

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

БУХАРСКИЙ ИНЖЕНЕРНО – ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

**Факультет: «Электротехника и информационно –
коммуникационные технологии в производстве»**

Кафедра: «Электротехника»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

По предмету: «Электротехника и основы электроники»

Бабаназарова Н.К.

БУХАРА – 2016

Рецензент:

Зав. кафедры «Электротехника»

доц. Махмудов М.И.

Конспект лекций утвержден на заседании кафедры: «Электротехника» и БУХ. ИТИ (протокола №) от _____

Утверждено на заседании научного совета БУХ. ИТИ _____ 2016г.

Протокол № _____

АННОТАЦИЯ

Настоящий конспект лекций предназначен для изучения курса: «**Электротехника и основы электроники**» студентами вуза, осуществляющих подготовку бакалавров по неэлектротехническим направлениям и инженеров по неэлектротехническим специальностям. Ее содержание соответствует действующей типовой программе по электротехнике, электронике и электропривод для неэлектротехнических специальностей вуза.

Курс: «Электротехника, электроника и электропривод» служит для общеинженерной подготовке студентов и создания теоретической базы для изучения последующих специальных дисциплин.

СОДЕРЖАНИЕ:

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ I: ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ	
Лекция 1: Электротехнические устройства постоянного тока, сфера применения, условные обозначения. Электрическая цепь и ее элементы. ЭДС и источник тока, их свойства, характеристики и эквивалентные схемы. Закон Ома.....	6
Лекция 2: Анализ неразветвленной и разветвленной электрической цепи. Законы Кирхгофа.....	13
РАЗДЕЛ II: ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ	
Лекция 3: Синусоидальный ток и основные характеризующие его величины.....	21
Лекция 4: Активное сопротивление в цепи синусоидального тока. Индуктивность и емкость в цепи синусоидального тока, основные уравнения и векторная диаграмма, значение тока и напряжения.....	25
Лекция 5: Комплексная проводимость, треугольник сопротивлений и треугольник проводимостей.....	30
РАЗДЕЛ III: РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ЗНАЧЕНИЯ	
Лекция 6: Резонанс токов и напряжений.....	36
Лекция 7: Активная, реактивная и полная мощность и энергия. Коэффициент мощности.....	41
Лекция 8: Четырехполюсники. Особенности схем четырехполюсника.....	46
РАЗДЕЛ IV: ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	
Лекция 9: Принцип работы генератора. Трехфазная система ЭДС. Многофазные электрические цепи.....	52
Лекция 10: Схема соединения потребителей звезда и треугольник.....	55
Лекция 11: Несимметричные системы и разложение. Понятие о методе симметричных составляющих.....	60
РАЗДЕЛ V: ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ	
Лекция 12: Понятие трансформатора, принцип его работы. Энергетическая диаграмма, потери мощности, паспортные данные.....	66
Лекция 13: Машины постоянного тока, их принцип работы, обмотка. Механические и рабочие характеристики.....	71
Лекция 14: Асинхронные двигатели, принцип их работы. Энергетическая диаграмма, рабочие и механические характеристики.....	77
РАЗДЕЛ VI: ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ	

Лекция 15: Назначение, параметры и характеристики диода, тиристора, транзистора.....	84
Лекция 16: Электрические фильтры, стабилизаторы тока и напряжения. Понятие об автономных инверторах.....	89
РАЗДЕЛ VII: ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД И УПРАВЛЯЮЩИЕ АППАРАТЫ	
Лекция 17: Основные понятия об электрическом приводе, основные уравнения, механические характеристики и переходные процессы.....	94
Лекция 18: Управляющие аппараты: ручное управление, устройство защиты, контакторные реле.....	99
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ЭЛЕКТРОННЫХ БИБЛИОТЕК.....	103

ВВЕДЕНИЕ

Основы для развития электротехники заложили обширные экспериментальные исследования и создание теорий электричества и магнетизма. Широкое практическое применение электричества стало возможно только в XIX веке с появлением вольтова столба, что позволило как найти приложение открытым законам, так и углубить исследования. В этот период вся электротехника базировалась на постоянном токе.

В конце XIX века, с преодолением проблемы передачи электроэнергии на большие расстояния за счет использования переменного тока и созданием трехфазного электродвигателя, электричество повсеместно внедряется в промышленность, а электротехника приобретает современный вид, включающий множество разделов, и оказывает влияние на смежные отрасли науки и техники.

Электротехника – область техники, связанная с получением, распределением, преобразованием и использованием электрической энергии. А также – с разработкой, эксплуатацией и оптимизацией электронных компонентов, электронных схем и устройств, оборудования и технических систем. Под электротехникой также понимают техническую науку, которая изучает применение электрических и магнитных явлений для практического использования. Электротехника выделилась в самостоятельную науку из физики в конце XIX века. В настоящее время электротехника как наука включает в себя следующие научные специальности (отрасли науки): электрические машины, ТОО, основы электропривода, силовая электроника. Кроме того, к отраслям электротехники часто относят энергетику, хотя легитимная классификация рассматривает энергетику как отдельную техническую науку. Основное отличие электротехники от слаботочной электроники заключается в том, что электротехника изучает проблемы, связанные с силовыми крупногабаритными электронными компонентами: линии электропередачи, электрические приводы, в то время как в электронике основными компонентами являются компьютеры и другие устройства на базе интегральных схем, а также сами интегральные схемы. В другом смысле, в электротехнике основной задачей является передача электрической энергии, а в электронике – информации.

РАЗДЕЛ I: ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Лекция 1: Электротехнические устройства постоянного тока, сфера применения, условные обозначения. Электрическая цепь и ее элементы. ЭДС и источник тока, их свойства, характеристики и эквивалентные схемы. Закон Ома.

План лекции:

1. Электротехнические устройства постоянного тока, сфера применения, условные обозначения.
2. Электрическая цепь и ее элементы.
3. ЭДС и источник тока, их свойства, характеристики и эквивалентные схемы.
4. Закон Ома.

Электротехнические устройства постоянного тока, сфера применения, условные обозначения.

Электромагнитные процессы, протекающие в электротехнических устройствах, как правило, достаточно сложны. Однако во многих случаях, их основные характеристики можно описать с помощью таких интегральных понятий, как: напряжение, ток, электродвижущая сила (ЭДС). При таком подходе совокупность электротехнических устройств, состоящую из соответствующим образом соединенных источников и приемников электрической энергии, предназначенных для генерации, передачи, распределения и преобразования электрической энергии и (или) информации, рассматривают как *электрическую цепь*. Электрическая цепь состоит из отдельных частей (объектов), выполняющих определенные функции и называемых *элементами цепи*. Основными элементами цепи являются источники и приемники электрической энергии (сигналов).

Электротехнические устройства, производящие электрическую энергию, называются *генераторами* или *источниками электрической энергии*, а устройства, потребляющие ее – *приемниками* (потребителями) электрической энергии.

У каждого элемента цепи можно выделить определенное число зажимов (*полюсов*), с помощью которых он соединяется с другими элементами. Различают *двух – и многополюсные* элементы. Двухполюсники имеют два зажима. К ним относятся источники энергии (за исключением управляемых и многофазных), резисторы, катушки индуктивности, конденсаторы. Многополюсные элементы – это, например, триоды, трансформаторы, усилители и т.д.

Все элементы электрической цепи условно можно разделить на *активные и пассивные*. Активным называется элемент, содержащий в своей

структуре источник электрической энергии. К пассивным относятся элементы, в которых рассеивается (резисторы) или накапливается (катушка индуктивности и конденсаторы) энергия. К основным характеристикам элементов цепи относятся их вольт – амперные, вебер – амперные и кулон–вольтные характеристики, описываемые дифференциальными или (и) алгебраическими уравнениями. Если элементы описываются линейными дифференциальными или алгебраическими уравнениями, то они называются *линейными*, в противном случае они относятся к классу *нелинейных*. Строго говоря, все элементы являются нелинейными. Возможность рассмотрения их как линейных, что существенно упрощает математическое описание и анализ процессов, определяется границами изменения характеризующих их переменных и их частот. Коэффициенты, связывающие переменные, их производные и интегралы в этих уравнениях, называются *параметрами элемента*.

Электрическая цепь и ее элементы.

Рассмотрим пассивные элементы цепи, их основные характеристики и параметры.

1. Резистивный элемент (резистор)

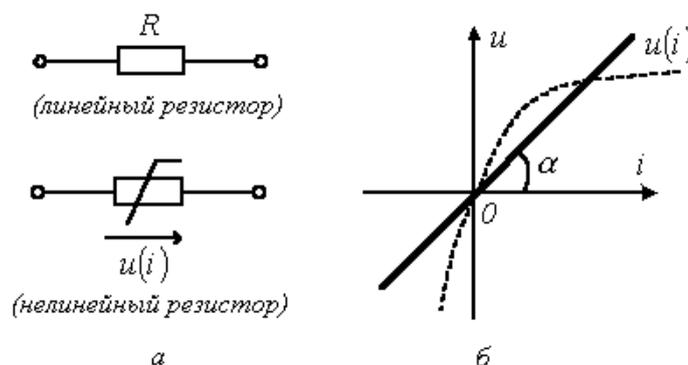


Рис.1

Условное графическое изображение резистора приведено на рис. 1,а. Резистор – это пассивный элемент, характеризующийся резистивным сопротивлением. Последнее определяется геометрическими размерами тела и свойствами материала: удельным сопротивлением ρ (Ом·м) или обратной величиной – удельной проводимостью $\gamma = \rho^{-1}$ (См/м). В простейшем случае проводника длиной ℓ и сечением S его сопротивление определяется выражением

$$R = \rho \frac{\ell}{S} = \frac{\ell}{\gamma S} \text{ (Ом)}$$

В общем случае определение сопротивления связано с расчетом поля в проводящей среде, разделяющей два электрода.

Основной характеристикой резистивного элемента является зависимость $u(i)$ (или $i(u)$), называемая вольт – амперной характеристикой (ВАХ). Если зависимость $u(i)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (см.рис. 1,б), то резистор называется линейным и описывается соотношением

$$u = Ri = m_{Ritg} \alpha$$

или

$$i = gu,$$

где $g = R^{-1}$ – проводимость. При этом $R = const$.

Нелинейный резистивный элемент, ВАХ которого нелинейна (рис. 1,б)

2. Индуктивный элемент (катушка индуктивности)

Условное графическое изображение катушки индуктивности приведено на рис. 2,а. Катушка – это пассивный элемент, характеризующийся индуктивностью. Для расчета индуктивности катушки необходимо рассчитать созданное ею магнитное поле.

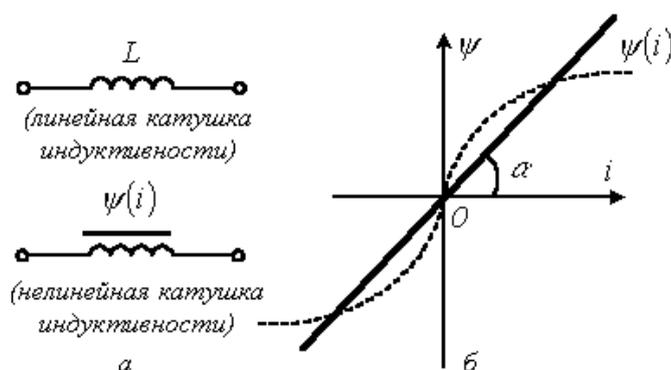


Рис.2

Индуктивность определяется отношением потокосцепления к току, протекающему по виткам катушки,

$$L = \frac{\Psi}{i} \text{ (Гн)}$$

В свою очередь потокосцепление равно сумме произведений потока,

пронизывающего витки, на число этих витков $\Psi = \sum w_x \Phi_x$, где $\Phi_x = \int_{S_x} \vec{B} d\vec{S}$.

Основной характеристикой катушки индуктивности является зависимость $\Psi(i)$, называемая вебер–амперной характеристикой. Для линейных катушек индуктивности зависимость $\Psi(i)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат (см. рис. 2,б)

3. Емкостный элемент (конденсатор)

Условное графическое изображение конденсатора приведено на рис. 3,а.

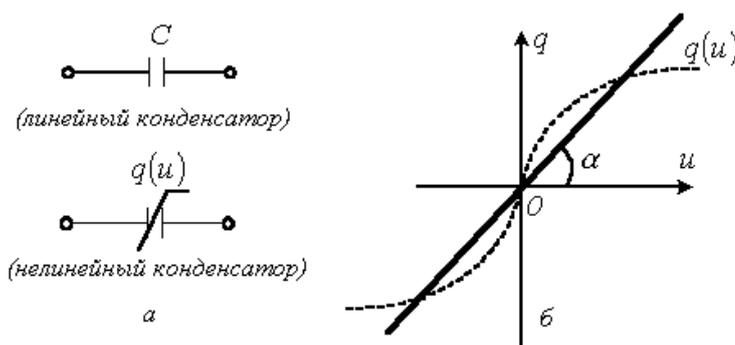


Рис.3

Конденсатор – это пассивный элемент, характеризующийся емкостью. Для расчета последней необходимо рассчитать электрическое поле в конденсаторе. Емкость определяется отношением заряда q на обкладках конденсатора к напряжению u между ними

$$C = \frac{q}{u} (\Phi)$$

и зависит от геометрии обкладок и свойств диэлектрика, находящегося между ними. Большинство диэлектриков, используемых на практике, линейны, т.е. у них относительная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon = const$. В этом случае зависимость $q(u)$ представляет собой прямую линию, проходящую через начало координат, (см. рис. 3,б) и

$$C = m \operatorname{ctg} \alpha = const$$

У нелинейных диэлектриков (сегнетоэлектриков) диэлектрическая проницаемость является функцией напряженности поля, что обуславливает нелинейность зависимости $q(u)$ (рис. 3,б).

ЭДС и источник тока, их свойства, характеристики и эквивалентные схемы.

В этом разделе для упрощения анализа и математического описания будут рассматриваться источники постоянного напряжения (тока). Однако все полученные при этом закономерности, понятия и эквивалентные схемы в полной мере распространяются на источники переменного тока. ВАХ источника может быть определена экспериментально на основе схемы, представленной на рис. 4,а. Здесь вольтметр V измеряет напряжение на зажимах 1 – 2 источника I , а амперметр A – потребляемый от него ток I , величина которого может изменяться с помощью переменного нагрузочного резистора (реостата) R_H .

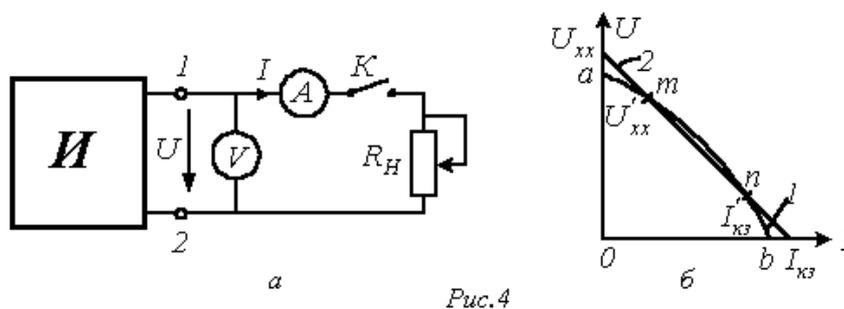


Рис.4

В общем случае ВАХ источника является нелинейной (кривая 1 на рис. 4,б). Она имеет две характерные точки, которые соответствуют:

а – режиму холостого хода ($I = 0; U = U'_{xx}$);

б – режиму короткого замыкания ($U = 0; I = I'_{кз}$).

Для большинства источников режим короткого замыкания (иногда холостого хода) является недопустимым. Токи и напряжения источника обычно могут изменяться в определенных пределах, ограниченных сверху значениями, соответствующими *номинальному режиму* (режиму, при котором изготовитель гарантирует наилучшие условия его эксплуатации в отношении экономичности и долговечности срока службы). Это позволяет в ряде случаев для упрощения расчетов аппроксимировать нелинейную ВАХ на рабочем участке $m - n$ (см. рис. 4,б) прямой, положение которой определяется рабочими интервалами изменения напряжения и тока. Следует отметить, что многие источники (гальванические элементы, аккумуляторы) имеют линейные ВАХ.

Прямая 2 на рис. 4,б описывается линейным уравнением

$$U = U_{xx} - R_{вн} \cdot I \quad (1)$$

где U_{xx} – напряжение на зажимах источника при отключенной нагрузке (разомкнутом ключе К в схеме на рис. 4,а); $R_{вн} = U_{xx} / I_{кз}$ – внутреннее сопротивление источника.

Уравнение (1) позволяет составить последовательную схему замещения источника (см. рис. 5,а). На этой схеме символом E обозначен элемент, называемый идеальным источником ЭДС. Напряжение на зажимах этого элемента $U_{xx} = E = const$ не зависит от тока источника, следовательно, ему соответствует ВАХ на рис. 5,б. На основании (1) у такого источника $R_{вн} = 0$. Отметим, что направления ЭДС и напряжения на зажимах источника противоположны.

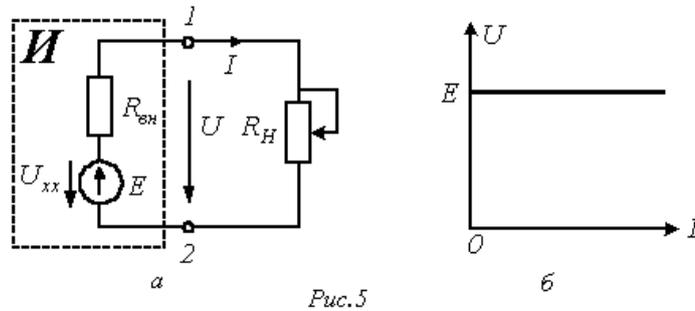


Рис.5

Если ВАХ источника линейна, то для определения параметров его схемы замещения необходимо провести замеры напряжения и тока для двух любых режимов его работы.

Существует также параллельная схема замещения источника. Для ее описания разделим левую и правую части соотношения (1) на $R_{вн}$. В результате получим

$$I = \frac{U_{xx}}{R_{вн}} - \frac{U}{R_{вн}} = I_{кз} - \frac{U}{R_{вн}}$$

или

$$I = J - g_{вн} U, \quad (2)$$

где $J = I_{кз}$; $g_{вн} = R_{вн}^{-1}$ – внутренняя проводимость источника.

Уравнению (2) соответствует схема замещения источника на рис. 6,а.

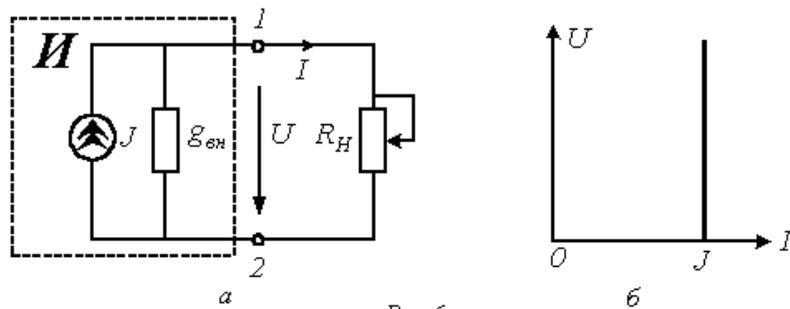


Рис.6

На этой схеме символом J обозначен элемент, называемый *идеальным источником тока*. Ток в ветви с этим элементом равен $J = I_{кз}$ и не зависит от напряжения на зажимах источника, следовательно, ему соответствует ВАХ на рис. 6,б. На этом основании с учетом (2) у такого источника $\mathcal{E}_{вн} = 0$, т.е. его внутреннее сопротивление $R_{вн} = \infty$.

Отметим, что в расчетном плане при выполнении условия $E = JR_{вн}$ последовательная и параллельная схемы замещения источника являются эквивалентными. Однако в энергетическом отношении они различны, поскольку в режиме холостого хода для последовательной схемы замещения мощность равна нулю, а для параллельной – нет.

Закон Ома

Закон Ома устанавливает связь между током, напряжением и параметрами элементов в неразветвленной электрической цепи и позволяет рассчитывать в них токи. В электротехнике рассматривают три формулировки закона Ома.

Закон Ома для участка цепи с источником ЭДС



Рис. 7

Возьмем два участка цепи $a-b$ и $c-d$ (см. рис. 7) и составим для них уравнения в комплексной форме с учетом указанных на рис. 7 положительных направлений напряжений и токов.

$$\begin{aligned}\dot{\phi}_a &= \dot{\phi}_b + \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1; & \dot{\phi}_c &= \dot{\phi}_d + \dot{E}_2 + \dot{I}_2 Z_2; \\ \dot{U}_{ab} &= \dot{\phi}_a - \dot{\phi}_b = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 Z_1; & \dot{U}_{cd} &= \dot{\phi}_c - \dot{\phi}_d = \dot{E}_2 + \dot{I}_2 Z_2; \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{E}_1 - \dot{U}_{ab}}{Z_1}. & \dot{I}_2 &= \frac{-\dot{E}_2 + \dot{U}_{cd}}{Z_2}.\end{aligned}$$

Объединяя оба случая, получим

$$\dot{I} = \frac{\pm \dot{E} \mp \dot{U}}{Z} \quad (3)$$

или для постоянного тока

$$I = \frac{\pm E \mp U}{R} \quad (4)$$

Формулы (3) и (4) являются *аналитическим выражением закона Ома для участка цепи с источником ЭДС*, согласно которому ток на участке цепи с источником ЭДС равен алгебраической сумме напряжения на зажимах участка цепи и ЭДС, деленной на сопротивление участка. В случае переменного тока все указанные величины суть комплексы. При этом ЭДС и напряжение берут со знаком “+”, если их направление совпадает с выбранным направлением тока, и со знаком “-”, если их направление противоположно направлению тока.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент. Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 2: Анализ неразветвленной и разветвленной электрической цепи. Законы Кирхгофа.

План лекции:

1. Анализ неразветвленной и разветвленной электрической цепи.
2. Законы Кирхгофа.

Электрическая цепь характеризуется совокупностью элементов, из которых она состоит, и способом их соединения. Соединение элементов электрической цепи наглядно отображается ее схемой. Рассмотрим для примера две электрические схемы (рис. 1, 2), введя понятие ветви и узла.

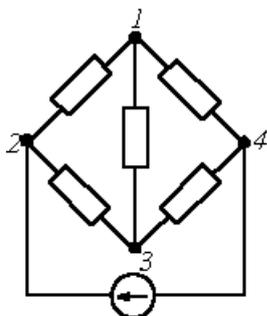


Рис. 1

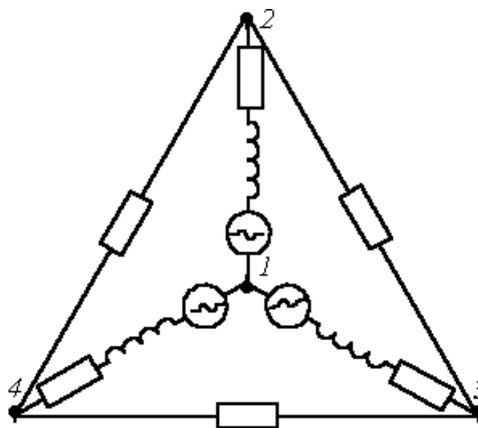


Рис.2

Ветвью называется участок цепи, обтекаемый одним и тем же током.

Узел – место соединения трех и более ветвей.

Представленные схемы различны и по форме, и по назначению, но каждая из указанных цепей содержит по 6 ветвей и 4 узла, одинаково соединенных. Таким образом, в смысле геометрии (топологии) соединений ветвей данные схемы идентичны.

Топологические (геометрические) свойства электрической цепи не зависят от типа и свойств элементов, из которых состоит ветвь. Поэтому целесообразно каждую ветвь схемы электрической цепи изобразить отрезком линии. Если каждую ветвь схем на рис. 1 и 2 заменить отрезком линии, получается геометрическая фигура, показанная на рис. 3.

Условное изображение схемы, в котором каждая ветвь заменяется отрезком линии, называется *графом электрической цепи*. При этом следует помнить, что ветви могут состоять из каких – либо элементов, в свою очередь соединенных различным образом.

Отрезок линии, соответствующий ветви схемы, называется *ветвью графа*. Граничные точки ветви графа называют *узлами графа*. Ветвям графа может быть дана определенная ориентация, указанная стрелкой. Граф, у которого все ветви ориентированы, называется *ориентированным*.

Подграфом графа называется часть графа, т.е. это может быть одна ветвь или один изолированный узел графа, а также любое множество ветвей и узлов, содержащихся в графе.

В теории электрических цепей важное значение имеют следующие подграфы:

1. *Путь* – это упорядоченная последовательность ветвей, в которой каждые две соседние ветви имеют общий узел, причем любая ветвь и любой узел встречаются на этом пути только один раз. Например, в схеме на рис. 3 ветви **2-6-5**; **4-5**; **3-6-4**; **1** образуют пути между одной и той же парой узлов **1** и **3**. Таким образом, путь – это совокупность ветвей, проходимых непрерывно.
2. *Контур* – замкнутый путь, в котором один из узлов является начальным и конечным узлом пути. Например, для графа по рис. 3 можно определить контуры, образованные ветвями **2-4-6**; **3-5-6**; **2-3-5-4**. Если между любой парой узлов графа существует связь, то граф называют связным.
3. *Дерево* – это связный подграф, содержащий все узлы графа, но ни одного контура. Примерами деревьев для графа на рис. 3 могут служить фигуры на рис. 4.

