством.

Отсчетное устройство предназначено для наблюдения значений измеряемой величины. Оно состоит из шкалы и указателя, располагаемых на лицевой стороне прибора

Шкалой называется совокупность отметок (штрихов), расположенных в определенной последовательности, и проставленных у некоторых из них чисел отсчета, соответствующих ряду последовательных значений измеряемой величины. Шкалы могут быть равномерными и неравномерными (квадратичными, логарифмическими и др.).

Расстояние между двумя соседними штрихами называется *делением шкалы*. Разность значений измеряемой величины, соответствующая двум соседним отметкам, называется *ценой деления*. Таким образом, по цене деления можно получить представление об абсолютной погрешности прибора.

Шкала называется *односторонней*, если нулевая отметка помещена у ее начала, и *двусторонней* — при нуле посередине. Шкалу наносят на циферблат прибора; на нем же помещают название прибора и условные обозначения.

Указатели делятся на *стрелочные* и *оптические*. Оптические указатели состоят из источника света, зеркальца, расположенного на подвижной части, и системы зеркал, удлиняющих путь луча света и направляющих его на полупрозрачную шкалу. Оптические указатели обеспечивают большую чувствительность прибора и меньшую погрешность отсчета по сравнению со стрелочными.

10.3. Погрешности приборов

Практика показывает, что при всяком измерении непрерывной величины неизбежна некоторая погрешность Δ — разница между измеренным $A_{из}$ и действительным A значениями измеряемой величины: $\Delta = A_{из} - A$. Эту разницу называют *абсолютной погрешностью измерения*. Она определяется систематическими и случайными погрешностями прибора, а также ошибками оператора.

Систематические погрешности изменяются по определенному закону и возникают вследствие факторов, которые могут быть учтены: влияние внешних условий (температура, радиация, электромагнитные поля), несовершенство метода измерения, несовершенство измерительного прибора.

Случайные погрешности возникают вследствие факторов, которые не поддаются непосредственному учету. Оценку случайных погрешностей можно произвести только при очень большом числе повторяющихся измерений, используя методы теории вероятностей.

Ошибки оператора (в записи, в определении цены деления прибора и др.), обычно легко выявляемые в ряду наблюдений по значительным отклонениям результата измерения от средних или примерно ожидаемых значений, исключают из записей и при обработке результатов измерения не учитывают.

Для более полной характеристики измерений вводят понятие *относительной погрешности измерения* δ :

$$\delta = \frac{A_{из} - A}{A} \cdot 100 = \frac{\Delta}{A} 100\%$$

Величины A и δ характеризуют точность измерения.

Во многих случаях возникает необходимость охарактеризовать точность прибора. Для этой цели вводится понятие *приведенной погрешности измерения*:

$$\gamma = \frac{\Delta}{A_{\max}} 100\%$$

где A_{\max} , — максимальное значение шкалы прибора, т. е. предельное значение измеряемой величины.

Наибольшая приведенная погрешность определяет класс точности прибора. Если, например, класс точности амперметра равен 1,5, то это означает, что наибольшая приведенная погрешность $\gamma = \pm 1,5\%$. Если прибор рассчитан на измерение токов до 15 А, то абсолютная погрешность измерения этим прибором составит

$$\Delta = A_{\max} \frac{\gamma}{100} = 0,225A$$

Если указанным прибором измерить ток 10А, то относительная погрешность измерения не превысит $\gamma = 2,25\%$, если тем же прибором измерить ток 1А, то относительная погрешность измерения не превысит $\gamma = 22,5\%$.

Этот пример показывает, что при точных измерениях прибор следует подбирать так, чтобы значение измеряемой величины приходилось на вторую половину шкалы.

Различают *основную и дополнительную погрешности*. Основные погрешности возникают при нормальных условиях работы, указанных в паспорте прибора и условными знаками на шкале. Дополнительные погрешности возникают при эксплуатации прибора в условиях, отличных от нормальных (повышенная температура окружающей среды, сильные внешние магнитные поля, неправильная установка прибора и др.)

Вопросы для самоконтроля

- 1) Классификация электроизмерительных приборов.
- 2) Что означает класс точности 2?
- 3) Что называется абсолютной погрешностью измерения?
- 4) Что называется относительной погрешностью измерения?
- 5) С помощью какого прибора измеряется сопротивление?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Немцов М.В. Электротехника и электроника. М.: Высшая школа, 2007. - 560 с.; - ISBN 078-5-06-005607-5
2. Лачин В.И., С. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X

Дополнительная

3. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника. Уч. пособие для вузов / Жаворонков М.А., Кузин А.В. М.: Академия, 2005.- 400с.; - ISBN 5-7695-1703-4

4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; ISBN 5-11-001360-8

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Миловзоров О.В. Электроника: Уч. пособие для вузов / Миловзоров О.В., Панков И.Г. М.: Высшая школа, 2006. - 288с.; - ISBN 5-06-004428-9
2. Бородин И.Ф. Основы электроники: Уч. пособие для вузов / Бородин И.Ф., Шогенов А.Х., Судник Ю.Ф. М.: КолосС, 2009. – 207с.; - ISBN 978-5-9532-0712-6
3. Лачин В.И. Электроника. Уч. пособие. 3-е изд. / Лачин В.И., Савёлов Н.С. Ростов-на-Дону. Феникс, 2002. – 676с.; - ISBN 5-222-0718-X
4. Гершунский Б.С. Основы электроники и микроэлектроники: Учебник. 4-е издание: К.: Высшая школа, 1989. – 423 с.; ISBN 5-11-001360-8
5. Немцов М.В. Электротехника и электроника. М.: Высшая школа, 2007. - 560 с.; - ISBN 078-5-06-005607-5
6. Жаворонков М.А. Электротехника и электроника. Уч. пособие для вузов / Жаворонков М.А., Кузин А.В. М.: Академия, 2005.- 400с.; - ISBN 5-7695-1703-4

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
Лекция 1. Линейные электрические цепи постоянного тока	4
1.1. Цель, задачи, структура курса. Основные понятия и определения. Условные обозначения	4
1.2. Законы электротехники.....	4
1.2.1.Закон Ома.....	6
1.2.2. Законы Кирхгофа	7
1.2.3. Закон Джоуля-Ленца.....	8
1.3.Эквивалентные преобразования. Методы расчета цепей постоянного тока...8	
1.4. Баланс мощностей.....	9
Вопросы для самоконтроля.....	10
Список литературы.....	10
Лекция 2. Линейные электрические цепи однофазного переменного синусоидального тока	11
2.1. Величины, характеризующие синусоидальный электрический ток	11
2.2. Активное сопротивление, индуктивность и емкость в цепи переменного синусоидального тока	14
2.2.1.Резистивный элемент.....	14
2.2.2. Индуктивный элемент.....	15
2.2.3. Емкостной элемент.....	16
2.3. Активная и реактивная мощности.....	17
2.4. Последовательное и параллельное соединение активного, индуктивного и емкостного элементов. Полное сопротивление последовательной цепи.....	17
Вопросы для самоконтроля.....	19
Список литературы.....	19
Лекция 3. Трехфазная система передачи электрической энергии	21
3.1. Принцип получения трехфазной симметричной синусоидальной системы ЭДС	21
3.2. Схемы соединения элементов трехфазных устройств. Понятия о линейных и фазных токах и напряжениях.....	22
3.2.1. Соединение обмоток генератора и фаз приемника звездой	22
3.2.2. Соединение обмоток генератора и фаз приемника треугольником	24
3.3. Режимы работы трехфазной системы без нулевого провода и с нулевым проводом; защитное заземление	25
3.3.1. Соединение фаз приемника звездой с нейтральным проводом	25
3.3.2. Соединение фаз приемника звездой без нейтрального провода	26
3.3.3. Соединение фаз приемника треугольником	26
3.3.4. Назначение нулевого провода. Защитное заземление	26
3.5. Мощности в трехфазной системе.....	28
Вопросы для самоконтроля.....	30
Список литературы.....	30
Лекция 4. Электрические машины и аппараты. Трансформаторы	31
4.1. Назначение трансформатора.....	31
4.2 Классификация трансформаторов	31
4.3. Конструкция и принцип действия, коэффициент трансформации	32

4.4. Потери энергии в трансформаторе и его КПД. Внешняя характеристика трансформатора	34
4.5. Регулирование вторичного напряжения трансформатора.....	35
Вопросы для самоконтроля.....	37
Список литературы.....	37
Лекция 5. Электрические машины.....	38
5.1. Классификация электрических машин	38
5.2. Электрические машины переменного тока. Асинхронный двигатель. Конструкция и принцип действия асинхронного двигателя	39
5.3. Скольжение асинхронного двигателя и его механическая характеристика; КПД асинхронного двигателя.....	42
5.4. Электрические машины постоянного тока.....	42
5.4.1. Генераторы постоянного тока.....	45
5.4.2. Двигатели постоянного тока.....	47
Вопросы для самоконтроля.....	47
Список литературы.....	48
Лекция 6. Элементная база электронных устройств.....	49
6.1. Классификация элементной базы	49
6.2. Электропроводимость полупроводников.....	49
6.3. Полупроводниковые диоды.....	51
6.4. Транзисторы.....	53
Вопросы для самоконтроля.....	54
Список литературы.....	54
Лекция 7. Электронные устройства.....	55
7.1. Общие сведения об электронных устройствах	55
7.2. Средства электропитания электронной аппаратуры	58
7.3. Однофазные выпрямительные устройства.....	56
7.3.1. Однополупериодный выпрямитель.....	56
7.3.2. Двухполупериодный выпрямитель.....	57
7.4. Фильтры	58
7.5. Усилители электрических сигналов.....	59
7.6. Генераторы электрических сигналов.....	60
7.6.1. Транзисторный автогенератор типа LC.....	60
7.6.2. Кварцевые генераторы.....	61
7.6.3. Генераторы импульсных сигналов.....	61
Вопросы для самоконтроля.....	62
Список литературы.....	62
Лекция 8. Дискретные устройства.....	63
8.1. Комбинационные и последовательностные цифровые устройства.....	63
8.2. Типовые элементы логических устройств.....	64
Вопросы для самоконтроля.....	68
Список литературы.....	69
Лекция 9. Логические устройства.....	70
9.1. Триггеры.....	70
9.2. Счетчики импульсов.....	72
9.3. Регистры.....	73
9.4. Шифратор.....	74
9.5. Дешифратор.....	75

9.6. Преобразователи кодов.....	75
9.7. Компаратор.....	75
Вопросы для самоконтроля.....	76
Список литературы.....	76
Лекция 10. Электроизмерительные приборы.....	77
10.1. Электрические измерения.....	77
10.2. Общие сведения об электроизмерительных приборах, их классификация.....	78
10.3. Погрешности приборов.....	80
Вопросы для самоконтроля.....	81
Список литературы.....	81
Библиографический список.....	83
Содержание.....	84