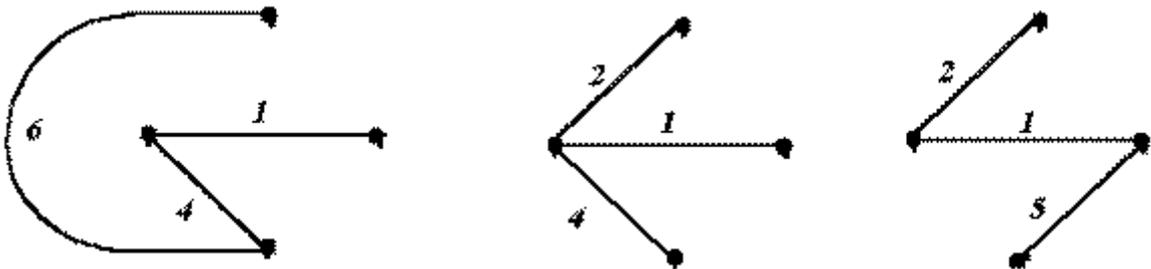


Рис.4

4. *Ветви связи (дополнения дерева)* – это ветви графа, дополняющие дерево до исходного графа.

Если граф содержит m узлов и n ветвей, то число ветвей любого дерева $\partial = m - 1$, а числа ветвей связи графа $c = n - (m - 1) = n - m + 1$.

5. *Сечение графа* – множество ветвей, удаление которых делит граф на два изолированных подграфа, один из которых, в частности, может быть отдельным узлом.

Сечение можно наглядно изобразить в виде следа некоторой замкнутой поверхности, рассекающей соответствующие ветви. Примерами таких поверхностей являются для нашего графа на рис. 3 S_1 и S_2 . При этом получаем соответственно сечения, образованные ветвями **6-4-5** и **6-2-1-5**.

С понятием дерева связаны понятия главных контуров и сечений:

- главный контур – контур, состоящий из ветвей дерева и только одной ветви связи;
- главное сечение – сечение, состоящее из ветвей связи и только одной ветви дерева.

Законы Кирхгофа

Первый закон Кирхгофа

Обычно первый закон Кирхгофа записывается для узлов схемы, но, строго говоря, он справедлив не только для узлов, но и для любой замкнутой поверхности, т.е. справедливо соотношение

$$\oint \bar{\delta} d\bar{S} = 0 \quad (1)$$

Где $\bar{\delta}$ – вектор плотности тока; $d\bar{S}$ – нормаль к участку dS замкнутой поверхности S .

Первый закон Кирхгофа справедлив и для любого сечения. В частности, для сечения S_2 графа на рис. 3, считая, что нумерация и направления токов в ветвях соответствуют нумерации и выбранной ориентации ветвей графа, можно записать

$$I_1 + I_2 - I_5 - I_6 = 0$$

Поскольку в частном случае ветви сечения сходятся в узле, то первый закон Кирхгофа справедлив и для него. Пока будем применять первый закон Кирхгофа для узлов, что математически можно записать, как:

$$\sum_k I_k = 0 \quad (2)$$

т.е. алгебраическая сумма токов ветвей, соединенных в узел, равна нулю.

При этом при расчетах уравнения по первому закону Кирхгофа записываются для $(m-1)$ узлов, так как при записи уравнений для всех m узлов одно (любое) из них будет линейно зависимым от других, т.е. не дает дополнительной информации.

Введем столбцовую матрицу токов ветвей

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}$$

Тогда первый закон Кирхгофа в матричной форме записи имеет вид:

$$\mathbf{A}\mathbf{I} = \mathbf{0} \quad (3)$$

– где \mathbf{O} – нулевая матрица – столбец. Как видим, в качестве узловой взята матрица \mathbf{A} , а не \mathbf{A}_H , т.к. с учетом вышесказанного уравнения по первому закону Кирхгофа записываются для $(m-1)$ узлов.

В качестве примера запишем для схемы на рис. 3

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Отсюда для первого узла получаем

$$1 \cdot I_1 + 1 \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 - 1 \cdot I_4 + 0 \cdot I_5 + 0 \cdot I_6 = I_1 + I_2 - I_4 = 0,$$

что и должно иметь место.

2. Контурная матрица (матрица контуров) – это таблица коэффициентов уравнений, составленных по второму закону Кирхгофа. Строки контурной матрицы B соответствуют контурам, а столбцы – ветвям схемы.

Элемент b_{ij} матрицы B равен 1 , если ветвь j входит в контур i и ее ориентация совпадает с направлением обхода контура, -1 , если не совпадает с направлением обхода контура, и 0 , если ветвь j не входит в контур i .

Матрицу B , записанную для главных контуров, называют *матрицей главных контуров*. При этом за направление обхода контура принимают направление ветви связи этого контура. Выделив в нашем примере (см. рис. 5) дерево, образуемое ветвями **2-1-4**, запишем коэффициенты для матрицы B .

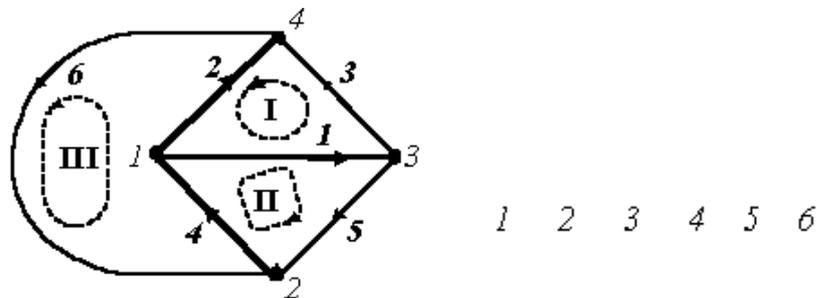


Рис.5

$$\mathbf{B} = \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Перейдем теперь ко второму закону Кирхгофа.

Под напряжением на некотором участке электрической цепи понимается разность потенциалов между крайними точками этого участка, т.е.

$$U_{ke} = \varphi_k - \varphi_e = -(\varphi_e - \varphi_k) = -U_{ek} \quad (4)$$

Просуммируем напряжения на ветвях некоторого контура:

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2$$

+

$$U_{23} = \varphi_2 - \varphi_3$$

+

.....

+

$$U_{k1} = \varphi_k - \varphi_1$$

$$= 0.$$

Поскольку при обходе контура потенциал каждой i – ой точки встречается два раза, причем один раз с “+”, а второй – с “–”, то в целом сумма равна нулю.

Таким образом, второй закон Кирхгофа математически записывается, как:

$$\sum_k U_k = 0, \quad (5)$$

– и имеет место следующую формулировку: алгебраическая сумма напряжений на зажимах ветвей (элементов) контура равна нулю. При этом при расчете цепей с использованием законов Кирхгофа записывается $c = (n - m + 1)$ независимых уравнений по второму закону Кирхгофа, т.е. уравнений, записываемых для контуров, каждый из которых отличается от других хотя бы одной ветвью. Значение топологического понятия “дерева”: дерево позволяет образовать независимые контуры и сечения и, следовательно, формировать независимые уравнения по законам Кирхгофа. Таким образом, с учетом $(m-1)$ уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа, получаем систему из $(m-1) + (n - m + 1) = n$ уравнений, что равно числу ветвей схемы и, следовательно, токи в них находятся однозначно.

Введем столбцовую матрицу напряжений ветвей

$$U = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix}$$

Тогда второй закон Кирхгофа в матричной форме записи имеет вид

$$BU = 0 \quad (6)$$

В качестве примера для схемы рис. 5 имеем

$$\begin{bmatrix} 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = [0]$$

откуда, например, для первого контура получаем

$$1 \cdot U_1 - 1 \cdot U_2 + 1 \cdot U_3 + 0 \cdot U_4 + 0 \cdot U_5 + 0 \cdot U_6 = U_1 - U_2 + U_3 = 0,$$

что и должно иметь место.

Если ввести столбцовую матрицу узловых потенциалов

$$\varphi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_{m-1} \end{bmatrix}$$

причем потенциал последнего узла $\varphi_m = 0$, то матрица напряжений ветвей и узловых потенциалов связаны соотношением

$$U = A^T \varphi \quad (7)$$

где A^T – транспонированная узловая матрица.

Для определения матрицы B по известной матрице $A = A_D A_C$, где A_D – подматрица, соответствующая ветвям некоторого дерева, A_C – подматрица, соответствующая ветвям связи, может быть использовано соотношение

$$B = (-A_C^T A_D^{-1T} I).$$

3. Матрица сечений – это таблица коэффициентов уравнений, составленных по первому закону Кирхгофа для сечений. Ее строки соответствуют сечениям, а столбцы – ветвям графа.

Матрица Q , составленная для главных сечений, называется *матрицей главных сечений*. Число строк матрицы Q равно числу независимых сечений.

Элемент q_{ij} матрицы Q равен 1, если ветвь входит в i -е сечение и ориентирована согласно направлению сечения (за положительное направление сечения принимают направление ветви дерева, входящей в

него), -1 , если ориентирована противоположно направлению сечения, и 0 , если ветвь j не входит в i -е сечение.

В качестве примера составим матрицу Q главных сечений для графа на рис.

5. При указанной на рис. 5 ориентации ветвей имеем

$$Q = \begin{matrix} & \begin{matrix} 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

В заключение отметим, что для топологических матриц A , B и Q , составленных для одного и того же графа, выполняются соотношения

$$AB^T = 0 \quad (8)$$

$$QB^T = 0 \quad (9)$$

которые, в частности, можно использовать для проверки правильности составления этих матриц. Здесь 0 – нулевая матрица порядка δ .

Приведенные уравнения позволяют сделать важное заключение: зная одну из топологических матриц, по ее структуре можно восстановить остальные.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент. Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Контрольные вопросы

1. Может ли внешняя характеристика источника проходить через начало координат?
2. Какой режим (холостой ход или короткое замыкание) является аварийным для источника тока?
3. В чем заключаются эквивалентность и различие последовательной и параллельной схем замещения источника?
4. Сформулируйте закон Ома
5. Сформулируйте закон Кирхгофа

4. Сформулируйте основные топологические понятия для электрических цепей.
5. Что такое узловая матрица?
6. Что такое контурная матрица?
7. Что такое источник тока?
8. Что такое источник напряжения?

РАЗДЕЛ II: ОДНОФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Лекция 3: Синусоидальный ток и основные характеризующие его величины.

План лекции:

1. Синусоидальный ток и основные характеризующие его величины.
2. Действующее значение синусоидальных ЭДС, напряжений и токов

Синусоидальный ток и основные характеризующие его величины.

Из всех возможных форм периодических токов наибольшее распространение получил синусоидальный ток. По сравнению с другими видами тока синусоидальный ток имеет то преимущество, что позволяет в общем случае наиболее экономично осуществлять производство, передачу, распределение и использование электрической энергии. Только при использовании синусоидального тока удастся сохранить неизменными формы кривых напряжений и токов на всех участках сложной линейной цепи. Теория синусоидального тока является ключом к пониманию теории других цепей.

Изображение синусоидальных ЭДС, напряжений
и токов на плоскости декартовых координат

Синусоидальные токи и напряжения можно изобразить графически, записать при помощи уравнений с тригонометрическими функциями, представить в виде векторов на декартовой плоскости или комплексными числами. Приведенным на рис. 1, 2 графикам двух синусоидальных ЭДС e_1 и e_2 соответствуют уравнения:

$$e_1 = E_{1m} \sin(\omega t + \Psi_{e1}); \quad e_2 = E_{2m} \sin(\omega t + \Psi_{e2}).$$

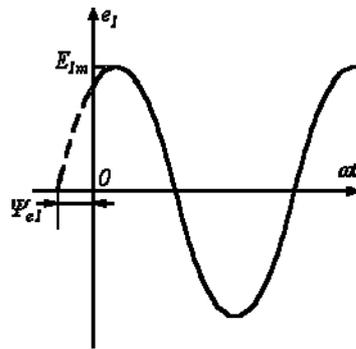


Рис.1

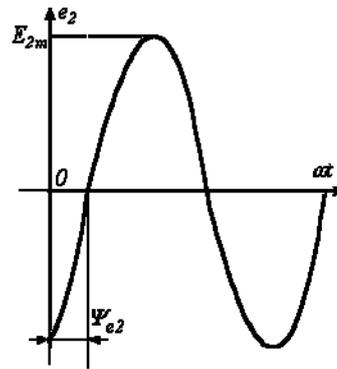


Рис.2

Значения аргументов синусоидальных функций $(\alpha t + \Psi_{e1})$ и $(\alpha t + \Psi_{e2})$ называются *фазами* синусоид, а значение фазы в начальный момент времени ($t=0$): Ψ_{e1} и Ψ_{e2} – *начальной фазой* ($\Psi_{e1} > 0$; $\Psi_{e2} < 0$).

Величину ω , характеризующую скорость изменения фазового угла, называют *угловой частотой*. Так как фазовый угол синусоиды за время одного периода T изменяется на 2π рад, то угловая частота есть

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f,$$

где f – частота.

При совместном рассмотрении двух синусоидальных величин одной частоты разность их фазовых углов, равную разности начальных фаз, называют *углом сдвига фаз*.

Для синусоидальных ЭДС e_1 и e_2 угол сдвига фаз:

$$\alpha = (\alpha t + \Psi_{e1}) - (\alpha t + \Psi_{e2}) = \Psi_{e1} - \Psi_{e2}.$$

На декартовой плоскости из начала координат проводят векторы, равные по модулю амплитудным значениям синусоидальных величин, и вращают эти векторы против часовой стрелки с угловой частотой, равной ω . Фазовый угол при вращении отсчитывается от положительной полуоси абсцисс. Проекции вращающихся векторов на ось ординат равны мгновенным значениям ЭДС e_1 и e_2 (рис. 3). Совокупность векторов, изображающих синусоидально изменяющиеся ЭДС, напряжения и токи, называют *векторными диаграммами*. При построении векторных диаграмм векторы удобно располагать для начального момента времени ($t=0$), что вытекает из равенства угловых частот синусоидальных величин и эквивалентно тому, что система декартовых координат сама вращается против часовой стрелки со скоростью ω . Таким образом, в этой системе координат векторы неподвижны (рис. 4). Векторные диаграммы нашли

широкое применение при анализе цепей синусоидального тока. Их применение делает расчет цепи более наглядным и простым. Это упрощение заключается в том, что сложение и вычитание мгновенных значений величин можно заменить сложением и вычитанием соответствующих векторов.

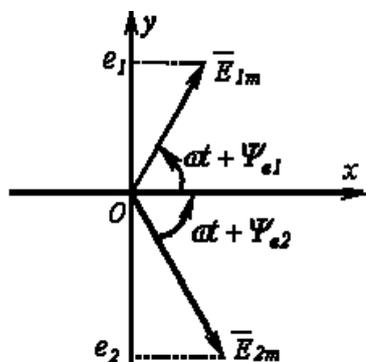


Рис. 3

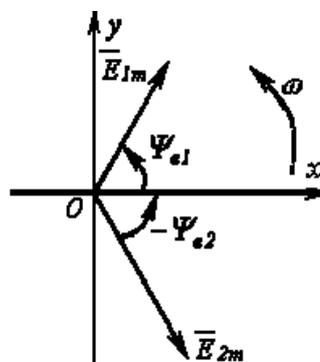


Рис. 4

Пусть, например, в точке разветвления цепи (рис. 5) общий ток i_3 равен сумме токов i_1 и i_2 двух ветвей:

$$i_3 = i_1 + i_2.$$

Каждый из этих токов синусоидален и может быть представлен уравнением

$$i_1 = I_{1m} \sin(\alpha t + \Psi_1) \quad \text{и} \quad i_2 = I_{2m} \sin(\alpha t + \Psi_2).$$

Результирующий ток также будет синусоидален:

$$i_3 = I_{1m} \sin(\alpha t + \Psi_1) + I_{2m} \sin(\alpha t + \Psi_2) = I_{3m} \sin(\alpha t + \Psi_3).$$

Определение амплитуды I_{3m} и начальной фазы Ψ_3 этого тока путем соответствующих тригонометрических преобразований получается довольно громоздким и мало наглядным, особенно, если суммируется большое число синусоидальных величин. Значительно проще это осуществляется с помощью векторной диаграммы. На рис. 6 изображены начальные положения векторов токов, проекции которых на ось ординат дают мгновенные значения токов для $t=0$. При вращении этих векторов с одинаковой угловой скоростью ω их взаимное расположение не меняется, и угол сдвига фаз между ними остается равным $\alpha = \Psi_1 - \Psi_2$.

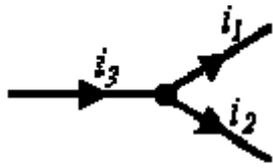


Рис.5

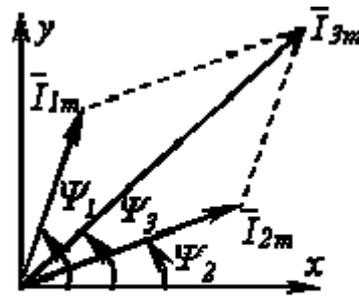


Рис. 6

Так как алгебраическая сумма проекций векторов на ось ординат равна мгновенному значению общего тока, вектор общего тока равен геометрической сумме векторов токов:

$$\bar{I}_{3m} = \bar{I}_{1m} + \bar{I}_{2m}.$$

Построение векторной диаграммы в масштабе позволяет определить значения I_{3m} и Ψ_3 из диаграммы, после чего может быть записано решение для мгновенного значения i_3 путем формального учета угловой частоты:

$$i_3 = I_{3m} \sin(\omega t + \Psi_3).$$

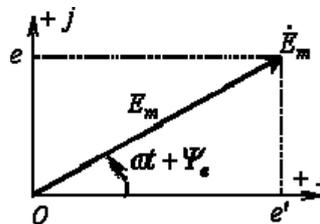


Рис.7

Действующее значение синусоидальных ЭДС, напряжений и токов

Для действующего значения синусоидального тока запишем:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{I_m^2 \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \frac{I_m^2 \cdot T}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

Аналогичный результат можно получить для синусоидальных ЭДС и напряжений. Таким образом, действующие значения синусоидальных тока, ЭДС и напряжения меньше своих амплитудных значений в $\sqrt{2}$ раз:

$$X = \frac{X_m}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Поскольку, как будет показано далее, энергетический расчет цепей переменного тока обычно проводится с использованием действующих значений величин, по аналогии с предыдущим введем понятие *комплекс действующего значения*

$$\dot{E} = E e^{j\Psi_e} = \frac{\dot{E}_m}{\sqrt{2}} = \frac{E_m}{\sqrt{2}} e^{j\Psi_e}$$

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент. Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 4: Активное сопротивление в цепи синусоидального тока. Индуктивность и емкость в цепи синусоидального тока, основные уравнения и векторная диаграмма, значение тока и напряжения.

План лекции:

1. Активное сопротивление в цепи синусоидального тока.
2. Индуктивность и емкость в цепи синусоидального тока, основные уравнения и векторная диаграмма, значение тока и напряжения.

Активное сопротивление в цепи синусоидального тока.

1. Резистор

Идеальный резистивный элемент не обладает ни индуктивностью, ни емкостью (рис. 1).

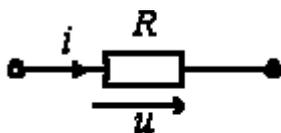


Рис.1

Если к нему приложить синусоидальное напряжение

$u = U_m \sin(\omega t + \Psi)$, то ток i через него будет равен

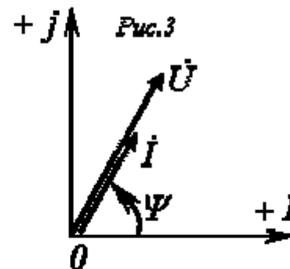
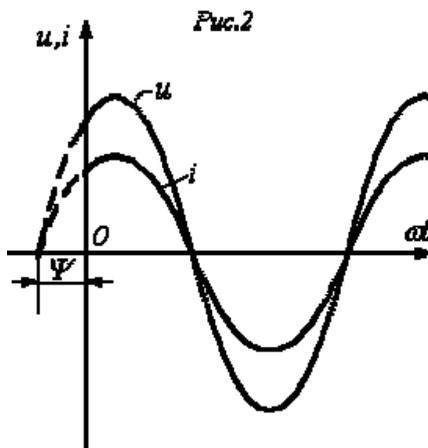
$$i = \frac{u}{R} = \frac{U_m}{R} \sin(\omega t + \Psi) = I_m \sin(\omega t + \Psi) \quad (1)$$

Соотношение (1) показывает, что ток имеет ту же начальную фазу, что и напряжение. Таким образом, если на входе двухлучевого осциллографа подать сигналы u и i , то соответствующие им синусоиды на его экране будут проходить (см. рис. 2) через нуль одновременно, т.е. на резисторе напряжение и ток совпадают по фазе.

Из (1) вытекает:

$$U_m = RI_m;$$

$$U = RI.$$



Переходя от синусоидальных функций напряжения и тока к соответствующим им комплексам:

$$u = U_m \sin(\omega t + \Psi) \Rightarrow \dot{U} = Ue^{j\Psi};$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi) \Rightarrow \dot{I} = Ie^{j\Psi},$$

- разделим первый из них на второй:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\Psi}}{Ie^{j\Psi}} = \frac{U}{I} = R$$

или $\dot{U} = R\dot{I}$ (2)

Полученный результат показывает, что отношение двух комплексов есть вещественная константа. Следовательно, соответствующие им векторы напряжения и тока (см. рис. 3) совпадают по направлению.

Введенный параметр $X_C = 1/(\omega C)$ называют *реактивным емкостным сопротивлением конденсатора*. Как и резистивное сопротивление, X_C имеет размерность *Ом*. Однако в отличие от R данный параметр является функцией частоты, что иллюстрирует рис. 6. Из рис. 6 вытекает, что при $f = 0$ конденсатор представляет разрыв для тока, а при $f \rightarrow \infty X_C = 0$.

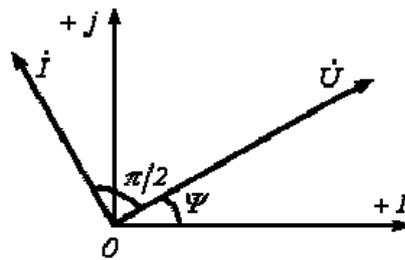


Рис.7

Переходя от синусоидальных функций напряжения и тока к соответствующим им комплексам:

$$u = U_m \sin(\omega t + \Psi) \Rightarrow \dot{U} = U e^{j\Psi};$$

$$i = I_m \sin\left(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow \dot{I} = I e^{j\left(\Psi + \frac{\pi}{2}\right)},$$

- разделим первый из них на второй:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{U e^{j\Psi}}{I e^{j\left(\Psi + \frac{\pi}{2}\right)}} = \frac{U e^{j\Psi}}{I e^{j\Psi} e^{j\frac{\pi}{2}}} = X_C e^{-j\frac{\pi}{2}} = -jX_C = \underline{Z}_C$$

или

$$\dot{U} = -jX_C \dot{I} = \underline{Z}_C \dot{I} \quad (4)$$

В последнем соотношении $\underline{Z}_C = -jX_C$ - комплексное сопротивление конденсатора. Умножение на $-j = e^{-j\frac{\pi}{2}}$ соответствует повороту вектора на угол $\pi/2$ по часовой стрелке. Следовательно, уравнению (4) соответствует векторная диаграмма, представленная на рис. 7.

3. Катушка индуктивности

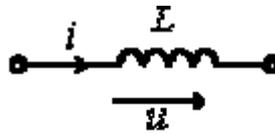


Рис.8

Идеальный индуктивный элемент не обладает ни активным сопротивлением, ни емкостью. Пусть протекающий через него ток (см. рис. 8) определяется выражением $i = I_m \sin(\omega t + \Psi)$. Тогда для напряжения на зажимах катушки индуктивности можно записать

$$u = -e = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{d}{dt}(Li) = \omega LI_m \sin\left(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}\right) = U_m \sin\left(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}\right) \quad (5)$$

Полученный результат показывает, что *напряжение на катушке индуктивности опережает по фазе ток на $\pi/2$* . Таким образом, если на входы двухлучевого осциллографа подать сигналы u и i , то на его экране (идеальный индуктивный элемент) будет иметь место картинка, соответствующая рис. 9.

Из (5) вытекает:

$$U_m = \omega LI_m = X_L I_m;$$

$$U = \omega LI = X_L I$$

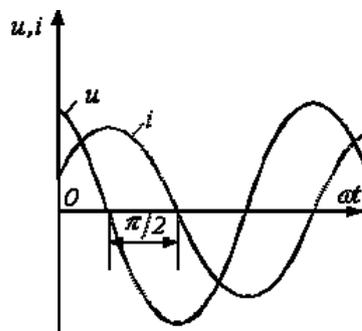


Рис.9

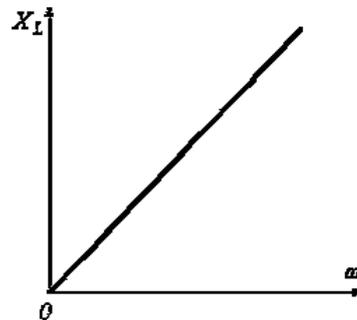


Рис.10

Введенный параметр $X_L = \omega L$ называют *реактивным индуктивным сопротивлением катушки*; его размерность – Ом. Как и у емкостного элемента этот параметр является функцией частоты. Однако в данном случае эта зависимость имеет линейный характер, что иллюстрирует рис. 10. Из рис. 10 вытекает, что при $f = 0$ катушка индуктивности не оказывает сопротивления протекающему через него току, и при $f \rightarrow \infty$ $X_L \rightarrow \infty$.
Переходя от синусоидальных функций напряжения и тока к соответствующим комплексам:

$$u = U_m \sin\left(\omega t + \Psi + \frac{\pi}{2}\right) \Rightarrow \dot{U} = Ue^{j\left(\Psi + \frac{\pi}{2}\right)} ;$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \Psi) \Rightarrow \dot{I} = Ie^{j\Psi} ,$$

разделим первый из них на второй:

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = \frac{Ue^{j\left(\Psi + \frac{\pi}{2}\right)}}{Ie^{j\Psi}} = \frac{Ue^{j\Psi} e^{j\frac{\pi}{2}}}{Ie^{j\Psi}} = X_L e^{j\frac{\pi}{2}} = jX_L = \underline{Z}_L$$

или

$$\dot{U} = jX_L \dot{I} = \underline{Z}_L \dot{I} \quad (6)$$

В полученном соотношении $\underline{Z}_L = jX_L$ - комплексное

сопротивление катушки индуктивности. Умножение на $j = e^{j\frac{\pi}{2}}$ соответствует повороту вектора на угол $\pi/2$ против часовой стрелки. Следовательно, уравнению (6) соответствует векторная диаграмма, представленная на рис. 11

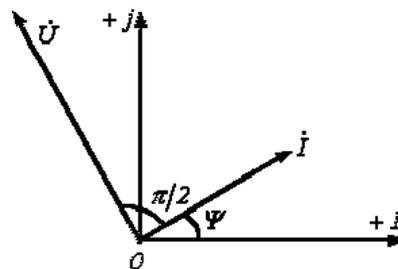


Рис.11

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент.Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 5: Комплексная проводимость, треугольник сопротивлений и треугольник проводимостей.

План лекции:

1. Последовательное соединение резистивного и индуктивного элементов

2. Последовательное соединение резистивного и емкостного элементов
3. Параллельное соединение резистивного и емкостного элементов
4. Параллельное соединение резистивного и емкостного элементов

Последовательное соединение резистивного и индуктивного элементов

Пусть в ветви на рис. 1 $i = I_m \sin(\omega t + \varphi)$. Тогда

$$\begin{aligned}
 u &= u_R + u_L = RI_m \sin(\omega t + \varphi) + \omega LI_m \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{\pi}{2}\right) = \\
 &= \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} I_m \sin\left(\omega t + \varphi + \arctg \frac{\omega L}{R}\right) = \\
 &= U_m \sin(\omega t + \varphi + \Psi),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где

$$U_m = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2} I_m = ZI_m; \quad Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}; \quad \Psi = \arctg \frac{\omega L}{R},$$

$$\Psi: \quad 0 < \Psi < \frac{\pi}{2}.$$

причем пределы изменения

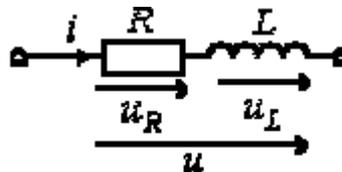


Рис. 1

Уравнению (1) можно поставить в соответствие соотношение

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L = R\dot{I} + jX_L\dot{I} = (R + jX_L)\dot{I} = \underline{Z}\dot{I},$$

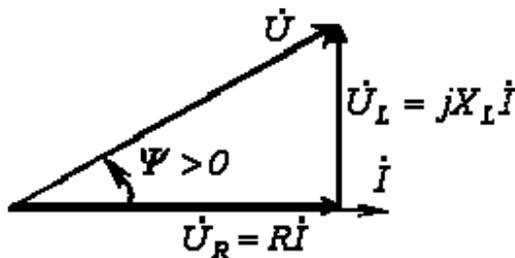


Рис. 2

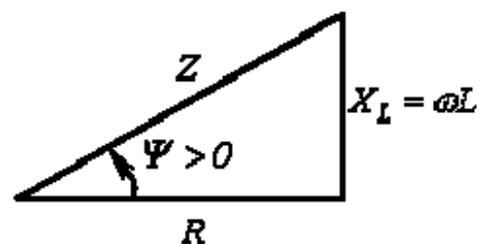


Рис. 3

К которому, в свою очередь, соответствует векторная диаграмма на рис. 2. Векторы на рис. 2 образуют фигуру, называемую *треугольником напряжений*. Аналогично выражение

$$\underline{Z} = R + jX_L = \sqrt{R^2 + X_L^2} e^{j\Psi} = Ze^{j\Psi}$$

графически может быть представлено *треугольником сопротивлений* (см. рис. 3), который подобен треугольнику напряжений.

Последовательное соединение резистивного и емкостного элементов

Опуская промежуточные выкладки, для ветви на рис. 4 можно записать

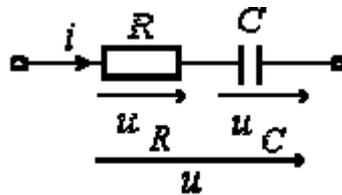


Рис. 4

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_C = R\dot{I} - jX_C\dot{I} = (R - jX_C)\dot{I} = \underline{Z}\dot{I}, \quad (2)$$

где

$$\underline{Z} = R - jX_C = \sqrt{R^2 + X_C^2} e^{j\Psi} = Ze^{j\Psi}; \Psi = -\arctg \frac{X_C}{R} = -\arctg \frac{1}{\omega CR}, \text{ причем}$$

$$\text{пределы изменения } \Psi : -\frac{\pi}{2} < \Psi < 0$$

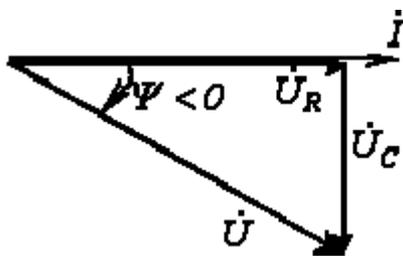


Рис. 5

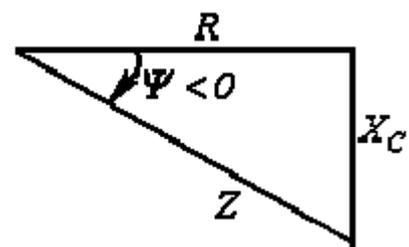


Рис. 6

На основании уравнения (1) могут быть построены треугольники напряжений (см. рис. 5) и сопротивлений (см. рис. 6), которые являются подобными.

Параллельное соединение резистивного и емкостного элементов

Для цепи на рис. 7 имеют место соотношения:

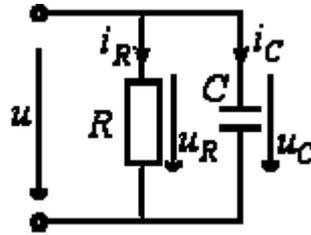


Рис. 7

$$U = U_R = U_C;$$

$$I_R = \frac{U_R}{R} = gU,$$

где $g = \frac{1}{R}$ [См] – активная проводимость;

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} = b_C U,$$

где $b_C = \frac{1}{X_C}$ [См] – реактивная проводимость конденсатора.

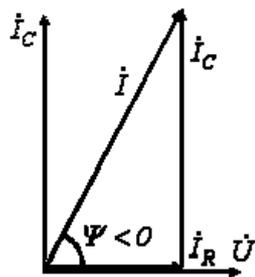


Рис. 8

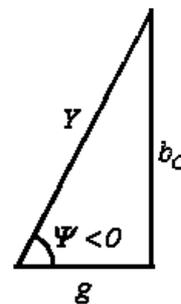


Рис. 9

Векторная диаграмма токов для данной цепи, называемая *треугольником токов*, приведена на рис. 8. Ей соответствует уравнение в комплексной форме

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_C = g\dot{U} + jb_C\dot{U} = (g + jb_C)\dot{U} = \underline{Y}\dot{U} = Ie^{-j\Psi},$$

где $I = \sqrt{I_R^2 + I_C^2}$;

$$\underline{Y} = g + jb_C = \frac{1}{R} + j\omega C = Ye^{-j\Psi} \quad \text{- комплексная проводимость;}$$

$$\Psi = -\arctg \frac{b_C}{g} = -\arctg \omega CR$$

Треугольник проводимостей, подобный треугольнику токов, приведен на рис. 9.

Для комплексного сопротивления цепи на рис. 7 можно записать

$$\underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}} = \frac{1}{g + jb_C} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{-jX_C}} = \frac{R(-jX_C)}{R - jX_C}$$

Необходимо отметить, что полученный результат аналогичен известному из курса физики выражению для эквивалентного сопротивления двух параллельно соединенных резисторов.

Параллельное соединение резистивного и индуктивного элементов

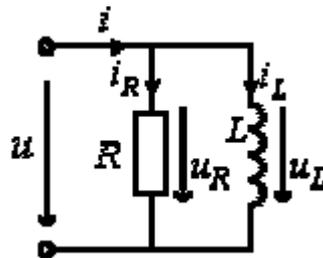


Рис. 10

Для цепи на рис. 10 можно записать

$$U = U_R = U_L;$$

$$I_R = \frac{U_R}{R} = gU, \quad \text{где } g = \frac{1}{R} [\text{См}] \text{ - активная проводимость;}$$

$$I_L = \frac{U_L}{X_L} = b_L U, \quad \text{где } b_L = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{\omega L} [\text{См}] \text{ - реактивная проводимость катушки индуктивности.}$$

Векторной диаграмме токов (рис. 11) для данной цепи соответствует уравнение в комплексной форме

$$\dot{I} = \dot{I}_R + \dot{I}_L = g\dot{U} - jb_L\dot{U} = (g - jb_L)\dot{U} = \underline{Y}\dot{U} = Ie^{-j\Psi},$$

где $I = \sqrt{I_R^2 + I_L^2};$

$$\underline{Y} = g - jb_L = \frac{1}{R} - j \frac{1}{\omega L} = Y e^{-j\Psi} \quad \text{- комплексная проводимость;}$$

$$\Psi = \arctg \frac{b_L}{g} = \arctg \frac{R}{\omega L}$$

Треугольник проводимостей, подобный треугольнику токов, приведен на рис. 12.

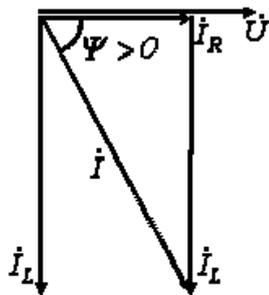


Рис. 11

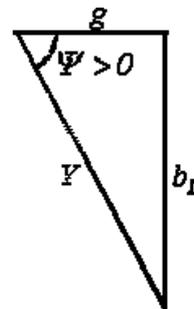


Рис. 12

Выражение комплексного сопротивления цепи на рис. 10 имеет вид:

$$\underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}} = \frac{1}{g - jb_L} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{j}{jX_L}} = \frac{RjX_L}{R + jX_L}$$

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент.Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Контрольные вопросы

1. Какой практический смысл имеет изображение синусоидальных величин с помощью векторов?
2. Какой практический смысл имеет представление синусоидальных величин с использованием комплексных чисел?
3. В чем заключаются преимущества изображения синусоидальных величин с помощью комплексов по сравнению с их векторным представлением?
4. В чем сущность реактивных сопротивлений?
5. Какой из элементов: резистор, катушку индуктивности или конденсатор – можно использовать в качестве шунта для наблюдения за формой тока?

6. Почему катушки индуктивности и конденсаторы не используются в цепях постоянного тока?
7. Расскажите треугольнике сопротивлений.
8. Расскажите о треугольнике проводимостей
9. Напишите формулу действующего значения тока

РАЗДЕЛ III: РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ИХ ЗНАЧЕНИЯ

Лекция 6: Резонанс токов и напряжений.

План лекции:

1. Резонанс напряжений
2. Резонанс токов

Резонансом называется такой режим работы цепи, включающей в себя индуктивные и емкостные элементы, при котором ее входное сопротивление (входная проводимость) вещественно. Следствием этого является совпадение по фазе тока на входе цепи с входным напряжением.

Резонанс в цепи с последовательно соединенными элементами (резонанс напряжений)

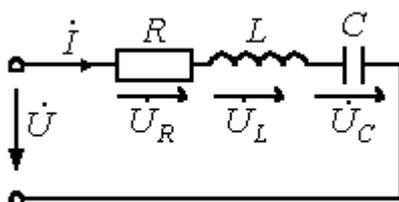


Рис.1

Для цепи на рис.1 имеет место

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{i} \left[R + j \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right) \right] = \dot{i} \underline{Z}$$

где
$$\underline{Z} = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} e^{j\varphi} \quad (1)$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L - 1/(\omega C)}{R} \quad (2)$$

В зависимости от соотношения величин ωL и $1/(\omega C)$ возможны три различных случая.

1. В цепи преобладает индуктивность, т.е. $\omega L > 1/(\omega C)$, а следовательно,

$\dot{U}_L > \dot{U}_C$. Этому режиму соответствует векторная диаграмма на рис. 2,а.

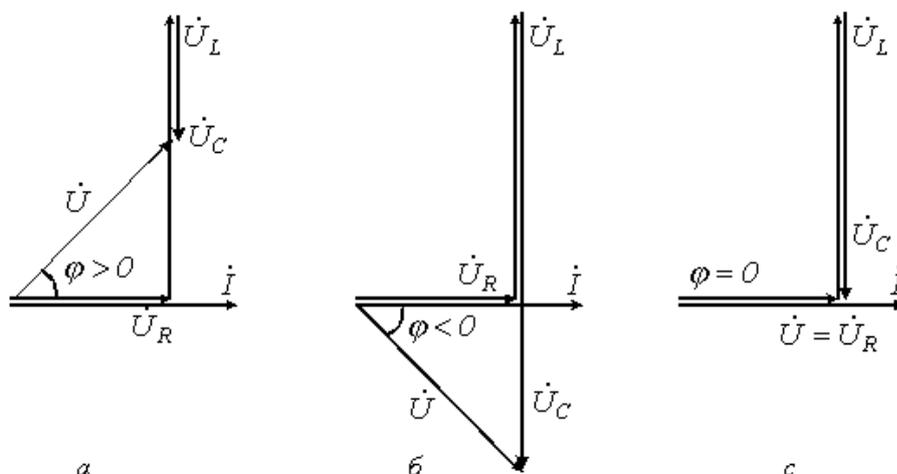


Рис.2

2. В цепи преобладает емкость, т.е. $\omega L < 1/(\omega C)$, а значит, $\dot{U}_L < \dot{U}_C$. Этот случай отражает векторная диаграмма на рис. 2,б.

3. $\dot{U}_L = \dot{U}_C$ - случай резонанса напряжений (рис. 2,в).
Условие резонанса напряжений

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad (3)$$

При этом, как следует из (1) и (2), $\underline{Z} = R$; $\varphi = 0$.

При резонансе напряжений или режимах, близких к нему, ток в цепи резко возрастает. В теоретическом случае при $R=0$ его величина стремится к бесконечности. Соответственно возрастанию тока увеличиваются напряжения на индуктивном и емкостном элементах, которые могут во много раз превысить величину напряжения источника питания.

Пусть, например, в цепи на рис. 1 $U = 10 \text{ В}$; $R = 1 \text{ Ом}$; $X_L = X_C = 1000 \text{ Ом}$.

Тогда $I = U/Z = U/R = 10 \text{ А}$, и, соответственно, $U_L = U_C = IX_L = IX_C = 10^4 \text{ В}$.

Явление резонанса находит полезное применение на практике, в частности в радиотехнике. Однако, если он возникает стихийно, то может привести к аварийным режимам вследствие появления больших перенапряжений и сверхтоков.

Физическая сущность резонанса заключается в периодическом обмене энергией между магнитным полем катушки индуктивности и электрическим полем конденсатора, причем сумма энергий полей остается постоянной.

Суть дела не меняется, если в цепи имеется несколько индуктивных и

емкостных элементов. Действительно, в этом случае
$$L_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n L_k;$$

$$1/C_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n 1/C_k$$
, и соотношение (3) выполняется для эквивалентных значений L_{Σ} и C_{Σ} .

Как показывает анализ уравнения (3), режима резонанса можно добиться путем изменения параметров L и C , а также частоты. На основании (3) для резонансной частоты можно записать

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (4)$$

Резонансными кривыми называются зависимости тока и напряжения от частоты. В качестве их примера на рис. 3 приведены типовые кривые $I(f)$; $U_L(f)$

и $U_C(f)$ для цепи на рис. 1 при $U=const$.

Важной характеристикой резонансного контура является *добротность* Q , определяемая отношением напряжения на индуктивном (емкостном) элементе к входному напряжению:

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\omega_p L}{R} = \frac{1}{\omega_p CR}, \quad (5)$$

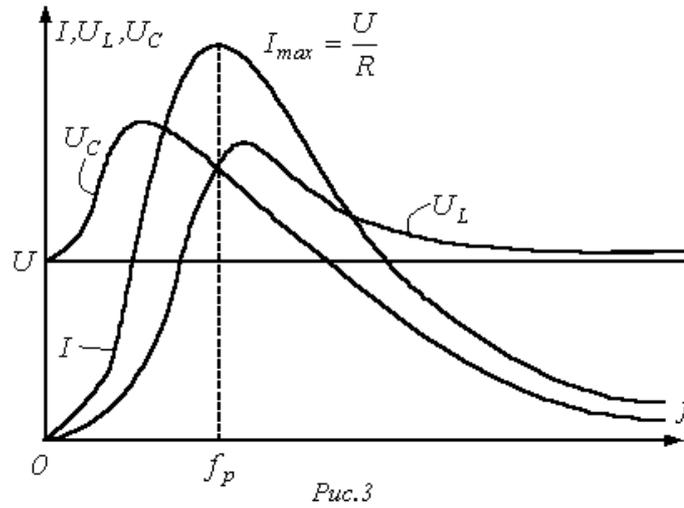
- и характеризующая «избирательные» свойства резонансного контура, в частности его *полосу пропускания* $\Delta\omega = \omega_p / Q$.

Другим параметром резонансного контура является *характеристическое сопротивление*, связанное с добротностью соотношением

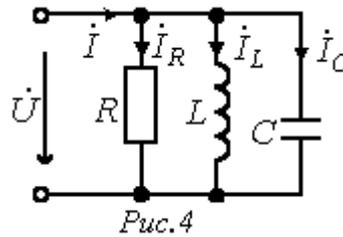
$$\rho = QR, \quad (6)$$

или с учетом (4) и (5) для ρ можно записать:

$$\rho = \omega_p L = \frac{l}{\omega_p C} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (7)$$



**Резонанс в цепи с параллельно соединенными элементами
(резонанс токов)**



Для цепи рис. 4 имеем

$$\dot{i} = \dot{i}_R + \dot{i}_L + \dot{i}_C = \dot{U} \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C \right) = \dot{U} [g + j(b_C - b_L)] = \dot{U} \underline{Y}$$

где

$$\underline{Y} = \sqrt{g^2 + (b_C - b_L)^2} e^{-j\varphi}; \quad (8)$$

$$\varphi = \arctg \frac{b_L - b_C}{g} \quad (9)$$

В зависимости от соотношения величин b_L и b_C , как и в рассмотренном выше случае последовательного соединения элементов, возможны три различных случая.

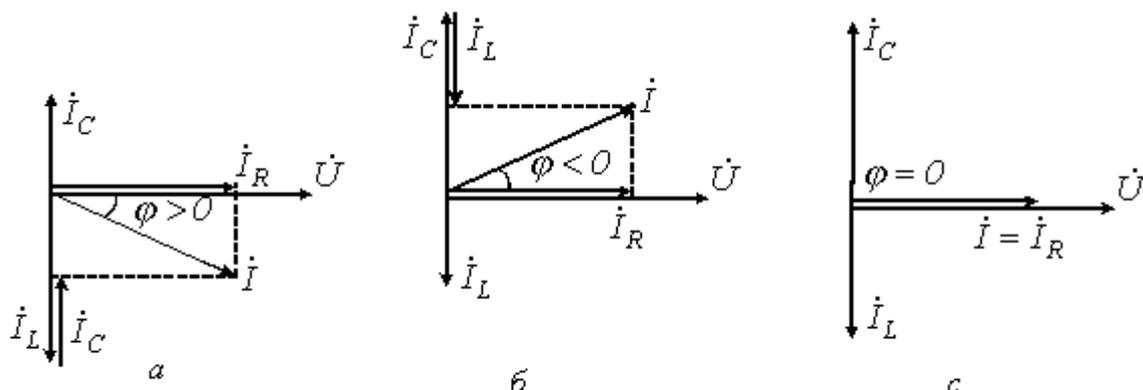


Рис.5

В цепи преобладает индуктивность, т.е. $b_L > b_C$, а следовательно, $I_L > I_C$. Этому режиму соответствует векторная диаграмма на рис. 5,а.

В цепи преобладает емкость, т.е. $b_L < b_C$, а значит, $I_L < I_C$. Этот случай иллюстрирует векторная диаграмма на рис. 5,б.

$I_L = I_C$ - случай резонанса токов (рис. 5,в).

Условие резонанса токов $b_L = b_C$ или

$$\frac{1}{\omega L} = \omega C \quad (10)$$

При этом, как следует из (8) и (9), $\underline{Y} = g = 1/R; \varphi = 0$. Таким образом, при резонансе токов входная проводимость цепи минимальна, а входное сопротивление, наоборот, максимально. В частности при отсутствии в цепи на рис. 4 резистора R ее входное сопротивление в режиме резонанса стремится к бесконечности, т.е. при резонансе токов ток на входе цепи минимален.

Идентичность соотношений (3) и (5) указывает, что в обоих случаях резонансная частота определяется соотношением (4). Однако не следует использовать выражение (4) для любой резонансной цепи. Оно справедливо только для простейших схем с последовательным или параллельным соединением индуктивного и емкостного элементов.

При определении резонансной частоты в цепи произвольной конфигурации или, в общем случае, соотношения параметров схемы в

режиме резонанса следует исходить из условия вещественности входного сопротивления (входной проводимости) цепи.

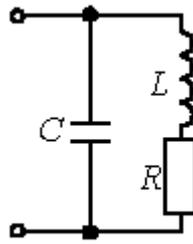


Рис.6

Например, для цепи на рис. 6 имеем

$$\underline{Y} = j\omega C + \frac{1}{R + j\omega L} = j\omega C + \frac{R - j\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2} = \frac{R}{R^2 + \omega^2 L^2} + j\left(\omega C - \frac{\omega L}{R^2 + \omega^2 L^2}\right)$$

Поскольку в режиме резонанса мнимая часть \underline{Y} должна быть равна нулю, то условие резонанса имеет вид

$$C = \frac{L}{R^2 + \omega_p^2 L^2},$$

откуда, в частности, находится резонансная частота.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент.Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 7: Активная, реактивная и полная мощность и энергия.

Коэффициент мощности.

План лекции:

1. Активная мощность
2. Реактивная мощность
3. Полная мощность
4. Комплексная мощность

Активная мощность

Передача энергии w по электрической цепи (например, по линии электропередачи), рассеяние энергии, то есть переход электромагнитной энергии в тепловую, а также и другие виды преобразования энергии характеризуются интенсивностью, с которой протекает процесс, то есть тем, сколько энергии передается по линии в единицу времени, сколько энергии рассеивается в единицу времени. Интенсивность передачи или преобразования энергии называется мощностью p . Сказанному соответствует математическое определение:

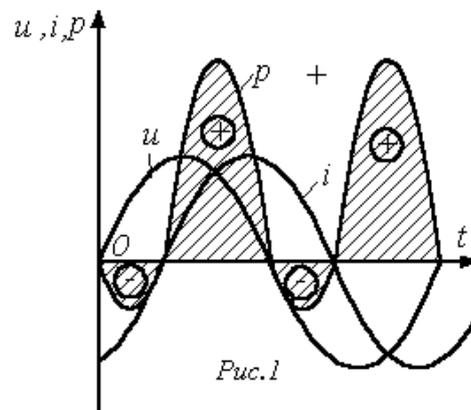
$$p = \frac{dw}{dt} \quad (1)$$

Выражение для мгновенного значения мощности в электрических цепях имеет вид:

$$p = ui \quad (2)$$

Приняв начальную фазу напряжения за нуль, а сдвиг фаз между напряжением и током за $-\varphi$, получим:

$$\begin{aligned} p = ui &= U_m \sin \omega t \cdot I_m \sin(\omega t - \varphi) = U_m I_m \sin \omega t \sin(\omega t - \varphi) = \\ &= \frac{U_m I_m}{2} [\cos \varphi - \cos(2\omega t - \varphi)] = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi) \end{aligned} \quad (3)$$



Итак, мгновенная мощность имеет постоянную составляющую и гармоническую составляющую, угловая частота которой в 2 раза больше угловой частоты напряжения и тока.

Когда мгновенная мощность отрицательна, а это имеет место (см. рис. 1), когда u и i разных знаков, т.е. когда направления напряжения и тока в двухполюснике противоположны, энергия возвращается из двухполюсника источнику питания.

Такой возврат энергии источнику происходит за счет того, что энергия периодически запасается в магнитных и электрических полях соответственно индуктивных и емкостных элементов, входящих в состав двухполюсника. Энергия, отдаваемая источником двухполюснику в течение времени t равна

$$\int_0^t p dt$$

Среднее за период значение мгновенной мощности называется активной

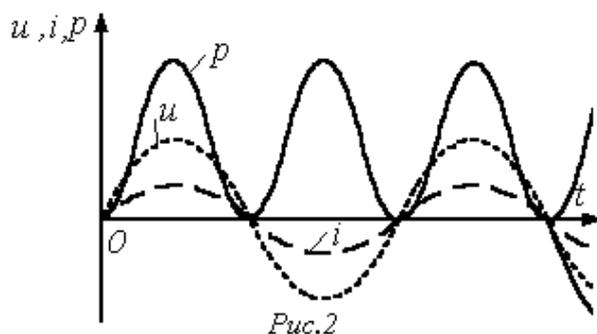
мощностью $P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt \text{ (Вт)}$

Принимая во внимание, что $\int_0^T \cos(2\omega t - \varphi) dt = 0$, из (3) получим:

$$P = UI \cos \varphi \quad (4)$$

Активная мощность, потребляемая пассивным двухполюсником, не может быть отрицательной (иначе двухполюсник будет генерировать энергию), поэтому $\cos \varphi \geq 0$, т.е. на входе пассивного двухполюсника $-\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$. Случай $P=0$, $\varphi = \left| \frac{\pi}{2} \right|$ теоретически возможен для двухполюсника, не имеющего активных сопротивлений, а содержащего только идеальные индуктивные и емкостные элементы.

Резистор (идеальное активное сопротивление).

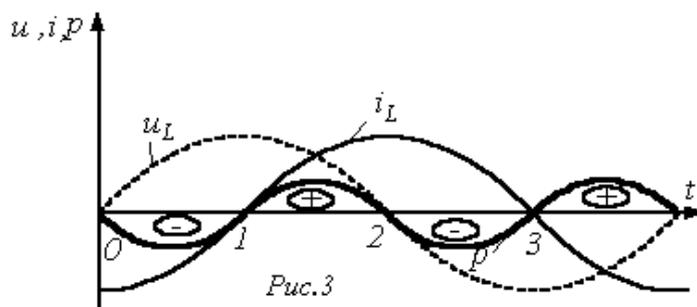


Здесь напряжение и ток (см. рис. 2) совпадают по фазе ($\varphi = 0$), поэтому мощность $P = ui$ всегда положительна, т.е. резистор потребляет активную мощность

$$P = UI \cos \varphi = |\cos 0 = 1| = UI = \\ = RI^2 = \frac{U^2}{R}.$$

Реактивная мощность

Катушка индуктивности (идеальная индуктивность)



При идеальной индуктивности ток отстает от напряжения по фазе на $\frac{\pi}{2}$. Поэтому в соответствии с (3) можно записать

$$p = U_L I_L \cos \frac{\pi}{2} = \\ = U_L I_L \cos \left(2\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \\ = -U_L I_L \sin 2\omega t.$$

Участок 1-2: энергия $\frac{Li^2}{2}$, запасаемая в магнитном поле катушки, нарастает.
Участок 2-3: энергия магнитного поля убывает, возвращаясь в источник.

Конденсатор (идеальная емкость)

Аналогичный характер имеют процессы и для идеальной емкости. Здесь $\varphi = -\frac{\pi}{2}$. Поэтому из (3) вытекает, что $p = U_C I_C \sin 2\omega t$. Таким образом, в катушке индуктивности и конденсаторе активная мощность не потребляется ($P=0$), так как в них не происходит необратимого преобразования энергии в другие виды энергии. Здесь происходит только циркуляция энергии: электрическая энергия запасается в магнитном поле катушки или электрическом поле конденсатора на протяжении четверти периода, а на протяжении следующей четверти периода энергия вновь возвращается в сеть. В силу этого катушку индуктивности и конденсатор называют реактивными элементами, а их сопротивления X_L и X_C , в отличие от активного сопротивления R резистора, – реактивными.

Интенсивность обмена энергии принято характеризовать наибольшим значением скорости поступления энергии в магнитное поле катушки или электрическое поле конденсатора, которое называется *реактивной мощностью*.

В общем случае выражение для реактивной мощности имеет вид:

$$Q = UI \sin \varphi \quad (5)$$

Она положительна при отстающем токе (индуктивная нагрузка- $\varphi > 0$) и отрицательна при опережающем токе (емкостная нагрузка- $\varphi < 0$). Единицу мощности в применении к измерению реактивной мощности называют *вольт-ампер реактивный* (ВАр).

В частности для катушки индуктивности имеем:

$$Q_L = UI \sin \varphi = UI, \text{ так как } \varphi = \frac{\pi}{2}.$$

$$Q_L = UI = \omega LI^2 = \omega L \frac{I_m^2}{2} = \omega \left[\frac{LI_m^2}{2} \right].$$

Из последнего видно, что реактивная мощность для идеальной катушки индуктивности пропорциональна частоте и максимальному запасу энергии в катушке. Аналогично можно получить для идеального конденсатора:

$$|Q_C| = \omega \left[\frac{CI_m^2}{2} \right].$$

Полная мощность

Помимо понятий активной и реактивной мощностей в электротехнике широко используется понятие *полной мощности*:

$$S = UI \quad (\text{ВА}). \quad (6)$$

Активная, реактивная и полная мощности связаны следующим соотношением:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}. \quad (7)$$

Отношение активной мощности к полной называют *коэффициентом мощности*. Из приведенных выше соотношений видно, что коэффициент мощности $\cos \varphi$ равен косинусу угла сдвига между током и напряжением. Итак,

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (8)$$

Комплексная мощность

Активную, реактивную и полную мощности можно определить, пользуясь комплексными изображениями напряжения и тока. Пусть $\dot{U} = Ue^{j\psi_u}$, а $\dot{I} = Ie^{j\psi_i}$. Тогда комплекс полной мощности:

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* \quad (9)$$

где \dot{I}^* - комплекс, сопряженный с комплексом \dot{I} .

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = Ue^{j\psi_u} \cdot Ie^{-j\psi_i} = UIe^{j\varphi} = |U| |I| e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ$$

Комплексной мощности можно поставить в соответствие треугольник мощностей (см. рис. 4). Рис. 4 соответствует $\cos \varphi > 0$ (активно-индуктивная нагрузка).

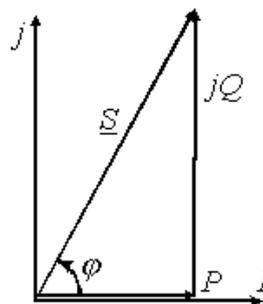


Рис.4

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент.Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 8: Четырехполюсники. Особенности схем четырехполюсника.

План лекции:

1. Пассивные четырехполюсники
2. Схема замещения четырехполюсников

Пассивные четырехполюсники

При анализе электрических цепей в задачах исследования взаимосвязи между переменными (токами, напряжениями, мощностями и т.п.) двух каких-то ветвей схемы широко используется теория четырехполюсников. *Четырехполюсник* – это часть схемы произвольной конфигурации, имеющая две пары зажимов (отсюда и произошло его название), обычно называемые входными и выходными.

Примерами четырехполюсника являются трансформатор, усилитель, потенциометр, линия электропередачи и другие электротехнические устройства, у которых можно выделить две пары полюсов.

В общем случае четырехполюсники можно разделить на *активные*, в структуру которых входят источники энергии, и *пассивные*, ветви которых не содержат источников энергии.

Ниже будут рассмотрены элементы теории пассивных четырехполюсников.

Для записи уравнений четырехполюсника выделим в произвольной схеме ветвь с единственным источником энергии и любую другую ветвь с некоторым сопротивлением \underline{Z}_2 (см. рис. 1,а).

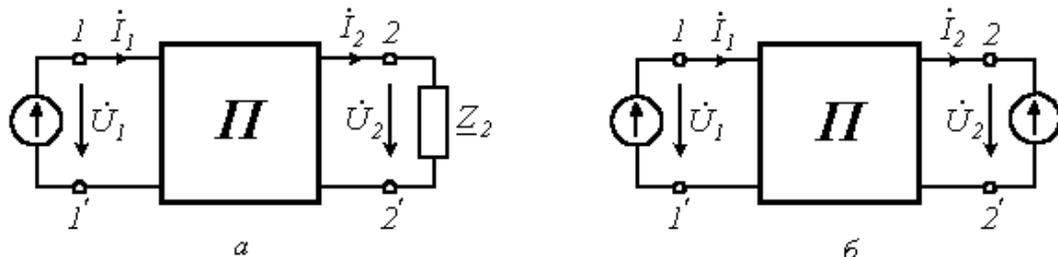


Рис.1

В соответствии с принципом компенсации заменим исходное сопротивление \underline{Z}_2 источником с напряжением $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \underline{Z}_2$ (см. рис. 1,б). Тогда на основании метода наложения для цепи на рис. 1,б можно записать

$$\dot{I}_1 = \underline{Y}_{11} \dot{U}_1 - \underline{Y}_{12} \dot{U}_2; \quad (1)$$

$$\dot{I}_2 = \underline{Y}_{21} \dot{U}_1 - \underline{Y}_{22} \dot{U}_2. \quad (2)$$

Решая полученные уравнения (1) и (2) относительно напряжения и тока на первичных зажимах, получим

$$\dot{U}_1 = \frac{\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} \dot{U}_2 + \frac{1}{\underline{Y}_{21}} \dot{I}_2;$$

$$\dot{I}_1 = \underline{Y}_{11} \left(\frac{\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} \dot{U}_2 + \frac{1}{\underline{Y}_{21}} \dot{I}_2 \right) - \underline{Y}_{12} \dot{U}_2 = \frac{\underline{Y}_{11} \underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12} \underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{21}} \dot{U}_2 + \frac{\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}} \dot{I}_2$$

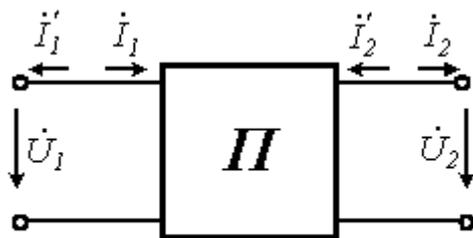
или

$$\dot{U}_1 = \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2, \quad (3)$$

$$\dot{I}_1 = \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{I}_2, \quad (4)$$

где $\underline{A} = \underline{Y}_{22}/\underline{Y}_{21}$; $\underline{B} = 1/\underline{Y}_{21}$; $\underline{C} = (\underline{Y}_{11}\underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12}\underline{Y}_{21})/\underline{Y}_{21}$; $\underline{D} = \underline{Y}_{11}/\underline{Y}_{21}$ - коэффициенты четырехполюсника.

Учитывая, что в соответствии с принципом взаимности $\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21}$, видно, что коэффициенты четырехполюсника связаны между собой соотношением



$$\underline{AD} - \underline{BC} = \frac{\underline{Y}_{22}\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}\underline{Y}_{21}} - \frac{\underline{Y}_{11}\underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12}\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{21}\underline{Y}_{21}} \quad (5)$$

Рис.2

Если при перемене местами источника и приемника энергии их токи не меняются, то такой четырехполюсник называется *симметричным*. Это выполняется при $\underline{A} = \underline{D}$.

Четырехполюсники, не удовлетворяющие данному условию, называются *несимметричными*.

При практическом использовании уравнений четырехполюсника для анализа цепей необходимо знать значения его коэффициентов. Коэффициенты четырехполюсника могут быть определены экспериментальным или расчетным путями. При этом в соответствии с соотношением (5) определение любых трех коэффициентов дает возможность определить и четвертый.

Один из наиболее удобных экспериментальных методов определения коэффициентов четырехполюсника основан на опытах холостого хода и короткого замыкания при питании со стороны вторичных зажимов и опыте холостого хода при питании со стороны первичных зажимов. В этом случае при $\dot{I}_2 = 0$ на основании уравнений (3) и (4)

$$\underline{Z}_{1XX} = \frac{\dot{U}_{1XX}}{\dot{I}_{1XX}} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}} \quad (6)$$

При $\dot{I}_1' = 0$

$$\underline{Z}_{2XX} = \frac{\dot{U}_{2XX}}{\dot{I}'_{2XX}} = \frac{\underline{D}}{\underline{C}} \quad (7)$$

и при $\dot{U}_1 = 0$

$$\underline{Z}_{2KX} = \frac{\dot{U}_{2KX}}{\dot{I}'_{2KX}} = \frac{\underline{B}}{\underline{A}} \quad (8)$$

Решение уравнений (6)-(8) относительно коэффициентов четырехполосника дает:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{1XX}}{\underline{Z}_{2XX} - \underline{Z}_{2KX}}}; \quad \underline{B} = \underline{A}\underline{Z}_{2KX}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{1XX}}; \quad \underline{D} = \underline{C}\underline{Z}_{2XX}.$$

Схема замещения четырехполосников

При определении коэффициентов четырехполосника расчетным путем должны быть известны схема соединения и величины сопротивлений четырехполосника. Как было отмечено ранее, пассивный четырехполосник характеризуется тремя независимыми постоянными коэффициентами. Следовательно, пассивный четырехполосник можно представить в виде трехэлементной эквивалентной *T*- (рис. 3,а) или *Π*-образной (рис. 3,б) схемы замещения.

Для определения коэффициентов четырехполосника для схемы на рис. 3,а с использованием первого и второго законов Кирхгофа выразим \dot{U}_1 и \dot{I}_1 через \dot{U}_2 и \dot{I}_2 :

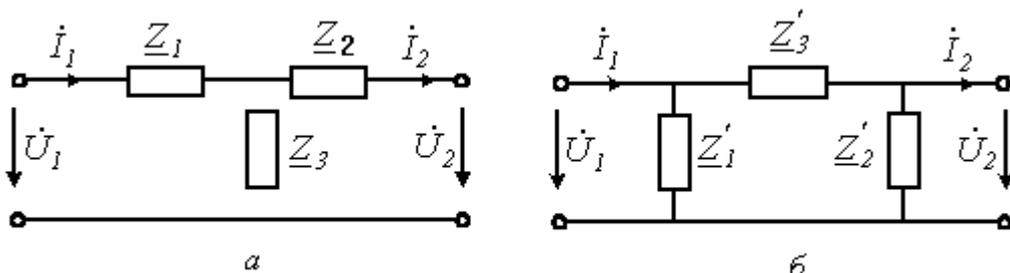


Рис.3

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \frac{\dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = \frac{1}{\underline{Z}_3} \dot{U}_2 + \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right) \dot{I}_2; \quad (9)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_2 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1 = \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} \right) \dot{U}_2 + \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right) \dot{I}_2 \quad (10)$$

Сопоставление полученных выражений (9) и (10) с соотношениями (3) и (4) дает:

$$\underline{A} = 1 + \underline{Z}_1 / \underline{Z}_3; \quad \underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2 / \underline{Z}_3; \quad \underline{C} = 1 / \underline{Z}_3; \quad \underline{D} = 1 + \underline{Z}_2 / \underline{Z}_3.$$

Данная задача может быть решена и другим путем. При $\dot{I}_2 = 0$ (холостой ход со стороны вторичных зажимов) в соответствии с (3) и (4)

$$\dot{U}_{1XX} = \underline{A} \dot{U}_2 \text{ и } \dot{I}_{1XX} = \underline{C} \dot{U}_2;$$

но из схемы на рис. 3,а

$$\dot{I}_{1XX} = \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_3}, \quad \dot{U}_{1XX} = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3) \dot{I}_{1XX} = \left(1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_3} \right) \dot{U}_2;$$

откуда вытекает: $\underline{A} = 1 + \underline{Z}_1 / \underline{Z}_3$ и $\underline{C} = 1 / \underline{Z}_3$.

При $\dot{U}_2 = 0$ (короткое замыкание на вторичных зажимах)

$$\dot{U}_{1K3} = \underline{B} \dot{I}_2 \text{ и } \dot{I}_{1K3} = \underline{D} \dot{I}_2.$$

Из схемы на рис. 3,а

$$\dot{I}_{1K3} = \dot{I}_2 + \frac{\dot{I}_2 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} = \left(1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right) \dot{I}_2;$$

$$\dot{U}_{1K3} = \underline{Z}_1 \dot{I}_{1K3} + \dot{I}_2 \underline{Z}_2 = \left(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3} \right) \dot{I}_2.$$

Следовательно, $\underline{B} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}; \quad \underline{D} = 1 + \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3}.$

Таким образом, получены те же самые результаты, что и в первом случае.

Коэффициенты четырехполюсника для схемы на рис. 3,б могут быть определены аналогично или на основании полученных для цепи на рис. 3,а с использованием рассмотренных ранее формул преобразования «звезда – треугольник». Из вышесказанного можно сделать вывод, что зная коэффициенты четырехполюсника, всегда можно найти параметры Т- и П-образных схем его замещения.

На практике часто возникает потребность в переходе от одной формы записи уравнений четырехполюсника к другой. Для решения этой задачи, т.е. чтобы определить коэффициенты одной формы записи уравнений через коэффициенты другой, следует выразить какие-либо две одинаковые величины в этих формулах через две остальные и сопоставить их с учетом положительных направлений токов для каждой из этих форм. Так при переходе от А- к Z-форме на основании (4) имеем

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{\underline{C}} \dot{I}_1 - \frac{D}{\underline{C}} \dot{I}_2 = \frac{1}{\underline{C}} \dot{I}_1 + \frac{D}{\underline{C}} \dot{I}_2' \quad (11)$$

Подстановка соотношения (11) в (3) дает

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2 = \frac{\underline{A}}{\underline{C}} \dot{I}_1 - \frac{\underline{AD}}{\underline{C}} \dot{I}_2 + \underline{B}\dot{I}_2 = \frac{\underline{A}}{\underline{C}} \dot{I}_1 - \frac{\underline{AD} - \underline{BC}}{\underline{C}} \dot{I}_2 = \\ &= \frac{\underline{A}}{\underline{C}} \dot{I}_1 - \frac{1}{\underline{C}} \dot{I}_2 = \frac{\underline{A}}{\underline{C}} \dot{I}_1 + \frac{1}{\underline{C}} \dot{I}_2'. \end{aligned} \quad (12)$$

Сопоставляя выражения (11) и (12) с уравнениями четырехполюсника в Z-форме, получим

$$\underline{Z}_{11} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{12} = \frac{1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{21} = \frac{1}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{22} = \frac{D}{\underline{C}}.$$

При анализе работы четырехполюсника на нагрузку \underline{Z}_H удобно использовать понятие входного сопротивления с первичной стороны \underline{Z}_{1ex} и коэффициента

передачи $\underline{K} = \dot{U}_2 / \dot{U}_1$. Учитывая, что $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \underline{Z}_H$ и $\dot{U}_1 = \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B} \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_H}$, для этих параметров можно записать:

$$\begin{aligned} \underline{K} &= \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\dot{U}_2}{\underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B} \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_H}} = \frac{\underline{Z}_H}{\underline{A}\underline{Z}_H + \underline{B}}; \\ \underline{Z}_{1ex} &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B} \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_H}}{\underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D} \frac{\dot{U}_2}{\underline{Z}_H}} = \frac{\underline{A}\underline{Z}_H + \underline{B}}{\underline{C}\underline{Z}_H + \underline{D}}. \end{aligned}$$

Зная \underline{K} , \underline{Z}_{1ex} и \dot{U}_1 , можно определить остальные переменные на входе и выходе четырехполюсника: $\dot{U}_2 = \underline{K}\dot{U}_1$; $\dot{I}_2 = \dot{U}_2 / \underline{Z}_H$; $\dot{I}_1 = \dot{U}_1 / \underline{Z}_{1ex}$.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент. Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Контрольные вопросы

1. Что такое резонанс напряжений, чем он характеризуется?
2. Что такое резонанс токов, чем он характеризуется?
3. В чем физическая сущность резонансных режимов?
4. На основании каких условий в общем случае определяются резонансные частоты?
5. Что такое активная мощность?
6. Что такое реактивная мощность, с какими элементами она связана?
7. Что такое полная мощность?
8. Почему необходимо стремиться к повышению коэффициента мощности $\cos \varphi$?
9. Критерием чего служит баланс мощностей?
10. Четырехполюсник это?
11. Схема замещения четырехполюсника?

РАЗДЕЛ IV: ТРЕХФАЗНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Лекция 9: Принцип работы генератора. Трехфазная система ЭДС. Многофазные электрические цепи.

План лекция:

1. Принцип работы генератора.
2. Трехфазная система ЭДС. Многофазные электрические цепи.

Трехфазная цепь является частным случаем многофазных электрических систем, представляющих собой совокупность электрических цепей, в которых действуют ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе относительно друг друга на определенный угол. Отметим, что обычно эти ЭДС, в первую очередь в силовой энергетике, синусоидальны. Однако, в современных электромеханических системах, где для управления исполнительными двигателями используются преобразователи частоты, система напряжений в общем случае является несинусоидальной. Каждую из частей многофазной системы, характеризующуюся одинаковым током, называют *фазой*, т.е. фаза – это участок цепи, относящийся к соответствующей обмотке генератора или трансформатора, линии и нагрузке.

Таким образом, понятие «фаза» имеет в электротехнике два различных значения:

- фаза как аргумент синусоидально изменяющейся величины;

- фаза как составная часть многофазной электрической системы.

Разработка многофазных систем была обусловлена исторически. Исследования в данной области были вызваны требованиями развивающегося производства, а успехам в развитии многофазных систем способствовали открытия в физике электрических и магнитных явлений.

Важнейшей предпосылкой разработки многофазных электрических систем явилось открытие явления вращающегося магнитного поля (Г.Феррарис и Н.Тесла, 1888 г.). Первые электрические двигатели были двухфазными, но они имели невысокие рабочие характеристики. Наиболее рациональной и перспективной оказалась трехфазная система, основные преимущества которой будут рассмотрены далее. Большой вклад в разработку трехфазных систем внес выдающийся русский ученый–электротехник М.О. Доливо – Добровольский, создавший трехфазные асинхронные двигатели, трансформаторы, предложивший трех– и четырехпроводные цепи, в связи с чем по праву считающийся основоположником трехфазных систем.

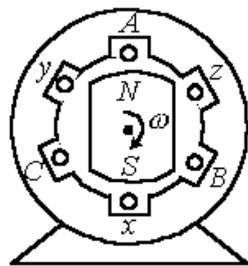


Рис.1

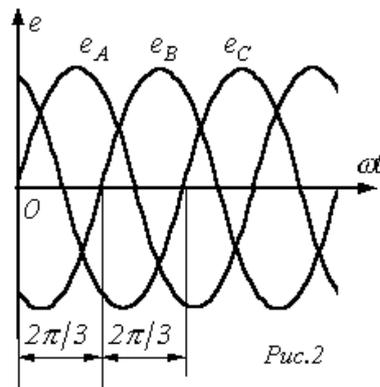


Рис.2

Источником трехфазного напряжения является трехфазный генератор, на статоре которого (см. рис. 1) размещена трехфазная обмотка. Фазы этой обмотки располагаются таким образом, чтобы их магнитные оси были сдвинуты в пространстве друг относительно друга на $2\pi/3$ эл. рад. На рис. 1 каждая фаза статора условно показана в виде одного витка. Начала обмоток принято обозначать заглавными буквами А,В,С, а концы- соответственно прописными x,y,z. ЭДС в неподвижных обмотках статора индуцируются в результате пересечения их витков магнитным полем, создаваемым током обмотки возбуждения вращающегося ротора (на рис. 1 ротор условно изображен в виде постоянного магнита, что используется на практике при относительно небольших мощностях). При вращении ротора с равномерной скоростью в обмотках фаз статора индуцируются периодически изменяющиеся синусоидальные ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, но

отличающиеся вследствие пространственного сдвига друг от друга по фазе на $\frac{2\pi}{3}$ рад. (см. рис. 2).

Трехфазная система ЭДС. Многофазные электрические цепи.

Трехфазные системы в настоящее время получили наибольшее распространение. На трехфазном токе работают все крупные электростанции и потребители, что связано с рядом преимуществ трехфазных цепей перед однофазными, важнейшими из которых являются:

- экономичность передачи электроэнергии на большие расстояния;
- самым надежным и экономичным, удовлетворяющим требованиям промышленного электропривода является асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором;
- возможность получения с помощью неподвижных обмоток вращающегося магнитного поля, на чем основана работа синхронного и асинхронного двигателей, а также ряда других электротехнических устройств;
- уравновешенность симметричных трехфазных систем.

Для рассмотрения важнейшего свойства уравновешенности трехфазной системы, которое будет доказано далее, введем понятие симметрии многофазной системы.

Система ЭДС (напряжений, токов и т.д.) называется *симметричной*, если она состоит из m одинаковых по модулю векторов ЭДС (напряжений, токов и т.д.), сдвинутых по фазе друг относительно друга на одинаковый угол $\alpha = \frac{2\pi}{m}$. В частности векторная диаграмма для симметричной системы ЭДС, соответствующей трехфазной системе синусоид на рис. 2, представлена на рис. 3.

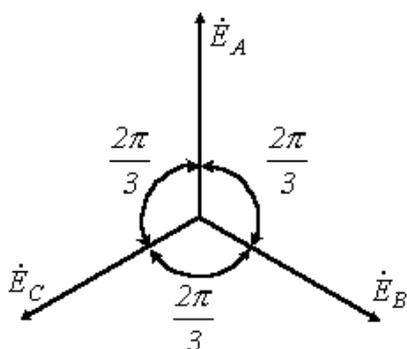


Рис.3

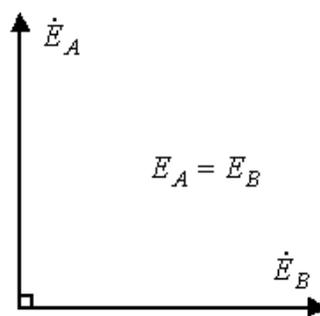


Рис.4

Из несимметричных систем наибольший практический интерес представляет двухфазная система с 90 – градусным сдвигом фаз (см. рис. 4).

Все симметричные трех- и m -фазные ($m > 3$) системы, а также двухфазная система являются *уравновешенными*. Это означает, что хотя в отдельных фазах мгновенная мощность пульсирует (см. рис. 5,а), изменяя за время одного периода не только величину, но в общем случае и знак, суммарная мгновенная мощность всех фаз остается величиной постоянной в течение всего периода синусоидальной ЭДС (см. рис. 5,б).

Уравновешенность имеет важнейшее практическое значение. Если бы суммарная мгновенная мощность пульсировала, то на валу между турбиной и генератором действовал бы пульсирующий момент. Такая переменная механическая нагрузка вредно отражалась бы на энергогенерирующей установке, сокращая срок ее службы. Эти же соображения относятся и к многофазным электродвигателям.

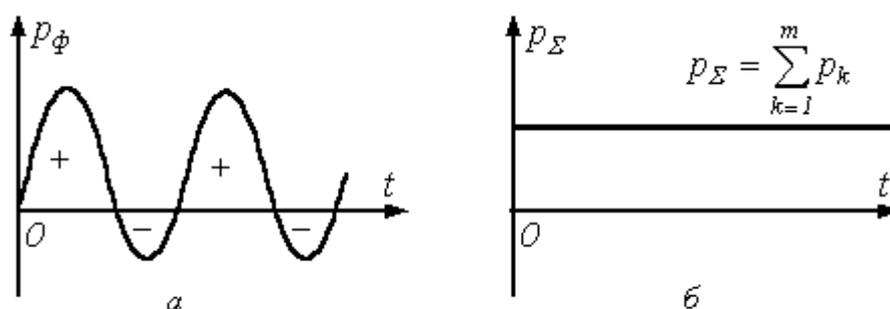


Рис.5

Если симметрия нарушается (двухфазная система Тесла в силу своей специфики в расчет не принимается), то нарушается и уравновешенность. Поэтому в энергетике строго следят за тем, чтобы нагрузка генератора оставалась симметричной.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умудий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент.Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 10: Схема соединения потребителей звезда и треугольник.

План лекции:

1. Схемы соединения трехфазных систем
2. Схема соединения звезда

3. Схема соединения треугольник

Схемы соединения трехфазных систем

Трехфазный генератор (трансформатор) имеет три выходные обмотки, одинаковые по числу витков, но развивающие ЭДС, сдвинутые по фазе на 120° . Можно было бы использовать систему, в которой фазы обмотки генератора не были бы гальванически соединены друг с другом. Это так называемая несвязная система. В этом случае каждую фазу генератора необходимо соединять с приемником двумя проводами, т.е. будет иметь место шестипроводная линия, что неэкономично. В этой связи подобные системы не получили широкого применения на практике.

Для уменьшения количества проводов в линии фазы генератора гальванически связывают между собой. Различают два вида соединений: в звезду и в треугольник. В свою очередь при соединении в звезду система может быть трех- и четырехпроводной.

Схема соединения звезда

На рис. 6 приведена трехфазная система при соединении фаз генератора и нагрузки в звезду. Здесь провода AA', BB' и CC' – линейные провода.

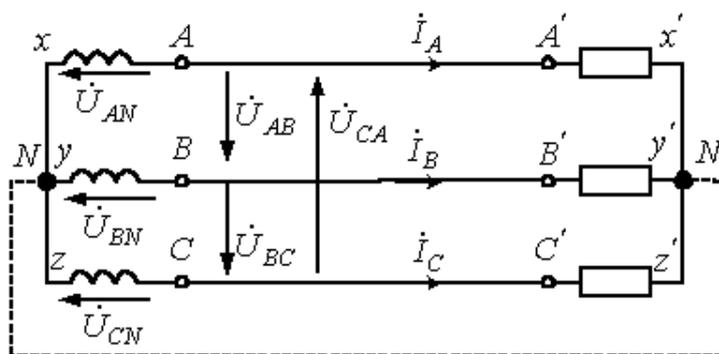


Рис.6

Линейным называется провод, соединяющий начала фаз обмотки генератора и приемника. Точка, в которой концы фаз соединяются в общий узел, называется нейтральной (на рис. 6 N и N' – соответственно нейтральные точки генератора и нагрузки).

Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и приемника, называется нейтральным (на рис. 6 показан пунктиром). Трехфазная система при соединении в звезду без нейтрального провода называется трехпроводной, с нейтральным проводом – четырехпроводной.

Все величины, относящиеся к фазам, носят название фазных переменных, к линии - линейных. Как видно из схемы на рис. 6, при соединении в звезду линейные токи \dot{I}_A, \dot{I}_B и \dot{I}_C равны соответствующим фазным токам. При

Обычно при расчетах принимается $\dot{U}_{AN} = U_{\phi} e^{j0} = U_{\phi}$. Тогда для случая прямого чередования фаз $\dot{U}_{BN} = U_{\phi} e^{-j120^{\circ}}$, $\dot{U}_{CN} = U_{\phi} e^{-j240^{\circ}} = U_{\phi} e^{j120^{\circ}}$ (при обратном чередовании фаз фазовые сдвиги у \dot{U}_{BN} и \dot{U}_{CN} меняются местами). С учетом этого на основании соотношений (1) ... (3) могут быть определены комплексы линейных напряжений. Однако при симметрии напряжений эти величины легко определяются непосредственно из векторной диаграммы на рис. 7. Направляя вещественную ось системы координат по вектору \dot{U}_{AN} (его начальная фаза равна нулю), отсчитываем фазовые сдвиги линейных напряжений по отношению к этой оси, а их модули определяем в соответствии с (4). Так для линейных напряжений \dot{U}_{BC} и \dot{U}_{CA} получаем: $\dot{U}_{BC} = \sqrt{3}U_{\phi} e^{-j90^{\circ}}$; $\dot{U}_{CA} = \sqrt{3}U_{\phi} e^{j150^{\circ}}$.

Схема соединения треугольник

В связи с тем, что значительная часть приемников, включаемых в трехфазные цепи, бывает несимметричной, очень важно на практике, например, в схемах с осветительными приборами, обеспечивать независимость режимов работы отдельных фаз. Кроме четырехпроводной, подобными свойствами обладают и трехпроводные цепи при соединении фаз приемника в треугольник. Но в треугольник также можно соединить и фазы генератора (см. рис. 8).

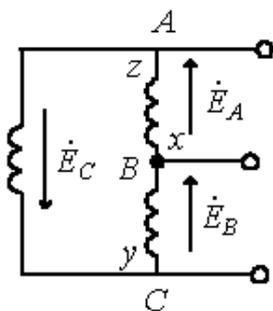


Рис.8

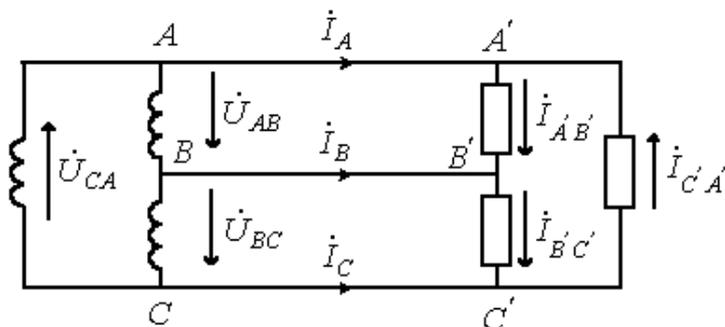


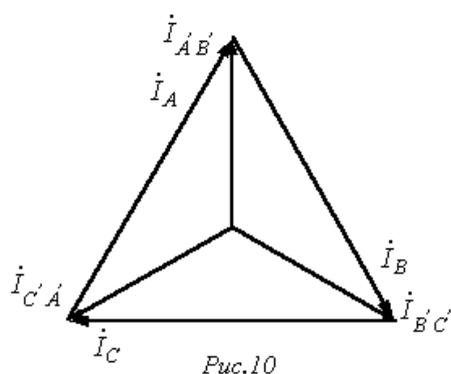
Рис.9

Для симметричной системы ЭДС имеем

$$\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C = 0.$$

Таким образом, при отсутствии нагрузки в фазах генератора в схеме на рис. 8 токи будут равны нулю. Однако, если поменять местами начало и конец любой из фаз, то $\sum \dot{E} \neq 0$ и в треугольнике будет протекать ток короткого замыкания. Следовательно, для треугольника нужно строго соблюдать порядок соединения фаз: начало одной фазы соединяется с концом другой. Схема соединения фаз генератора и приемника в треугольник представлена на рис. 9.

Очевидно, что при соединении в треугольник линейные напряжения равны соответствующим фазным. По первому закону Кирхгофа связь между линейными и фазными токами приемника определяется соотношениями



$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{A'B'} - \dot{I}_{C'A'}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B'C'} - \dot{I}_{A'B'}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C'A'} - \dot{I}_{B'C'}. \end{aligned}$$

Аналогично можно выразить линейные токи через фазные токи генератора.

На рис. 10 представлена векторная диаграмма симметричной системы линейных и фазных токов. Ее анализ показывает, что при симметрии

ТОКОВ

$$I_L = \sqrt{3}I_\phi \quad (5)$$

В заключение отметим, что помимо рассмотренных соединений «звезда – звезда» и «треугольник – треугольник» на практике также применяются схемы «звезда – треугольник» и «треугольник – звезда».

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент.Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 11: Несимметричные системы и разложение.

Понятие о методе симметричных составляющих.

План лекции:

1. Несимметричные системы и разложение.
2. Понятие о методе симметричных составляющих.

Несимметричные системы и разложение.

Если хотя бы одно из условий симметрии не выполняется, в трехфазной цепи имеет место несимметричный режим работы. Такие режимы при наличии в цепи только статической нагрузки и пренебрежении падением напряжения в генераторе рассчитываются для всей цепи в целом любым из рассмотренных ранее методов расчета. При этом фазные напряжения генератора заменяются соответствующими источниками ЭДС. Можно отметить, что, поскольку в многофазных цепях, помимо токов, обычно представляют интерес также потенциалы узлов, чаще других для расчета сложных схем применяется метод узловых потенциалов. Для анализа несимметричных режимов работы трехфазных цепей с электрическими машинами в основном применяется метод симметричных составляющих, который будет рассмотрен далее.

При заданных линейных напряжениях наиболее просто рассчитываются трехфазные цепи при соединении в треугольник. Пусть в схеме на рис. 2,а $\underline{Z}_{AB} \neq \underline{Z}_{BC} \neq \underline{Z}_{CA}$. Тогда при известных комплексах линейных напряжений в соответствии с законом Ома

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

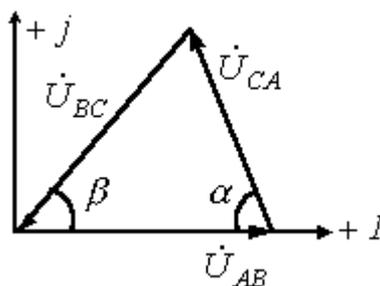


Рис. 1

По найденным фазным токам приемника на основании первого закона Кирхгофа определяются линейные токи:

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

Обычно на практике известны не комплексы линейных напряжений, а их модули. В этом случае необходимо предварительное определение начальных фаз этих напряжений, что можно осуществить, например, графически. Для этого, приняв $\dot{U}_{AB} = U_{AB} e^{j0}$, по заданным модулям напряжений, строим треугольник (см. рис.1), из которого (путем замера) определяем значения углов α и β .

Тогда

$$\begin{aligned}\dot{U}_{BC} &= U_{BC} e^{-j(\pi-\beta)}, \\ \dot{U}_{CA} &= U_{CA} e^{j(\pi-\alpha)}.\end{aligned}$$

Искомые углы α и β могут быть также найдены аналитически на основании теоремы косинусов:

$$\begin{aligned}U_{BC}^2 &= U_{AB}^2 + U_{CA}^2 - 2U_{AB}U_{CA} \cos \alpha; \\ U_{CA}^2 &= U_{AB}^2 + U_{BC}^2 - 2U_{AB}U_{BC} \cos \beta.\end{aligned}$$

При соединении фаз генератора и нагрузки в звезду и наличии нейтрального провода с нулевым сопротивлением фазные напряжения нагрузки равны соответствующим напряжениям на фазах источника. В этом случае фазные токи легко определяются по закону Ома, т.е. путем деления известных напряжений на фазах потребителя на соответствующие сопротивления. Однако, если сопротивление нейтрального провода велико или он отсутствует, требуется более сложный расчет.

Рассмотрим трехфазную цепь на рис. 2,а. При симметричном питании и несимметричной нагрузке ($\underline{Z}_A \neq \underline{Z}_B \neq \underline{Z}_C$) ей в общем случае будет соответствовать векторная диаграмма напряжений (см. рис. 2,б), на которой нейтральные точки источника и приемника занимают разные положения, т.е. $\dot{\phi}_N \neq \dot{\phi}'_N$.

Разность потенциалов нейтральных точек генератора и нагрузки называется *напряжением смещения нейтральной точки* (обычно принимается, что $\dot{\phi}_N = 0$) или просто *напряжением смещения нейтрали*. Чем оно больше, тем сильнее несимметрия фазных напряжений на нагрузке, что наглядно иллюстрирует векторная диаграмма на рис. 2,б.

Для расчета токов в цепи на рис. 6,а необходимо знать напряжение смещения нейтрали. Если оно известно, то напряжения на фазах нагрузки равны:

$$\dot{U}_{AN'} = \dot{U}_{AN} - \dot{U}_{N'N}; \quad \dot{U}_{BN'} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{N'N}; \quad \dot{U}_{CN'} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{N'N}$$

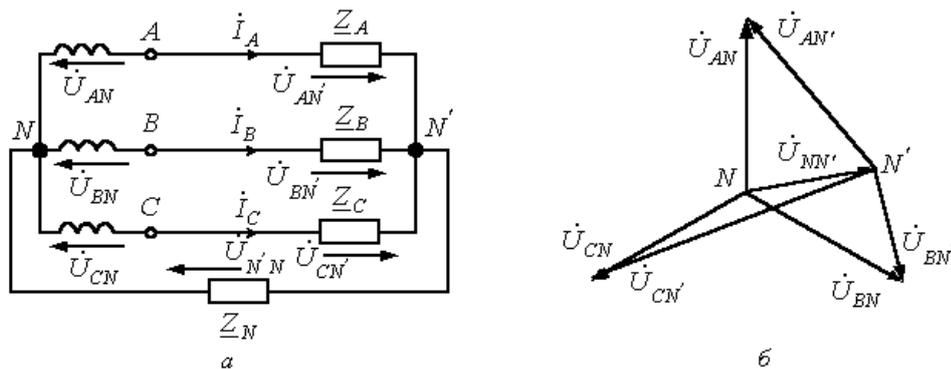
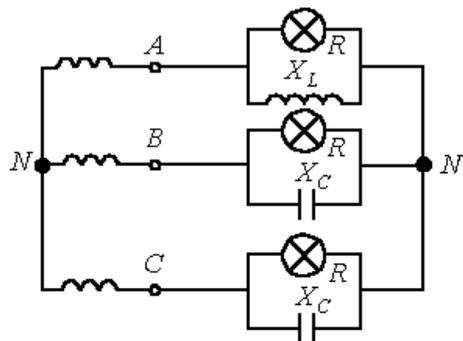


Рис. 2

Тогда для искомых токов можно записать:

$$\dot{I}_A = \dot{U}_{AN'} \underline{Y}_A; \quad \dot{I}_B = \dot{U}_{BN'} \underline{Y}_B; \quad \dot{I}_C = \dot{U}_{CN'} \underline{Y}_C.$$

Соотношение для напряжения смещения нейтрали, записанное на основании метода узловых потенциалов, имеет вид



(1)

Рис. 3

$$\dot{U}_{N'N} = \frac{\dot{U}_{AN} \underline{Y}_A + \dot{U}_{BN} \underline{Y}_B + \dot{U}_{CN} \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}.$$

При наличии нейтрального провода с нулевым сопротивлением $\underline{Y}_N \rightarrow \infty$, и из (1) $\dot{U}_{N'N} = 0$. В случае отсутствия нейтрального провода $\underline{Y}_N = 0$. При симметричной нагрузке ($\underline{Y}_A = \underline{Y}_B = \underline{Y}_C$) с учетом того, что $\dot{U}_{AN} + \dot{U}_{BN} + \dot{U}_{CN} = 0$, из (1) вытекает $\dot{U}_{N'N} = 0$.

В качестве примера анализа несимметричного режима работы цепи с использованием соотношения (1) определим, какая из ламп в схеме на рис. 3 с прямым чередованием фаз источника будет гореть ярче, если $R = X_L = X_C$. Запишем выражения комплексных сопротивлений фаз нагрузки:

$$\underline{Z}_A = \frac{RjX_L}{R + jX_L} = \frac{jR}{1 + j} = \frac{R}{\sqrt{2}} e^{j45^\circ};$$

$$\underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \frac{R(-jX_C)}{R - jX_C} = \frac{-jR}{1 - j} = \frac{R}{\sqrt{2}} e^{-j45^\circ}.$$

Тогда для напряжения смещения нейтрали будем иметь

$$\dot{U}_{NN} = \frac{\frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A} + \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} + \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C}}{\frac{1}{\underline{Z}_A} + \frac{1}{\underline{Z}_B} + \frac{1}{\underline{Z}_C}} = \frac{U_\phi \sqrt{2} \left(\frac{1}{e^{j45^\circ}} + \frac{e^{-j120^\circ}}{e^{-j45^\circ}} + \frac{e^{j120^\circ}}{e^{-j45^\circ}} \right)}{\frac{\sqrt{2}}{R} \left(\frac{1}{e^{j45^\circ}} + \frac{2}{e^{-j45^\circ}} \right)} =$$

$$= U_\phi \frac{e^{-j45^\circ} + e^{-j75^\circ} + e^{j165^\circ}}{e^{-j45^\circ} + 2e^{j45^\circ}} = 0,632U_\phi e^{-j108,43^\circ}.$$

Напряжения на фазах нагрузки (здесь и далее индекс N у фазных напряжений источника опускается)

$$\dot{U}_{AN} = \dot{U}_A - \dot{U}_{NN} = U_\phi - 0,632U_\phi e^{-j108,43^\circ} = 1,34U_\phi e^{j26,6^\circ};$$

$$\dot{U}_{BN} = \dot{U}_B - \dot{U}_{NN} = U_\phi e^{-j120^\circ} - 0,632U_\phi e^{-j108,43^\circ} = 0,4U_\phi e^{j221,6^\circ};$$

$$\dot{U}_{CN} = \dot{U}_C - \dot{U}_{NN} = U_\phi e^{j120^\circ} - 0,632U_\phi e^{-j108,43^\circ} = 1,5U_\phi e^{j101,6^\circ}.$$

Таким образом, наиболее ярко будет гореть лампочка в фазе С.

В заключение отметим, что если при соединении в звезду задаются линейные напряжения (что обычно имеет место на практике), то с учетом того, что сумма последних равна нулю, их можно однозначно задать с помощью двух источников ЭДС, например, $\dot{E}_A = \dot{U}_{AC}$ и $\dot{E}_B = \dot{U}_{BC}$. Тогда, поскольку при этом $\dot{E}_C = 0$, соотношение (1) трансформируется в формулу

$$\dot{U}_{NN} = \frac{\dot{U}_{AC} \underline{Y}_A + \dot{U}_{BC} \underline{Y}_B}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} \quad (2)$$

Понятие о методе симметричных составляющих.

Метод симметричных составляющих относится к специальным методам расчета трехфазных цепей и широко применяется для анализа несимметричных режимов их работы, в том числе с нестатической нагрузкой.

В основе метода лежит представление несимметричной трехфазной системы переменных (ЭДС, токов, напряжений и т.п.) в виде суммы трех симметричных систем, которые называют *симметричными составляющими*. Различают симметричные составляющие *прямой, обратной и нулевой последовательностей*, которые различаются порядком чередования фаз.

Симметричную систему прямой последовательности образуют (см. рис. 4,а) три одинаковых по модулю вектора \dot{A}_1, \dot{B}_1 и \dot{C}_1 со сдвигом друг по отношению к другу на $2\pi/3$ рад., причем \dot{B}_1 отстает от \dot{A}_1 , а \dot{C}_1 - от \dot{B}_1 .

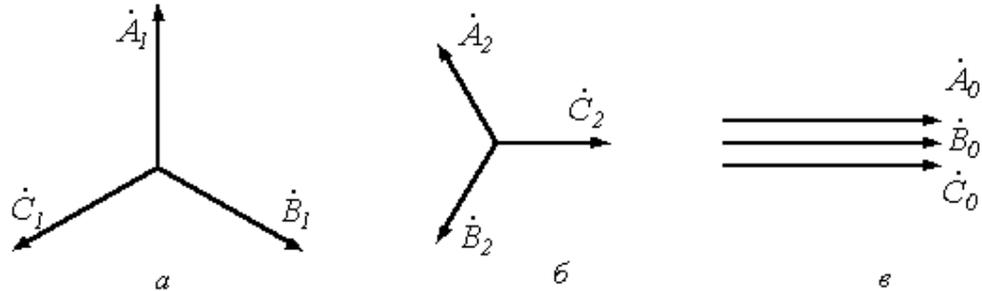


Рис. 4

Введя, оператор поворота $\underline{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}}$, для симметричной системы прямой последовательности можно записать

$$\dot{B}_1 = \underline{a}^2 \dot{A}_1; \quad \dot{C}_1 = \underline{a} \dot{A}_1.$$

Симметричная система обратной последовательности образована равными по модулю векторами \dot{A}_2, \dot{B}_2 и \dot{C}_2 с относительным сдвигом по фазе на $2\pi/3$ рад., причем теперь \dot{C}_2 отстает от \dot{A}_2 , а \dot{B}_2 - от \dot{C}_2 (см. рис. 4,б). Для этой системы имеем

$$\dot{B}_2 = \underline{a} \dot{A}_2; \quad \dot{C}_2 = \underline{a}^2 \dot{A}_2.$$

Система нулевой последовательности состоит из трех векторов, одинаковых по модулю и фазе (см. рис. 4,в):

$$\dot{A}_0 = \dot{B}_0 = \dot{C}_0.$$

При сложении трех указанных систем векторов получается несимметричная система векторов (см. рис. 5).

Любая несимметричная система однозначно раскладывается на симметричные составляющие. Действительно,

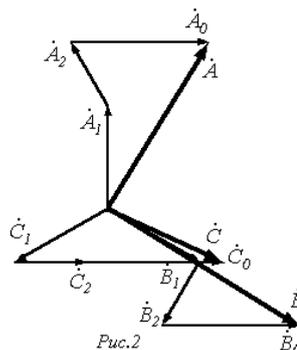


Рис. 5

$$\dot{A} = \dot{A}_1 + \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \quad (1)$$

$$\dot{B} = \dot{B}_1 + \dot{B}_2 + \dot{B}_0 = \underline{a}^2 \dot{A}_1 + \underline{a} \dot{A}_2 + \dot{A}_0; \quad (2)$$

$$\dot{C} = \dot{C}_1 + \dot{C}_2 + \dot{C}_0 = \underline{a} \dot{A}_1 + \underline{a}^2 \dot{A}_2 + \dot{A}_0. \quad (3)$$

Таким образом, получена система из трех уравнений относительно трех неизвестных $\dot{A}_1, \dot{A}_2, \dot{A}_0$, которые, следовательно, определяются однозначно.

Для нахождения \dot{A}_0 сложим уравнения (1)...(3). Тогда, учитывая, что $1 + \underline{a} + \underline{a}^2 = 0$, получим

$$\dot{A}_0 = \frac{1}{3}(\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}) \quad (4)$$

Для нахождения \dot{A}_1 умножим (2) на \underline{a} , а (3) – на \underline{a}^2 , после чего полученные выражения сложим с (1). В результате приходим к соотношению

$$\dot{A}_1 = \frac{1}{3}(\dot{A} + \underline{a}\dot{B} + \underline{a}^2\dot{C}) \quad (5)$$

Для определения \dot{A}_2 с соотношением (1) складываем уравнения (2) и (3), предварительно умноженные соответственно на \underline{a}^2 и \underline{a} . В результате имеем:

$$\dot{A}_2 = \frac{1}{3}(\dot{A} + \underline{a}^2\dot{B} + \underline{a}\dot{C}) \quad (6)$$

Формулы (1)...(6) справедливы для любой системы векторов $\dot{A}, \dot{B}, \dot{C}$, в том числе и для симметричной. В последнем случае $\dot{A} = \dot{A}_1$; $\dot{A}_2 = \dot{A}_0 = 0$.

В заключение раздела отметим, что помимо вычисления симметричные составляющие могут быть измерены с помощью специальных фильтров симметричных составляющих, используемых в устройствах релейной защиты и автоматики.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент. Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000

3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003

4. www.ziyo.net

Контрольные вопросы

1. Какой принцип действия у трехфазного генератора?
2. В чем заключаются основные преимущества трехфазных систем?
3. Какие системы обладают свойством уравновешенности, в чем оно выражается?
4. Какие существуют схемы соединения в трехфазных цепях?
5. Какие соотношения между фазными и линейными величинами имеют место при соединении в звезду и в треугольник?
6. Что будет, если поменять местами начало и конец одной из фаз генератора при соединении в треугольник, и почему?
7. Определите комплексы линейных напряжений, если при соединении фаз генератора в звезду начало и конец обмотки фазы С поменяли местами.
8. Какой многофазный приемник является симметричным?
9. Какой режим работы трехфазной цепи называется симметричным?
10. В чем заключается специфика расчета симметричных режимов работы трехфазных цепей?
11. С помощью каких приемов трехфазная симметричная схема сводится к расчетной однофазной?
12. Что такое напряжение смещения нейтрали, как оно определяется?
13. Как при использовании метода симметричных составляющих учитывается сопротивление в нейтральном проводе?

РАЗДЕЛ V: ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Лекция 12: Понятие трансформатора, принцип его работы.

Энергетическая диаграмма, потери мощности, паспортные данные.

План лекции:

1. Понятие трансформатора и принцип его работы.
2. Потери мощности и энергетическая диаграмма трансформатора.

Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычно листовая электротехническая сталь), и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 1, а).

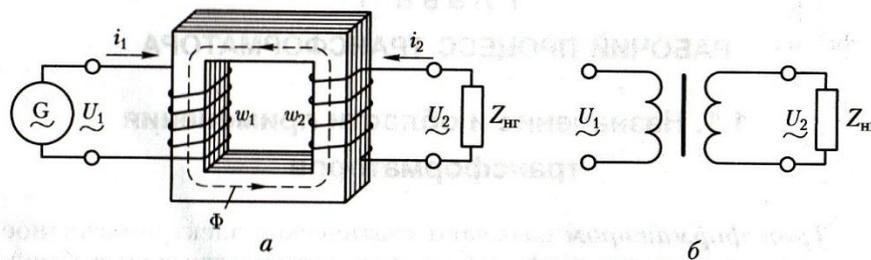


Рис. 1. Электромагнитная (а) и принципиальная (б) схемы трансформатора

Однако из обмоток, которую называют первичной, присоединена к источнику переменного тока (генератору) на напряжение U_1 . К другой обмотке, называемой вторичной, подключен потребитель $Z_{нг}$. Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод, на котором расположены эти обмотки, служит для усиления индуктивной связи между обмотками.

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток i_1 , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС:

в первичной обмотке – ЭДС самоиндукции

$$e_1 = -\omega_1(d\Phi/dt), \quad (1)$$

Во вторичной обмотке – ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -\omega_2(d\Phi/dt), \quad (2)$$

где ω_1 и ω_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

При подключении нагрузки $Z_{нг}$ к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки создается ток i_2 , а на выводах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 . В повышающих трансформаторах $U_2 > U_1$, а понижающих $U_2 < U_1$.

Из (1) и (2) видно, что ЭДС e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков ω_1 и ω_2 в обмотках, поэтому, применяя, обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор практически на любое отношение напряжений.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют обмоткой высшего напряжения (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения, – обмоткой низшего напряжения

(НН).

На рис. 1, б показано условное изображение однофазного трансформатора на принципиальных электрических схемах.

Трансформаторы обладают свойством обратимости: один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он является повышающим, либо понижающим.

Трансформатор – это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению $[(d\Phi/dt)=0]$. Поэтому в обмотках трансформатора не будет наводиться ЭДС.

Конструкция трансформаторов в значительной степени зависит от их назначения, по этому признаку трансформаторы разделяют на следующие основные виды:

- 1) силовые
- 2) силовые специального назначения
- 3) измерительные
- 4) испытательные
- 5) радиотрансформаторы

Потери мощности и энергетическая диаграмма трансформатора.

В процессе трансформирования электрической энергии часть энергии теряется в трансформаторе на покрытие потерь. Потери в трансформаторе разделяются на электрические и магнитные.

Электрические потери. Обусловлены нагревом обмоток трансформаторов при прохождении по этим обмоткам электрического тока. Мощность электрических потерь P_{Σ} пропорциональна квадрату тока и определяется суммой электрических потерь в первичной $P_{\Sigma 1}$ и во вторичной $P_{\Sigma 2}$ обмотках:

$$P_{\Sigma} = P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} = mI_1^2 r_1 + mI_2'^2 r_2', \quad (7)$$

где m — число фаз трансформатора (для однофазного трансформатора $m = 1$, для трехфазного $m = 3$).

При проектировании трансформатора величину электрических потерь определяют по (7), а для изготовленного трансформатора эти потери определяют опытным путем, измерив мощность к.з. при номинальных токах в обмотках $P_{к.ном}$:

$$P_{\Sigma} = \beta^2 P_{к.ном}, \quad (8)$$

где β – коэффициент нагрузки.

Электрические потери называют *переменными*, так как их величина зависит от нагрузки трансформатора.

Магнитные потери. Происходят главным образом в магнитопроводе трансформатора. Причина этих потерь – систематическое перемагничивание магнитопровода переменным магнитным полем. Это перемагничивание вызывает в магнитопроводе два вида магнитных потерь: потери от гистерезиса P_H , связанные с затратой энергии на уничтожение остаточного магнетизма в ферромагнитном материале магнитопровода, и потери от вихревых токов P_{BT} , наводимых переменным магнитным полем в пластинах магнитопровода:

$$P_M = P_H + P_{BT}$$

С целью уменьшения магнитных потерь магнитопровод трансформатора выполняют из магнитно – мягкого ферромагнитного материала – тонколистовой электротехнической стали. При этом магнитопровод делают шихтованным в виде пакетов из тонких пластин (полос), изолированных с двух сторон тонкой пленкой лака.

Магнитные потери от гистерезиса прямо пропорциональны частоте перемагничивания магнитопровода, т. е. частоте переменного тока ($P_H = f$), а магнитные потери от вихревых токов пропорциональны квадрату этой частоты ($P_{BT} \equiv f^2$). Суммарные магнитные потери принято считать пропорциональными частоте тока степени 1,3, т. е. $P_M = f^{1,3}$. Величина магнитных потерь зависит также и от магнитной индукции в стержнях и ярмах магнитопровода ($P_M \equiv B^2$) При неизменном первичном напряжении ($U_1 = \text{const}$) магнитные потери *постоянны*, т.е. не зависят от нагрузки трансформатора (рис. 1.40, а).

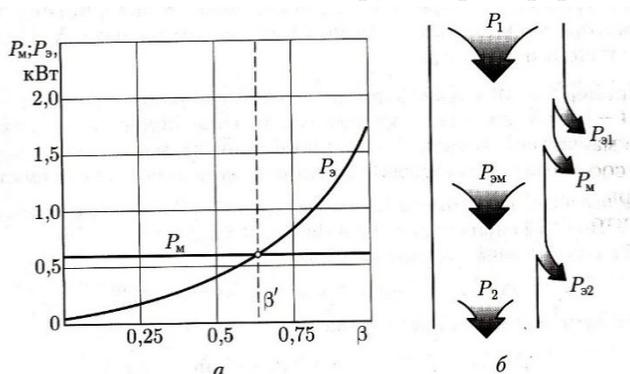


Рис. 2. Зависимость потерь трансформатора от его нагрузки (а) и энергетическая диаграмма (б) трансформатора

При проектировании трансформатора магнитные потери определяют по значению удельных магнитных потерь $P_{уд}$, происходящих в 1 кг тонколистовой электротехнической стали при значениях магнитной индукции 1,0; 1,5 или 1,7 Тл и частоте перемагничивания 50 Гц:

$$P_M = P_{уд} (B/B_x)^2 (f/50)^{1,3} G, \quad (9)$$

где B – фактическое значение магнитной индукции в стержне или ярме магнитопровода трансформатора, Тл; B_x – магнитная индукция, соответствующая принятому значению удельных магнитных потерь, например $B_x = 1,0$ или $1,5$ Тл; G — масса стержня или ярма магнитопровода, кг.

Значения удельных магнитных потерь указаны в ГОСТе на тонколистовую электротехническую сталь. Например, для стали марки 3411 толщиной 0,5 мм при $B = 1,5$ Тл и $f = 50$ Гц удельные магнитные потери $P_{1,5/50} = 2,45$ Вт/кг.

Для изготовленного трансформатора магнитные потери определяют опытным путем, измерив мощность х.х. при номинальном первичном напряжении $P_{0ном}$.

Таким образом, активная мощность P_1 , поступающая из сети в первичную обмотку трансформатора, частично расходуется на электрические потери в этой обмотке $P_{э1}$. Переменный магнитный поток вызывает в магнитопровode трансформатора магнитные потери $P_{эм}$. Оставшаяся после этого мощность, называемая *электромагнитной мощностью* $P_{эм} = P_1 - P_{э1} - P_{эм}$, передается во вторичную обмотку, где частично расходуется на электрические потери в этой обмотке $P_{э2}$. Активная мощность, поступающая в нагрузку трансформатора, $P_2 = P_1 - \sum P$, где $\sum P = P_{э1} + P_{эм} + P_{э2}$ — суммарные потери в трансформаторе. Все виды потерь, сопровождающие рабочий процесс трансформатора, показаны на энергетической диаграмме (рис. 4, б).

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется как отношение активной мощности на выходе вторичной обмотки P_2 (полезная мощность) к активной мощности на входе первичной обмотки P_1 (подводимая мощность):

$$\eta = P_2/P_1 = (P_1 - \sum P)/P_1 = 1 - \sum P/P_1. \quad (10)$$

$$\text{Сумма потерь } \sum P = P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном},$$

Активная мощность на выходе вторичной обмотки трехфазного трансформатора (Вт)

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2 \quad (11)$$

где $S_{ном} = \sqrt{3} U_{2ном} I_{2ном}$ — номинальная мощность трансформатора, В·А; I_2 и U_2 — линейные значения тока, А, и напряжения В.

Учитывая, что $P_1 = P_2 + \sum P$, получаем выражение для расчета КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}} \quad (12)$$

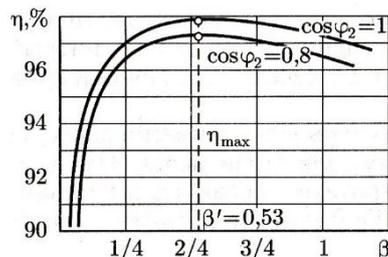


Рис.3. График зависимости КПД трансформатора от нагрузки

Анализ выражения (12) показывает, что КПД трансформатора зависит как от величины (β), так и от характера ($\cos\varphi_2$) нагрузки. Эта зависимость иллюстрируется графиками (рис. 3). Максимальное значение КПД соответствует нагрузке, при которой магнитные потери равны электрическим: $P_{\text{ном}} = \beta'^2 / P_{\text{к.ном}}$, отсюда значение коэффициента нагрузки, соответствующее максимальному КПД,

$$\beta' = \sqrt{P_{\text{ном}} / P_{\text{к.ном}}} \quad (13)$$

Обычно КПД трансформатора имеет максимальное значение при $\beta' = 0,45 \div 0,65$. Подставив в (12) вместо P значение P' по (13), получим выражение максимального КПД трансформатора:

$$\eta = \frac{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2}{\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + 2P_{\text{ном}}} \quad (14)$$

Помимо рассмотренного КПД по мощности иногда пользуются понятием КПД по энергии, который представляет собой отношение количества энергии, отданной трансформатором потребителю W_2 (кВт·ч) в течение года, к энергии W_1 , полученной им от питающей электросети за это же время: $\eta = W_2 / W_1$.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умудий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент. Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 13: Машины постоянного тока, их принцип работы, обмотка.

Механические и рабочие характеристики.

План лекции:

1. Принцип работы машины постоянного тока.
2. Механические и рабочие характеристики.

Принцип работы машины постоянного тока.

Характерным признаком коллекторных машин является наличие у них коллектора – механического преобразователя переменного тока в постоянный и наоборот. Необходимость в таком преобразователе объясняется тем, что в обмотке якоря коллекторной машины должен протекать переменный ток, так как только в этом случае в машине происходит непрерывный процесс электромеханического преобразования энергии.

Рассмотрим принцип действия *коллекторного генератора постоянного тока*. На рис. 1 изображена упрощенная модель такого

генератора: между полюсами N и S постоянного магнита находится вращающаяся часть генератора – якорь, вал которого посредством шкива и ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан) – источником механической энергии. В двух продольных пазах на сердечнике якоря расположена обмотка в виде одного витка a, b, c, d , концы которого присоединены к двум медным изолированным друг от друга полукольцам, образующим простейший коллектор. На поверхность коллектора наложены щетки A и B , осуществляющие скользящий контакт с коллектором и связывающие генератор с внешней цепью, куда включена нагрузка сопротивлением R .

Предположим, что приводной двигатель вращает якорь генератора против часовой стрелки, тогда в витке на якоре, вращающемся в магнитном поле постоянного магнита, наводится ЭДС, мгновенное значение которой $e = 2Blv$, а направление для положения якоря, изображенного на рисунке, указано стрелками.

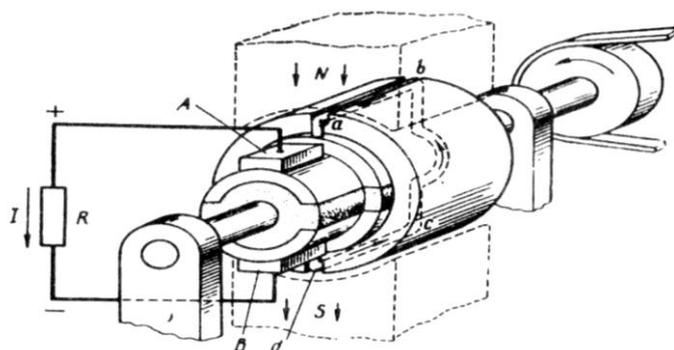


Рис.1. Упрощенная модель коллекторной машины

В процессе работы генератора якорь вращается и виток a, b, c, d , занимает разное пространственное положение, поэтому *в обмотке якоря наводится переменная ЭДС*. Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи (в нагрузке R) был бы переменным, но посредством коллектора и щеток переменный ток обмотки якоря преобразуется в *пульсирующий* ток во внешней цепи генератора, т. е. ток, неизменный по направлению. При положении витка якоря, показанном на рис. 1, ток во внешней цепи (в нагрузке) направлен от щетки A к щетке B ; следовательно, щетка A является положительной, а щетка B -- отрицательной. После поворота якоря на 180° (рис. 2, a) направление тока в витке якоря изменится на обратное, однако полярность щеток, а следовательно, и направление не тока во внешней цепи (в нагрузке) останутся неизменными (рис. 2, $б$).

Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке якоря меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щеткой *A* всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным магнитным полюсом, а под щеткой *B* – пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. Благодаря этому полярность щеток генератора остается неизменной независимо от положения витка якоря. Что же касается пульсаций тока во внешней цепи, то они намного ослабятся при увеличении числа витков в обмотке якоря при их равномерном распределении по поверхности якоря и соответствующем увеличении числа пластин в коллекторе.

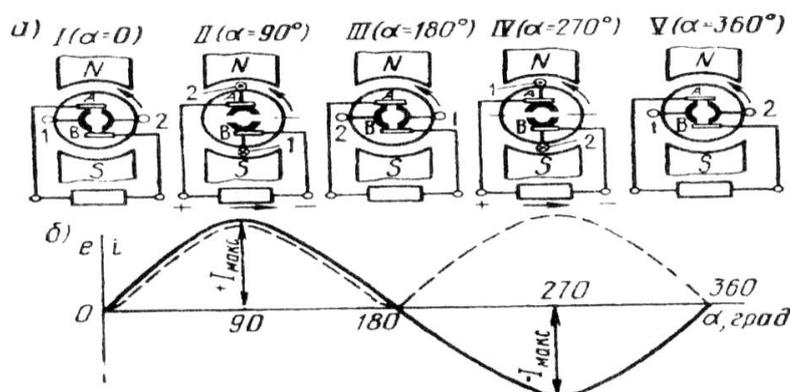


Рис. 2. К принципу действия генератора постоянного тока:

- _____ ЭДС и ток в обмотке якоря;
- ЭДС и ток во внешней цепи генератора

В соответствии с принципом обратимости электрических машин упрощенная модель машины постоянного тока может быть использована в качестве двигателя постоянного тока. Для этого необходимо отключить нагрузку генератора *R* и подвести к щеткам машины напряжение от источника постоянного тока. Например, если к щетке *A* подключить зажим «плюс», а к щетке *B* «минус», то в обмотке якоря появится ток *I*, направление которого показано на рис. 3. В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем постоянного магнита (полем возбуждения) появятся электромагнитные силы $F_{ЭМ}$, создающие на якоре электромагнитный момент *M* и вращающие его против часовой стрелки. После поворота якоря на 180° электромагнитные силы не изменяют своего направления, так как одновременно с переходом каждого проводника

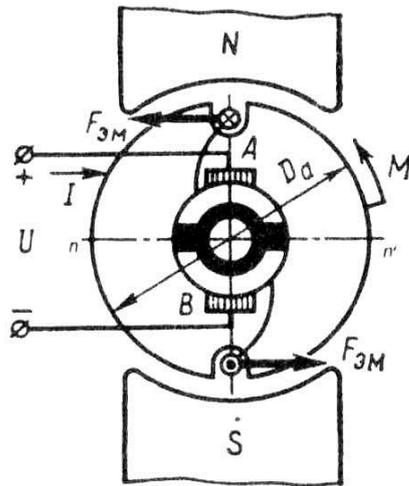


Рис. 3. К принципу действия двигателя постоянного тока

обмотки якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется направление тока.

Таким образом, назначение коллектора и щеток в двигателе постоянного тока – изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе из зоны магнитного полюса одной полярности в зону полюса другой полярности.

Рассмотренная упрощенная модель машины постоянного тока не обеспечивает двигателю устойчивой работы, так как при прохождении проводниками обмотки якоря геометрической нейтрали $m'm'$ (рис. 3) электромагнитные силы $F_{эм} = 0$ (магнитная индукция в середине межполюсного пространства равна нулю). Однако с увеличением числа проводников в обмотке якоря (при равномерном их распределении на поверхности якоря) и числа пластин коллектора вращение якоря двигателя становится устойчивым и равномерным.

Механические и рабочие характеристики

Эксплуатационные свойства двигателя определяются его *рабочими характеристиками*, под которыми понимают зависимость частоты вращения n , тока I , полезного момента M_2 , вращающего момента M от мощности на валу двигателя P_2 при $U = const$ и $I_B = const$ (рис. 4, б).

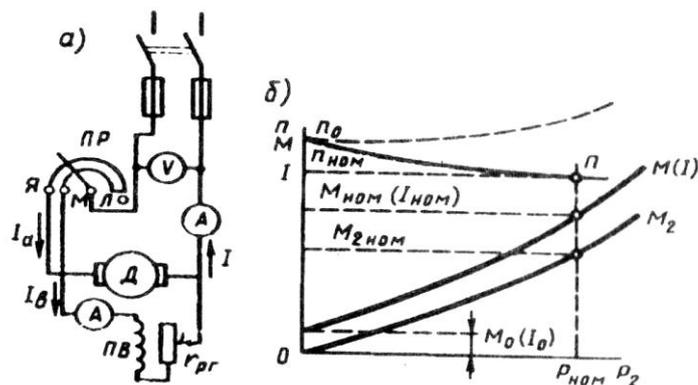


Рис. 4. Схема двигателя параллельного возбуждения (а) и его рабочие характеристики (б)

Для получения аналитического выражения *механической характеристики* $n = f(M)$ используем

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M \sum r}{c_e c_M \Phi^2} = n_0 - \Delta n, \quad (1)$$

где n_0 – частота вращения в режиме х.х.; Δn – изменение частоты вращения, вызванное изменением нагрузки на валу двигателя.

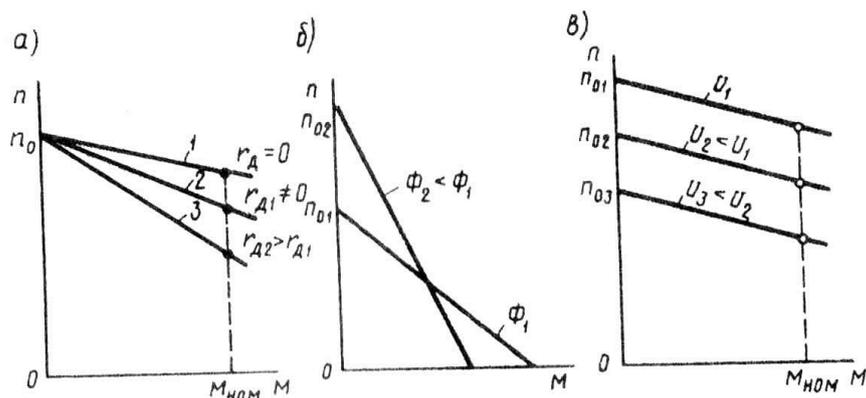


Рис. 5 Механические характеристики двигателя параллельного возбуждения:

- а — при введении в цепь якоря добавочного сопротивления;
- б — при изменении основного магнитного потока;
- в — при изменении напряжения в цепи якоря

На рис. 6, б представлены рабочие характеристики $M = f(I)$ и $n = f(I)$ двигателя последовательного возбуждения.

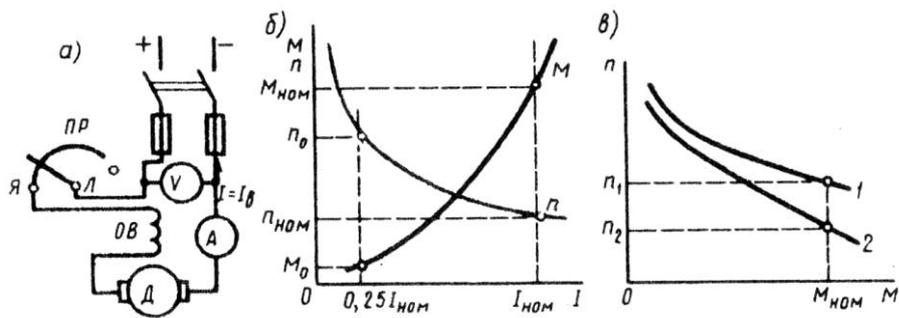


Рис. 6. Двигатель последовательного возбуждения:
a — принципиальная схема; *б* — рабочие характеристики; *в* — механические характеристики; *1* — естественная характеристика; *2* — искусственная характеристика

Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения $n = f(M)$ представлены на рис. 6, *в*. Резко падающие кривые механических характеристик (естественная *1* и искусственная *2*) обеспечивают двигателю последовательного возбуждения устойчивую работу при любой механической нагрузке.

При уменьшении подводимого к двигателю напряжения его механические характеристики смещаются вниз, практически не меняя своей кривизны (рис. 7).

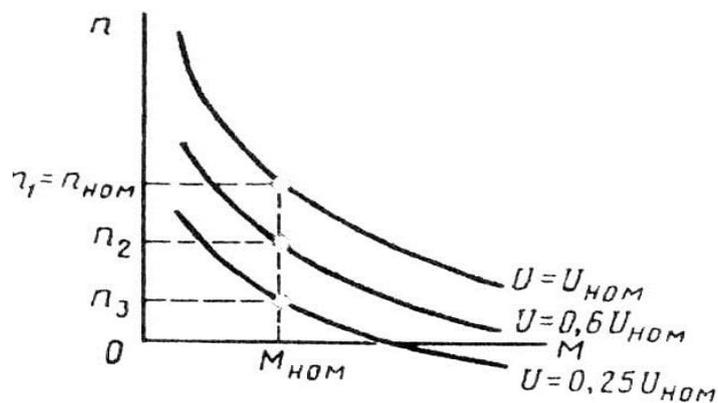


Рис. 7. Механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при изменении подводимого напряжения

На рис. 8, *б* показаны рабочие характеристики двигателя смешанного возбуждения при согласованном включении обмоток возбуждения, а на рис. 8, *в* — механические характеристики. В отличие от механических характеристик двигателя последовательного возбуждения последние имеют более пологий вид.

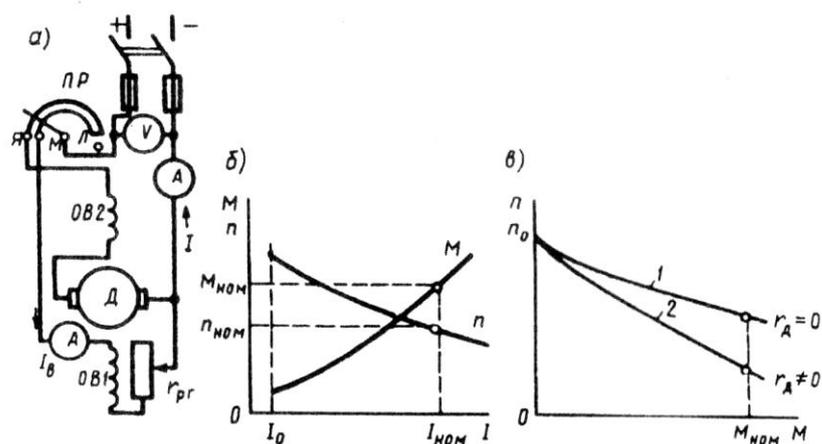


Рис. 8. Схема двигателя смешанного возбуждения (а), его рабочие (б) и механические (в) характеристики

Следует отметить, что по своей форме характеристики двигателя смешанного возбуждения занимают промежуточное положение между соответствующими характеристиками двигателей параллельного и последовательного возбуждения в зависимости от того, в какой из обмоток возбуждения (параллельной или последовательной) преобладает МДС.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент. Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 14: Асинхронные двигатели, принцип их работы.

Энергетическая диаграмма, рабочие и механические характеристики.

План лекции:

1. Принцип работы асинхронного двигателя.
2. Потери мощности и энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.
3. Механическая характеристика.
4. Рабочие характеристики асинхронного двигателя.

Принцип работы асинхронного двигателя

Неподвижная часть асинхронного двигателя – статор – имеет такую же конструкцию, что и статор синхронного генератора. В расточке статора расположена вращающаяся часть двигателя – ротор, состоящий из вала,

сердечника и обмотки (рис. 1). Обмотка ротора представляет собой короткозамкнутую конструкцию, состоящую из восьми алюминиевых стержней, расположенных в продольных пазах сердечника ротора, замкнутых с двух сторон по торцам ротора и алюминиевыми кольцами (на рисунке эти кольца не показаны). Ротор и статор разделены воздушным зазором. При включении обмотки статора в сеть трехфазного тока возникает вращающееся магнитное поле статора, частота вращения которого n_1 .

Вращающееся поле статора (полюсы N_1 и S_1) сцепляется как с обмоткой статора, так и с

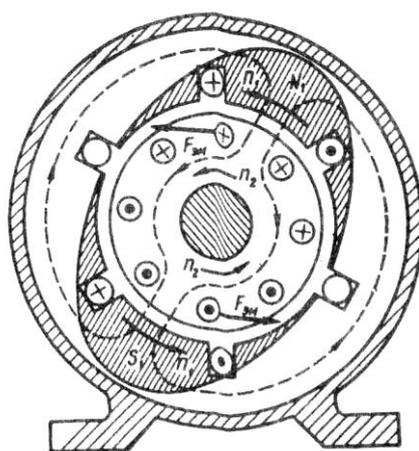


Рис. 1. К принципу действия асинхронного двигателя

обмоткой ротора и наводит в них ЭДС. При этом ЭДС обмотки статора, являясь ЭДС самоиндукции действует встречно приложенному к обмотке напряжению и ограничивает значение тока в обмотке. Обмотка ротора замкнута, поэтому ЭДС ротора создает в стержнях обмотки ротора токи. Взаимодействие этих токов с полем статора создает на роторе электромагнитные силы $F_{эм}$, направление которых определяется по правилу «левой руки». Из рис. 1 видно, что силы $F_{эм}$ стремятся повернуть ротор в направлении вращения магнитного поля статора. Совокупность сил $F_{эм}$ создает на роторе электромагнитный момент M , приводящий его во вращение с частотой n_2 . Вращение ротора посредством вала передается исполнительному механизму.

Таким образом, электрическая энергия, поступающая из сети в обмотку статора, преобразуется в механическую энергию вращения ротора двигателя. Направление вращения магнитного поля статора, а следовательно, и направление вращения ротора зависят от порядка следования фаз напряжения, подводимого к обмотке статора, вращения ротора n_2 ,

называемая асинхронной, всегда меньше частоты вращения поля n_1 , так как только в этом случае происходит наведение ЭДС в обмотке ротора асинхронного двигателя.

Потери мощности и энергетическая диаграмма асинхронного двигателя.

Преобразование электрической энергии в механическую в асинхронном двигателе, как и в других электрических машинах, связано с потерями энергии, поэтому полезная мощность на выходе двигателя P_2 всегда меньше мощности на входе (потребляемой мощности) P_1 на величину потерь ΣP :

$$P_2 = P_1 - \Sigma P \quad (1)$$

Потери ΣP преобразуются в теплоту, что в конечном итоге ведет к нагреву машины. Потери в электрических машинах разделяются на основные и добавочные. Основные потери включают в себя магнитные, электрические и механические.

Магнитные потери P_m в асинхронном двигателе вызваны потерями на гистерезис и потерями на вихревые токи, происходящими в сердечнике при его перемагничивании. Величина магнитных потерь пропорциональна частоте перемагничивания $P_m = f^\beta$, где $\beta = 1,3 \div 1,5$. Частота перемагничивания сердечника статора равна частоте тока в сети ($f = f_1$), а частота перемагничивания сердечника ротора $f = f_2 = f_{1s}$. При частоте тока в сети $f_1 = 50$ Гц при номинальном скольжении $s_{ном} = 1 \div 8$ % частота перемагничивания ротора $f = f_2 = 2 \div 4$ Гц, поэтому магнитные потери в сердечнике ротора настолько малы, что их в практических расчетах не учитывают.

Электрические потери в асинхронном двигателе вызваны нагревом обмоток статора и ротора проходящими по ним токами. Величина этих потерь пропорциональна квадрату тока в обмотке (Вт):

электрические потери в обмотке статора

$$P_{\varepsilon 1} = m_1 I_1^2 r_1 ; \quad (2)$$

электрические потери в обмотке ротора

$$P_{\varepsilon 2} = m_2 I_2^2 r_2 = m_1 I_1^2 r_1' \quad (3)$$

Здесь r_1 и r_2 – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора пересчитанные на рабочую температуру $\Theta_{раб}$

Электрические потери в роторе прямо пропорциональны скольжению:

$$P_{\varepsilon 2} = s P_{\varepsilon м} \quad (4)$$

где $P_{\varepsilon м}$ – электромагнитная мощность асинхронного двигателя, Вт:

$$P_{\varepsilon м} = P_1 = (P_m + P_{\varepsilon 1}) \quad (5)$$

Из (4) следует, что работа асинхронного двигателя экономичнее при малых скольжениях, так как с ростом скольжения растут электрические потери в роторе.

В асинхронных двигателях с фазным ротором помимо перечисленных электрических потерь имеют место еще и электрические потери в щеточном контакте $P_{э,щ} = 3 I_2 \Delta U_{щ} / 2$, где $U_{щ} = 2,2$ В – переходное падение напряжения на пару щеток.

Механические потери $P_{мех}$ – это потери на трение в подшипниках и на вентиляцию. Величина этих потерь пропорциональна квадрату частоты вращения ротора ($P_{мех} = n^2$). В асинхронных двигателях с фазным ротором механические потери происходят еще и за счет трения между щетками и контактными кольцами ротора.

Добавочные потери включают в себя все виды трудно учитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник МДС, пульсацией магнитной индукции в зубцах и другими причинами. В соответствии с ГОСТом добавочные потери асинхронных двигателей принимают равными 0,5% от подводимой к двигателю мощности P_1 :

$$P_{доб} = 0,005 P_1. \quad (6)$$

При расчете добавочных потерь для ненормального режима следует пользоваться выражением

$$P'_{доб} = P_{доб} \beta^2 \quad (7)$$

где $\beta = I_1 / I_{1ном}$ – коэффициент нагрузки.

Сумма всех потерь асинхронного двигателя (Вт)

$$\Sigma P = P_{эм} + P_{э1} + P_{э2} + P_{мех} + P_{доб}. \quad (8)$$

На рис. 2 представлена энергетическая диаграмма асинхронного двигателя, из которой видно, что часть подводимой к двигателю мощности $P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ затрачивается в статоре на магнитные P_m и электрические $P_{э1}$ потери. Оставшаяся после этого электромагнитная мощность $P_{эм}$ передается на ротор, где частично расходуется на электрические потери $P_{э2}$ и преобразуется в полную механическую мощность P'_2 . Часть мощности идет на покрытие механических $P_{мех}$ и добавочных потерь $P_{доб}$, а оставшаяся часть этой мощности P_2 составляет полезную мощность двигателя.

У асинхронного двигателя КПД

$$\eta = P_2 / P_1 = 1 - \Sigma P. \quad (9)$$

Электрические потери в обмотках $P_{э1}$ и $P_{э2}$ являются *переменными потерями*, так как их величина зависит от нагрузки двигателя, т. е. от значений токов в обмотках статора и ротора. *Переменными являются также и добавочные потери*. Что же касается магнитных P_m и механических $P_{мех}$, то они практически не зависят от нагрузки (исключение составляют двигатели,

у которых с изменением нагрузки в широком диапазоне меняется частота вращения).

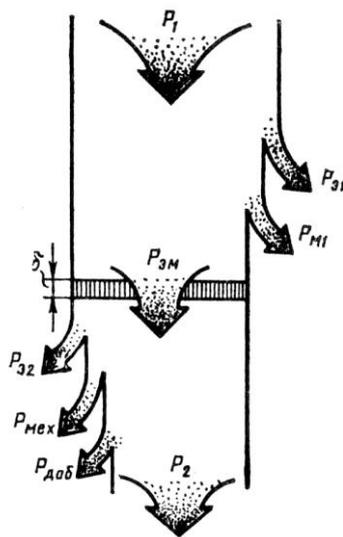


Рис. 2. Энергетическая диаграмма асинхронного двигателя

Механическая характеристика

Электромагнитный момент асинхронного двигателя, а также его максимальное и пусковое значения пропорциональны квадрату напряжения, подводимого к обмотке статора: $M \equiv U_1^2$. Значение критического скольжения не зависит от напряжения U_1 . Это дает нам возможность построить механические характеристики $M = f(s)$ для разных значений напряжения U_1 (рис. 3), из которых следует, что колебания напряжения сети U_1 относительно его номинального значения $U_{1ном}$, сопровождаются не только изменениями максимального и пускового моментов, но и изменениями частоты вращения ротора. С уменьшением напряжения сети частота вращения ротора

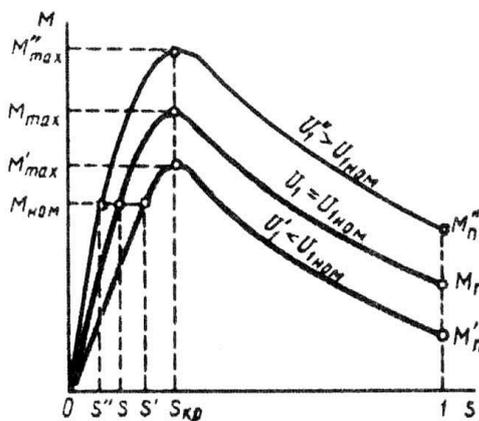


Рис. 3. Влияние напряжения на вид механической характеристики асинхронного двигателя

снижается (скольжение увеличивается). Напряжение U_1 влияет на значение максимального момента $M_{I_{max}}$, а также на перегрузочную способность двигателя $\lambda = M_{max}/M_{ном}$. Так, если напряжение U_1 , понизилось на 30%, т. е. $U_1 = 0,7 U_{1ном}$, то максимальный момент асинхронного двигателя уменьшится более чем вдвое: $M'_{max} = 0,7^2 M_{max} = 0,49 M_{max}$.

Значение максимального момента двигателя не зависит от активного сопротивления ротора r'_2 . Что же касается критического скольжения $s_{кр}$, то, то оно пропорционально сопротивлению r'_2 . Таким образом, если и асинхронном двигателе постепенно увеличивать активное сопротивление цепи ротора, то значение максимального момента будет оставаться неизменным, а критическое скольжение будет увеличиваться. При этом пусковой момент двигателя M_n возрастает с увеличением сопротивления r'_2 до некоторого значения. На рисунке это соответствует сопротивлению $r'_{2ш}$, при котором пусковой момент равен максимальному. При дальнейшем увеличении сопротивления r'_2 пусковой момент уменьшается.

Анализ графиков $M = f(s)$ приведенных на рис. 4, показывает, что изменения сопротивления ротора r'_2 сопровождаются изменениями частоты вращения: с увеличением r'_2 при неизменном нагрузочном моменте $M_{ст}$ скольжение увеличивается, т.е. частота вращения уменьшается (точки 1, 2, 3 и 4).

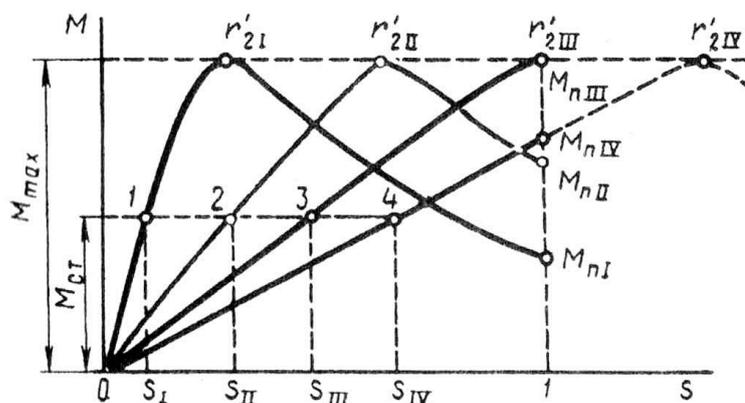


Рис. 4. Влияние активного сопротивления обмотки ротора на механическую характеристику асинхронного двигателя

Влияние активного сопротивления обмотки ротора на форму механических характеристик асинхронных двигателей используется при проектировании двигателей. Например, асинхронные двигатели общего назначения должны иметь «жесткую» скоростную характеристику, т. е. работать с небольшим номинальным скольжением. Это достигается применением в двигателе обмотки ротора с малым активным

сопротивлением r_2' . При этом двигатель имеет более высокий КПД за счет снижения электрических потерь в обмотке ротора ($P_{\Sigma 2} = m_1 I_2'^2$). Выбранное значение z_2' должно обеспечить двигателю требуемое значение пускового момента

Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Рабочие характеристики асинхронного двигателя (рис. 5) представляют собой графически выраженные зависимости частоты вращения n_2 , КПД η , полезного момента (момента на валу) M_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi$, и тока статора I_1 от полезной мощности P_2 при $U_1 = \text{const}$ $f_1 = \text{const}$.

Скоростная характеристика $n_2 = f(P_2)$. Частота вращения ротора асинхронного двигателя

$$n_2 = n_1(1 - s).$$

Скольжение $s = P_{\Sigma 2} / P_{\Sigma}$, т. е. скольжение двигателя, а следовательно, и его частота вращения определяются отношением электрических потерь в роторе к электромагнитной мощности P_{Σ} . Пренебрегая электрическими потерями в роторе в режиме холостого хода, можно принять $P_{\Sigma 2} = 0$, а поэтому $s \approx 0$ и $n_{20} \approx n_1$.

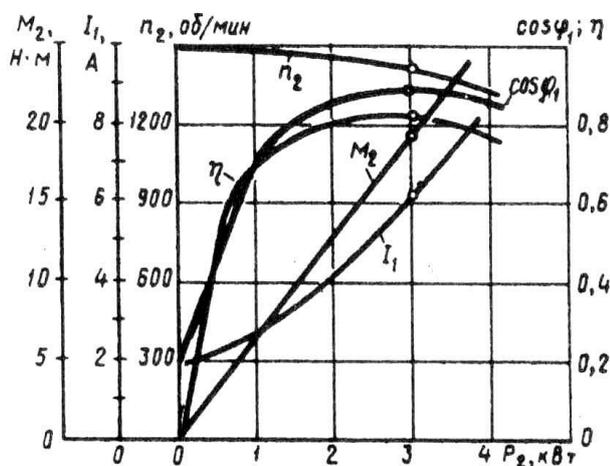


Рис. 5. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент. Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Контрольные вопросы

1. Принцип работы трансформатора?
2. Потери в трансформаторе?
3. Энергетическая диаграмма трансформатора?
4. Конструкция трансформатора
5. Принцип работы машины постоянного тока?
6. Конструкция машины постоянного тока
7. Принцип работы асинхронного двигателя?
8. Конструкция асинхронного двигателя?
9. Понятие механической характеристики машины?
10. Понятие рабочей характеристики машины?

РАЗДЕЛ VI: ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОНИКИ

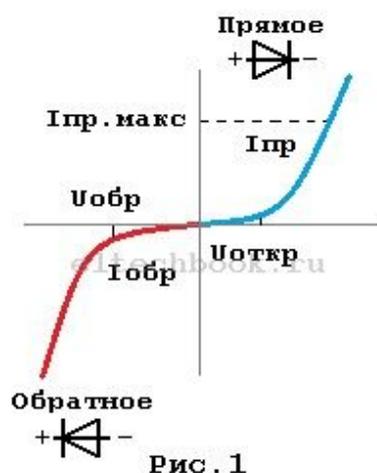
Лекция 15: Назначение, параметры и характеристики диода, тиристора, транзистора.

План лекции:

1. Принцип работы диода и его характеристики.
2. Принцип работы транзистора и его характеристики.
3. Принцип работы тиристора и его характеристики.

Принцип работы диода

Принцип работы, основные характеристики полупроводниковых выпрямительных диодов можно рассмотреть, используя их вольтамперную



характеристику (ВАХ), которая схематично представлена на рис. 1.

Она имеет две ветви, соответствующие прямому и обратному включению диода.

При прямом включении выпрямительного диода ощутимый ток через него начинает протекать при достижении на диоде определенного напряжения $U_{откр}$. Этот ток называется прямым $I_{пр}$. Его изменения на напряжение $U_{откр}$ влияют слабо, поэтому для большинства расчетов можно принять его значение:

- 0,7 Вольт для кремниевых диодов,
- 0,3 Вольт для германиевых.

Естественно, прямой ток диода до бесконечности увеличивать нельзя, при его определенном значении $I_{пр.макс}$ этот полупроводниковый прибор выйдет из строя. Кстати, существуют две основные неисправности полупроводниковых диодов:

- Пробой – диод начинает проводить ток в любом направлении, то есть станет обычным проводником. Причем, сначала наступает тепловой пробой (это состояние обратимо), затем электрический (после этого диод можно смело выбрасывать),
- Обрыв.

Если диод подключить в обратном направлении, через него будет протекать незначительный обратный ток $I_{обр}$, которым, как правило, можно пренебречь. При достижении определенного значения обратного напряжения $U_{обр}$ обратный ток резко увеличивается, прибор, опять же, выходит из строя.

Принцип работы транзистора и его характеристики.

Транзистором называется полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления и генерирования электрических колебаний. Он представляет собой кристалл, помещенный в корпус, снабженный выводами. Кристалл изготавливают из полупроводникового материала. По своим электрическим свойствам полупроводники занимают некоторое промежуточное положение между проводниками и непроводниками тока (изоляторами).

Небольшой кристалл полупроводникового материала (полупроводника) после соответствующей технологической обработки становится способным менять свою электропроводность в очень широких пределах при подведении к нему слабых электрических колебаний и постоянного напряжения смещения.

Кристалл помещают в металлический или пластмассовый корпус и снабжают тремя выводами, жесткими или мягкими, присоединенными к соответствующим зонам кристалла. Металлический корпус иногда имеет собственный вывод, но чаще с корпусом соединяют один из трех электродов транзистора.

В настоящее время находят применение транзисторы двух видов — *биполярные* и *полевые*. Биполярные транзисторы появились первыми и получили наибольшее распространение. Поэтому обычно их называют просто транзисторами. Полевые транзисторы появились позже и пока используются реже биполярных.

Биполярными транзисторы называют потому, что электрический ток в них образуют электрические заряды положительной и отрицательной полярности. Носители положительных зарядов принято называть дырками, отрицательные заряды переносятся электронами. В биполярном транзисторе используют кристалл из германия или кремния — основных полупроводниковых материалов, применяемых для изготовления транзисторов и диодов. Поэтому и транзисторы называют одни *кремниевыми*, другие — *германиевыми*. Для обеих разновидностей биполярных транзисторов характерны свои особенности, которые обычно учитывают при проектировании устройств.

Для изготовления кристалла используют сверхчистый материал, в который добавляют специальные строго дозированные примеси. Они и определяют появление в кристалле проводимости, обусловленной дырками (р-проводимость) или электронами (n-проводимость). Таким образом формируют один из электродов транзистора, называемый *базой*.

Если теперь в поверхность кристалла базы ввести тем или иным технологическим способом специальные примеси, изменяющие тип проводимости базы на обратную так, чтобы образовались близко лежащие зоны n-p-n или p-n-p, и к каждой зоне подключить выводы, образуется транзистор.

Одну из крайних зон называют *эмиттером*, т. е. источником носителей заряда, а вторую — *коллектором*, собирателем этих носителей. Зона между эмиттером и коллектором называется базой. Выводам транзистора обычно присваивают названия, аналогичные его электродам.

Усилительные свойства транзистора проявляются в том, что если теперь к эмиттеру и базе приложить малое электрическое напряжение — входной сигнал, то в цепи коллектор — эмиттер потечет ток, по форме повторяющий входной ток входного сигнала между базой и эмиттером, но во много раз больший по значению.

Для нормальной работы транзистора в первую очередь необходимо подать на его электроды напряжение питания. При этом напряжение на базе относительно эмиттера (это напряжение часто называют напряжением смещения) должно быть равно нескольким десятым долям вольта, а на коллекторе относительно эмиттера – несколько вольт.

Включение в цепь $n-p-n$ и $p-n-p$ транзисторов отличается только полярностью напряжения на коллекторе и смещения. Кремниевые и германиевые транзисторы одной и той же структуры отличаются между собой лишь значением напряжения смещения. У кремниевых оно примерно на 0,45 В больше, чем у германиевых.



Рис. 2

На рис. 2 показаны условные графические обозначения транзисторов той и другой структуры, выполненных на основе германия и кремния, и типовое напряжение смещения. Электроды транзисторов обозначены первыми буквами слов: эмиттер – Э, база – Б, коллектор – К.

Напряжение смещения (или, как принято говорить, режим) показано относительно эмиттера, но на практике напряжение на электродах транзистора указывают относительно общего провода устройства. Общим проводом в устройстве и на схеме называют провод, гальванически соединенный с входом, выходом и часто с источником питания, т. е. общий для входа, выхода и источника питания.

Принцип работы тиристора и его характеристики.

Тиристор является силовым электронным не полностью управляемым ключом. Поэтому иногда в технической литературе его называют одно операционным тиристором, который может сигналом управления переводиться только в проводящее состояние, т. е. включаться. Для его выключения (при работе на постоянном токе) необходимо принимать специальные меры, обеспечивающие спадание прямого тока до нуля.

Тиристорный ключ может проводить ток только в одном направлении, а в закрытом состоянии способен выдержать как прямое, так и обратное напряжение.

Тиристор имеет четырехслойную p–n–p–n –структуру с тремя выводами: *анод (А), катод (С) и управляющий электрод (G)*, что отражено на рис. 3

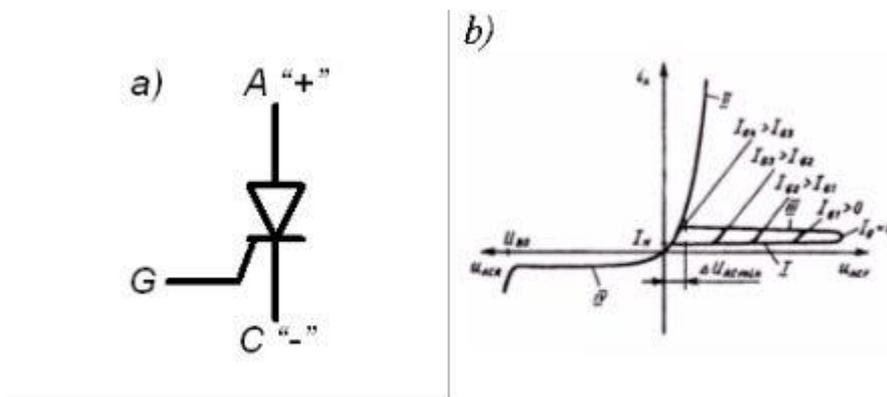


Рис. 3. Обычный тиристор: а) условно–графическое обозначение; б) вольт–амперная характеристика.

На рис. 3, б представлено семейство выходных статических ВАХ при различных значениях тока управления i_G . Предельное прямое напряжение, которое выдерживается тиристором без его включения, имеет максимальные значения при $i_G = 0$. При увеличении тока i_G прямое напряжение, выдерживаемое тиристором, снижается. Включенному состоянию тиристора соответствует ветвь II, выключенному – ветвь I, процессу включения – ветвь III. Удерживающий ток или ток удержания равен минимально допустимому значению прямого тока i_A , при котором тиристор остается в проводящем состоянии. Этому значению также соответствует минимально возможное значение прямого падения напряжения на включенном тиристоре.

Ветвь IV представляет собой зависимость тока утечки от обратного напряжения. При превышении обратным напряжением значения UBO начинается резкое возрастание обратного тока, связанное с пробоем тиристора. Характер пробоя может соответствовать необратимому процессу или процессу лавинного пробоя, свойственного работе полупроводникового стабилитрона.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент.Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000

3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 16: Электрические фильтры, стабилизаторы тока и напряжения. Понятие об автономных инверторах.

План лекции:

1. Электрические фильтры.
2. Стабилизаторы тока и напряжения.
3. Понятие об автономных инверторах.

Электрические фильтры

Сглаживающие фильтры предназначены для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения. Сглаживание пульсаций оценивают коэффициентом сглаживания q .

Основными элементами сглаживающих фильтров являются конденсаторы, катушки индуктивности и транзисторы, сопротивление которых различно для постоянного и переменного токов.

В зависимости от типа фильтрующего элемента различают *емкостные, индуктивные и электронные фильтры*. По количеству фильтрующих звеньев фильтры делятся на *однозвенные и многозвенные*.

Емкостной фильтр представляет собой конденсатор большой емкости, который включается параллельно нагрузочному резистору R_n . Конденсатор обладает большим сопротивлением постоянному току и малым сопротивлением переменному току. Емкостный фильтр целесообразно применять с высокоомным нагрузочным резистором R_n при небольших мощностях нагрузки.

Индуктивный фильтр (дроссель) включается последовательно с R_n . Индуктивность обладает малым сопротивлением постоянному току и большим переменному. Сглаживание пульсаций основывается на явлении самоиндукции, которая изначально препятствует нарастанию тока, а затем поддерживает его при уменьшении. Индуктивные фильтры применяют в выпрямителях средней и большой мощностей, т. е. в выпрямителях, работающих с большими токами нагрузки.

Работа емкостного и индуктивного фильтра основана на том, что во время протекания тока, потребляемого из сети, конденсатор и катушка индуктивности запасают энергию, а когда тока от сети нет, либо он уменьшается, элементы отдают накопленную энергию, поддерживая ток (напряжение) в нагрузке.

Стабилизаторы тока и напряжения.

Стабилизаторы – это устройства для автоматического поддержания постоянства значения электрического напряжения на входах приемников электрической энергии (стабилизатор напряжения) или силы тока в их цепях (стабилизатор тока) независимо от колебаний напряжения в питающей сети и величины нагрузки. Стабилизатор обеспечивает нагрузку стабилизированным напряжением только в том случае, если сетевое напряжения находится в определенных пределах. Если сетевое напряжение выйдет за эти пределы (значительные превышения напряжения, равно как его кратковременные глубокие провалы или полное отсутствие), стабилизатор отключит питаемые электроприборы и они обесточатся.

Стабилизаторы бывают следующих типов:

Феррорезонансные. Были разработаны в середине 60 годов прошлого века, действие их основано на использовании явления магнитного насыщения ферромагнитных сердечников трансформаторов или дросселей. Применялись такие устройства для стабилизации напряжения питания бытовой техники (телевизор, радиоприемник, холодильник и т.п.).

Достоинства феррорезонансных стабилизаторов: высокая точность поддержания выходного напряжения (1 – 3%), высокая (для того времени) скорость регулирования. Недостатки: повышенный уровень шума и зависимость качества стабилизации от величины нагрузки.

Современные феррорезонансные стабилизаторы лишены этих недостатков, но стоимость их равна или выше стоимости ИБП (Источника Бесперебойного Питания) на такую же мощность. Вследствие этого феррорезонансные стабилизаторы широкого распространения в качестве бытовых не получили.

Электромеханические. В 60 – 80-е годы прошлого века для регулирования напряжения применялись автотрансформаторы с ручным регулированием выходного напряжения, вследствие чего приходилось постоянно следить за прибором, показывающим выходное напряжение (стрелочный или светящаяся линейка) и, при необходимости, вручную выставлять номинальное. В настоящее время коррекция выходного напряжения осуществляется автоматически, с помощью электродвигателя с редуктором.

Достоинство таких электромеханических стабилизаторов – высокая точность поддержания выходного напряжения (2–3%). Недостатки – повышенный уровень шума (шумит двигатель, и практически постоянно, т.к. отслеживается изменение напряжения на (2–4 В) и низкая скорость регулирования из-за инерционности двигателя. При резком увеличении напряжения может кратковременно отключать нагрузку, т.к. напряжение на

выходе может превысить максимально допустимое значение. При этом, в большинстве случаев, такая высокая точность не требуется, достаточно 5–7%, как указано в паспортах на самые широко распространенные бытовые электроприборы общего назначения.

Электронные (ступенчатого регулирования). Наиболее широкий класс стабилизаторов, обеспечивающих поддержание выходного напряжения с определенной точностью в широких пределах входного напряжения. Принцип стабилизации основан на автоматическом переключении секций трансформатора с помощью силовых ключей (реле, тиристоры, симисторы). В силу ряда достоинств, электронные стабилизаторы напряжения нашли наибольшее распространение на рынке стабилизаторов.

Достоинства: быстрое действие, широкий диапазон входного напряжения, отсутствие искажения формы входного напряжения, высокое значение КПД. Недостаток – ступенчатое изменение выходного напряжения, ограничивающее точность стабилизации в пределах 0,9%–7%.

Понятие об автономных инверторах.

Инверторы подразделяются на зависимые (ведомые сетью) и автономные (независимые).

Автономный инвертор работает на автономную нагрузку, не содержащую других источников энергии той же частоты, что и выходная частота инвертора. Автономные инверторы, так же как и зависимые, могут работать с естественной и искусственной коммутацией. Естественная коммутация автономного инвертора имеет место при его работе на перекомпенсированные синхронные двигатели, на статорные обмотки вентильного двигателя и т. д. Однако чаще всего в автономных инверторах, выполненных на тиристорах, применяется искусственная коммутация вентилей. В зависимости от режима работы источника питания инвертора и особенностей протекания в нем электромагнитных процессов различают *инверторы напряжения, тока и резонансные инверторы.*

Наиболее широкое применение получили инверторы напряжения и тока. Резонансные инверторы выполняются на частоту выходного напряжения в несколько единиц и десятков килогерц и используются в основном в электротермии.

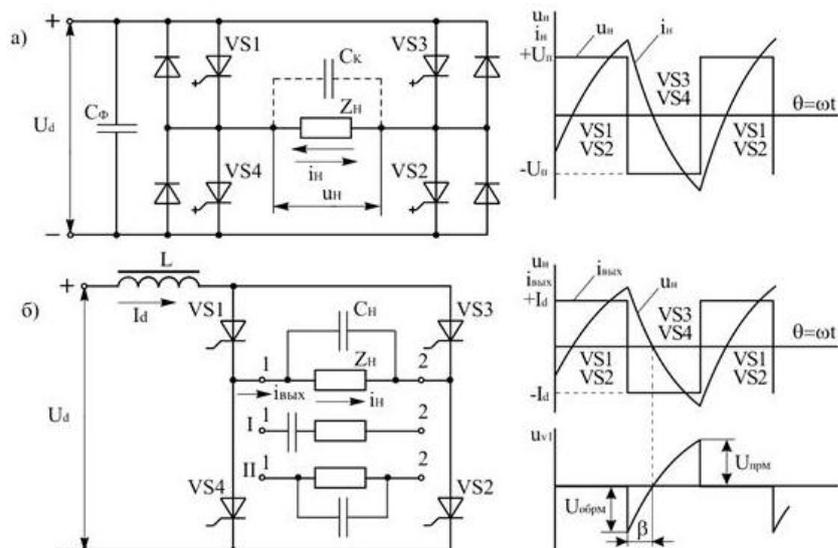


Рис. 1. Схемы и диаграммы автономных инверторов напряжения (а) и тока (б)

Питание инвертора напряжения (рис.1,а) производится от источника напряжения. В связи с этим форма напряжения $u_{н}$ определяется алгоритмом переключения тиристоров, а форма тока $i_{н}$ зависит от характера нагрузки. Реактивная мощность нагрузки компенсируется за счет введения конденсатора C_{Φ} достаточно большой емкости. Обмен реактивной энергией между нагрузкой и конденсатором возможен благодаря подключению так называемого обратного выпрямителя (моста реактивного тока), образованного из неуправляемых вентилей.

Инвертор тока (рис.1,б) получает питание от источника тока, для чего в цепь постоянного тока включена достаточно большая индуктивность L , и поэтому $I_d = \text{const}$. Форма выходного тока $i_{н}$ определяется только порядком переключения тиристоров, а форма напряжения $u_{н}$ зависит от характера нагрузки. Изображенная на рис.1,б форма кривой тока $i_{\text{ВЫХ}}$ предполагает возможность мгновенного изменения тока в цепи нагрузки, что невозможно, если нагрузка инвертора носит индуктивный характер. Однако, если нагрузку шунтировать конденсатором достаточно большой емкости, то мгновенное изменение тока $i_{\text{ВЫХ}}$ оказывается возможным. Таким образом, общая нагрузка инвертора тока должна иметь емкостный характер. При этом конденсатор $C_{н}$ должен компенсировать не

только реактивную мощность нагрузки Z_H , но и инвертора. Последнее означает, что при условии мгновенной коммутации тиристором к запираемому вентилю должно быть приложено отрицательное напряжение в течение времени, определяемого углом $\beta = \delta$ и необходимого для восстановления его управляющих свойств. На рис.1,б изображены кривые напряжения на конденсаторе U_{C_H} , которое равно напряжению на нагрузке, и на тиристоре U_{T1} .

При регулировании частоты выходного тока необходимо изменять емкость конденсатора C_H обратно пропорционально квадрату частоты для сохранения постоянства угла δ . Это приводит к очень большой величине емкости при низких частотах. Поэтому схема, представленная на рис.1,б, практически не применяется, используются более сложные схемы.

В зависимости от того, как включен конденсатор по отношению к нагрузке, инверторы тока и напряжения разделяются на *параллельные, последовательные и последовательно-параллельные*.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент. Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Контрольные вопросы

1. Полупроводниковые приборы?
2. Принцип работы тиристора?
3. Принцип работы транзистора?
4. Принцип работы диода?
5. Назначение электрических фильтров?
6. Виды электрических фильтров?
7. Расскажите о стабилизаторе тока и напряжения?

РАЗДЕЛ VII: ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ПРИВОД И УПРАВЛЯЮЩИЕ АППАРАТЫ

Лекция 17: Основные понятия об электрическом приводе, основные уравнения, механические характеристики и переходные процессы.

План лекции:

1. Основные понятия об электрическом приводе.
2. Механика электропривода.
3. Уравнение движения электропривода.

Основные понятия об электрическом приводе.

В настоящее время основным средством приведения в движение рабочих машин является электрический двигатель и, соответственно, основным типом привода служит электрический привод или сокращенно *электропривод* (ЭП). Причем на современном уровне развития техники электропривод выполняется в виде *автоматизированного электропривода* (АЭП).

С помощью АЭП осуществляются необходимые перемещения в металлорежущих станках, различных перерабатывающих машинах, транспортных средствах, в подъемных установках и т.д. Более половины производимой электроэнергии потребляется ЭП.

Особенность АЭП состоит в том, что переработка информации, необходимая для управления потоками энергии, осуществляется автоматически. Благодаря применению АЭП человек освобождается не только от тяжелого физического труда, но с него снимаются также функции соответствующей переработки информации.

В результате достигается улучшение условий труда занятых в производственном процессе людей, а также значительный рост эффективности процесса производства.

Развитие и совершенствование современного АЭП определяется, прежде всего, прогрессивными решениями в области новых типов электромеханических преобразователей и совершенствованием традиционных электрических машин, развитием силовой преобразовательной техники и электроники, новыми достижениями в теории автоматического управления.

Основные элементы АЭП показаны на рис. 1: РМ – рабочая машина, МПУ – механическое передаточное устройство, ЭДУ – электродвигательное устройство, СПУ – силовое преобразовательное устройство, УУ – управляющее устройство, ЗУ – задающее устройство.

Дадим более подробную характеристику перечисленных элементов АЭП. Под *рабочими машинами* понимают механические устройства, осуществляющие изменение формы, свойств, состояния и положение предметов труда или сбор, переработку и использование информации. Примерами рабочих машин для изменения формы предметов труда могут служить металлообрабатывающие станки, прессы, прокатные станы металлургического производства и др. Изменение свойств и состояния предметов труда осуществляется, например, с помощью установок для закалки, нанесения покрытий, химических установок, компрессоров и др. Для изменения местоположения объектов используются подъемные краны, лифты, эскалаторы, конвейеры

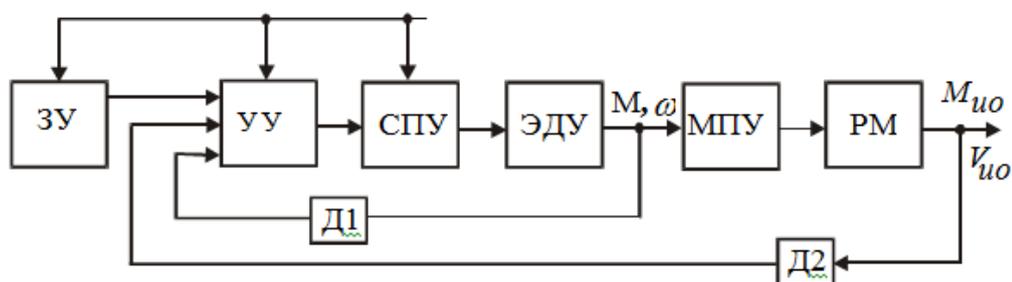


Рис. 1

электрифицированные транспортные средства и др. Учитывая столь широкую область применения АЭП, можно сказать, что он охватывает практически все области современной техники.

Электродвигательное устройство является в электроприводе основным элементом, преобразующим механическую энергию в электрическую. В качестве ЭДУ используются асинхронные двигатели синхронные двигатели, двигатели постоянного тока независимого, последовательного и смешанного возбуждения, шаговые, вентильные двигатели и др.

Механическая энергия от ЭДУ передается к исполнительным органам РМ через *механическое передаточное устройство* (механический редуктор, цепная передача, ходовая пара «винт – гайка» и т.д.). МПУ позволяет при необходимости преобразовать выходные переменные ЭДУ в требуемые для приведения в движения РМ. Например, преобразовать вращательное движение вала двигателя в линейное перемещение суппорта токарного станка, понизить с помощью редуктора частоту вращения вала двигателя, обеспечить необходимую величину момента или усилия на исполнительном органе РМ.

Для создания регулирующего воздействия на ЭДУ используется *силовое преобразовательное устройств*. На вход СПУ поступают сигналы от *управляющего устройства*.

Желаемые значения регулируемых переменных задаются с помощью *задающего устройства*.

Современные АЭП при жестких требованиях к качеству регулирования выходных переменных выполняются в виде замкнутых систем автоматического управления. При этом на входы УУ кроме сигналов задания поступают сигналы обратной связи, формируемые датчиками обратных связей Д1, Д2, и т.д., например, сигналы пропорциональные частоте вращения двигателя ω_d , моменту на валу двигателя, моменту M_{uo} и скорости V_{uo} исполнительного органа, и др. В замкнутой системе УУ формирует командные сигналы на СПУ в функции сигналов рассогласования, получаемых в результате сравнения задающих сигналов с сигналами соответствующих датчиков обратных связей.

Учитывая изложенное, можно сказать:

Автоматизированным электроприводом называется электромеханическая система, предназначенная для приведения в движение исполнительных органов рабочих машин и управления их технологическими процессами, состоящая из задающего, управляющего, силового преобразовательного, электродвигательного и механического передаточного устройств.

В тех случаях, когда нет жестких требований к качеству управления движением исполнительных органов рабочей машины, используются более простые привода, состоящие из силового выключателя и электродвигателя.

С точки зрения способов распределения механической энергии разнообразные ЭП можно разделить на 3 вида: групповой, индивидуальный, взаимосвязанный.

Групповой ЭП применялся на первых этапах развития техники привода и обеспечивал движение исполнительных органов нескольких рабочих машин или нескольких исполнительных органов одной и той же машины. Передача механической энергии и ее распределение в этом случае осуществлялось от одного двигателя с помощью трансмиссий. Очевидные недостатки такого привода – громоздкость механических связей, сложность управления движением каждого исполнительного органа. Вследствие этого групповой ЭП в настоящее время почти не применяется..

В *индивидуальном ЭП* управление движением каждого исполнительного органа обеспечивается отдельным двигателем, что упрощает механические

передачи, облегчает управление движением, позволяет достичь более высоких энергетических показателей.

Взаимосвязанный ЭП имеет два или несколько электрически или механически связанных между собой двигателей. Примером взаимосвязанного ЭП может служить привод цепного конвейера большой протяженности. Исполнительным органом такого конвейера служит цепь, приводимая в движение несколькими двигателями, установленными по длине конвейера. Взаимосвязанный ЭП широко применяется в транспортных установках, бумагоделательных машинах, текстильных агрегатах, прокатных станах металлургического производства и т.д. Одной из разновидностей взаимосвязанного ЭП является многодвигательный привод – это электропривод, в котором несколько двигателей работают на общий вал.

Механика электропривода

При проектировании электропривода электродвигатель должен выбираться так, чтобы его механические характеристики соответствовали механическим характеристикам производственного механизма. Механические характеристики дают взаимосвязь переменных в установившихся режимах.

Механической характеристикой механизма называют зависимость между угловой скоростью и моментом сопротивления механизма, приведенными к валу двигателя $\omega=f(M_c)$.

Среди всего многообразия выделяют несколько характерных типов механических характеристик механизмов:

1. Характеристика с моментом сопротивления, не зависящим от скорости (прямая 1 на рис. 2). Такой характеристикой обладают, например, подъемные краны, лебедки, поршневые насосы при неизменной высоте подачи и др.

2. Характеристика с моментом сопротивления линейно зависящим от скорости (прямая 2 на рис. 2). Такая зависимость присуща, например, приводу генератора постоянного тока с независимым возбуждением, работающему на постоянную нагрузку.

3. Характеристика с нелинейным возрастанием момента (кривая 3 на рис. 2). Типичными примерами здесь могут служить характеристики вентиляторов, центробежных насосов, гребных винтов. Для этих механизмов момент M_c зависит от квадрата угловой скорости ω .

4. Характеристика с нелинейно спадающим моментом сопротивления (кривая 4 на рис. 2). Например, у механизмов главного движения некоторых

металлорежущих станков момент M_c изменяется обратно пропорционально ω , а мощность потребляемая механизмом, остается постоянной.

Механической характеристикой электродвигателя называется зависимость его угловой скорости от вращающего момента $\omega_d = f(M)$.

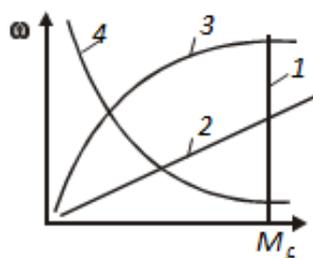


Рис. 2

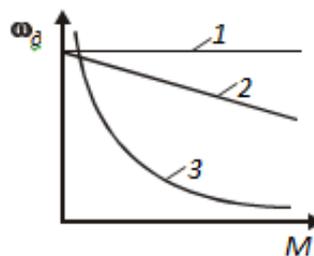


Рис. 3

В качестве примеров на рис. 3 приведены механические характеристики: 1 – синхронного двигателя; 2 – двигателя постоянного тока независимого возбуждения; 3 – двигателя постоянного тока последовательного возбуждения.

Для оценки свойств механических характеристик электропривода используют понятие жесткости характеристики. Жесткость определяется по выражению

$$\beta = \Delta M / \Delta \omega_d,$$

где ΔM – изменение момента двигателя; $\Delta \omega_d$ – соответствующее изменение угловой скорости.

Для линейных характеристик значение β остается постоянным, для нелинейных – зависит от рабочей точки.

Используя это понятие, характеристики, приведенные на рис. 3, можно качественно оценить так: 1 – абсолютно жесткая ($\beta = \infty$); 2 – жесткая; 3 – мягкая.

Уравнение движения электропривода.

При воздействии на электропривод различных возмущений (изменение статического момента, колебания сетевого напряжения и т.п.) в нем возникают переходные процессы. Уравнение движения электропривода учитывает силы и моменты, действующие в переходных режимах.

Как известно из физики в соответствии с законом Ньютона при поступательном движении движущая сила F уравнивается силой сопротивления F_c машины и инерционной силой $m \frac{dV}{dt}$

$$m \frac{dV}{dt} = F - F_c .$$

Для электропривода характерно вращательное движение, а уравнение его движения имеет аналогичный вид

$$J_{np} \frac{d\omega_{\partial}}{dt} = M - M_c . \quad (1)$$

Здесь аналогом массы является приведенный момент инерции J_{np} , вместо линейной скорости V рассматривается угловая скорость ω_{∂} , а в правую часть уравнения входят момент двигателя M и статический момент механизма M_c . Из уравнения (1) следует, что в установившемся режиме,

когда ускорение $\frac{d\omega_{\partial}}{dt} = 0$

$$M = M_c , \quad (2)$$

т.е. момент двигателя уравнивается моментом сопротивления производственного механизма.

Установившийся режим работы привода может быть *устойчивым или неустойчивым*.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент.Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Лекция 18: Управляющие аппараты: ручное управление, устройство защиты, контактные реле.

План лекции:

1. Аппараты ручное управление.
2. Аппараты защиты.
3. Реле.

Аппараты ручное управление

Электрическим аппаратом называют электротехническое устройство, предназначенное для регулирования, контроля и защиты источников электрической энергии и электрических приемников, а также для контроля и регулирования различных электрических процессов. Электрические аппараты общепромышленного назначения, электробытовые аппараты и устройства выпускаются напряжением до 1 кВ, высоковольтные – свыше 1 кВ. До 1 кВ делятся на аппараты ручного, дистанционного управления, аппараты защиты и датчики.

Рубильники являются простейшими аппаратами ручного управления, которые используются в цепях переменного тока при напряжении до 660 В и постоянного тока при напряжении до 440 В.

Кроме рубильников к коммутационным аппаратам ручного управления относят *рубильники, переключатели, пакетные выключатели, универсальные переключатели, контроллеры*. Эти аппараты служат для включения и отключения, а переключатели – для переключения электрических цепей постоянного и переменного тока при номинальной нагрузке.

Аппараты защиты.

Аппараты защиты – для защиты электрических цепей от ненормальных режимов работы (к.з., перегрузка). Сюда относятся *предохранители высокого и низкого напряжения, различного рода реле*.

Предохранитель – коммутационный электрический аппарат, предназначенный для отключения защищаемой цепи посредством разрушения специально предусмотренных для этого токоведущих частей под действием тока, превышающего определенное значение.

В большей части конструкций отключение цепи осуществляется путем расплавления плавкой вставки, которая нагревается непосредственно током защищаемой цепи. После отключения цепи необходимо заменить перегоревшую вставку на исправную.) Эта операция производится вручную либо автоматически. В последнем случае заменяется весь предохранитель.

Широкое применение предохранителей в самых различных областях народного хозяйства и в быту привело к многообразию их конструкций. Однако несмотря на это, все они имеют следующие основные элементы: корпус или несущую деталь, плавкую вставку, контактное присоединительное устройство, дугогасительное устройство или дугогасительную среду.

Реле

Реле (фр. *relais*) – электрическое или электронное устройство (ключ), предназначенное для замыкания или размыкания электрической цепи при

заданных изменениях электрических или неэлектрических входных воздействий.

Обычно под этим термином подразумевается электромагнитное реле – электромеханическое устройство, замыкающее или размыкающее механические электрические контакты при подаче в обмотку реле электрического тока, порождающего магнитное поле, которое вызывает перемещения ферромагнитного якоря реле, связанного механически с контактами и последующее перемещение контактов коммутирует внешнюю электрическую цепь.

Основные типы реле:

Промежуточные реле применяются для одновременного замыкания или размыкания одной или нескольких цепей.

Реле времени служит для искусственного замедления действия устройств защиты и автоматики. Время, проходящее с момента подачи напряжения на обмотку реле времени до замыкания его контактов, называется выдержкой времени реле.

Защитные реле могут применяться для включения, выключения и защиты устройств — электродвигателей, вентиляторов и т.д., имеющих термоконтакты. Защитное реле автоматически отключит вентилятор, если термоконтакты двигателя разомкнутся. Повторное включение возможно после того, как двигатель остынет до рабочей температуры.

Реле давления предназначено например, для систем автоматики водоснабжения домов, коттеджей, дач и др. Может управлять включением и отключением электрических насосов, которые обеспечивают подачу давления воды в водопроводе в соответствии со значением уставки давления.

Измерительные реле тока или напряжения замыкают контакты при определенном значении протекающего через обмотку реле тока или напряжения (в реле, работающем на электромагнитном принципе).

Указательные реле служат для фиксации действия релейной защиты. Протекающий ток носит кратковременный характер, контакты остаются в сработавшем состоянии до тех пор, пока их не приведет в начальное состояние обслуживающий персонал.

Список литературы:

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент.Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. www.ziyo.net

Контрольные вопросы

1. Назначение электрического привода?
2. Напишите уравнение электропривода?
3. Виды электрического привода?
4. Принцип работы реле?
5. Виды реле?
6. Понятие об электрических аппаратах?
7. Виды электрических аппаратов

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ И ЭЛЕКТРОННЫХ БИБЛИОТЕК

1. А. Хонбобоев., Н. А.Халилов. Умумий электротехника ва электроника асослари. – Тошкент. Ўзбекистон, 2000.
2. Синдеев Ю.Г. Электротехника и основы электроники – М: Высшая школа, 2000
3. Шихин А.Я и др. Электротехника – М: Энергия, 2003
4. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. –7-е изд., перераб. и доп. –М.: Высш. шк., 2003.
5. Касаткин А.С. «Общая электротехника», Энергоатомиздат, 1985 г.
6. www.ziyo.net
7. <http://mister-grey.narod.ru/>
8. <http://www.ozon.ru/?context>