

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Саратовский государственный аграрный университет
имени Н. И. Вавилова»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

краткий курс лекций

для студентов 2- 3 курса

Направление подготовки

35.03.06 Агроинженерия

Профиль подготовки

Электрооборудование и электротехнологии

Саратов 2015

УДК 621.3

Теоретические основы электротехники : краткий курс лекций для студентов 2, 3 курса специальности (направления подготовки) 35.03.06 «Агроинженерия» / Сост.: С.П. Скворнюк, О.Н. Чурляева // ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ. – Саратов, 2015. – 106с.

Краткий курс лекций по дисциплине «Теоретические основы электротехники» составлен в соответствии с рабочей программой дисциплины и предназначен для студентов направления подготовки 35.03.06 «Агроинженерия». Краткий курс лекций содержит теоретический материал по основным вопросам теории электрических и магнитных цепей. Направлен на формирование у студентов способности анализировать и математически описывать процессы в электрических и магнитных цепях, а также синтезировать новые цепи.

УДК 621.3

© Скворнюк С.П., Чурляева О.Н., 2015

© ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ

Введение

Электротехникой в широком смысле слова называется обширная область практического применения электромагнитных явлений.

Так как все отрасли электротехники связаны между собой, то в системе высшего электротехнического образования имеется курс «Теоретические основы электротехники», являющейся базой для изучения различных электротехнических дисциплин.

В настоящее время специальные электротехнические дисциплины ставят перед курсом теоретических основ электротехники задачи расчета и исследования процессов, характеризующихся токами, напряжениями, мощностями, магнитными потоками и т. д., а также задачи расчета и исследования магнитных полей.

Лекция 1

Введение

Теоретические основы электротехники (ТОЭ) – это необходимый фундамент для изучения всех электротехнических дисциплин. Знание ТОЭ позволяет решать две важнейшие задачи:

- 1) анализировать режимы работы существующих электрических цепей;
- 2) синтезировать (создавать) новые электрические цепи с заранее заданными свойствами.

Краткая история развития электротехники.

Электротехника – область практического применения электромагнитных явлений.

1802 г. – В.В. Петров открыл электрическую дугу и обосновал ее применение для освещения, плавки и варки металлов.

1831 г. – М.Фарадей открыл явление и закон электромагнитной индукции

1844 г. – Э.Х. Ленц установил, что количество теплоты Q , выделяемое в сопротивлении R при протекании по нему электрического тока I за время t равно: $Q = I^2 \cdot R \cdot t$ (независимо от англичанина Джоуля).

1845 г. – немецкий физик Кирхгоф сформулировал основные законы разветвленных электрических цепей.

1889 г. – Доливо-Добровольский построил первый трехфазный двигатель и предложил трехфазную систему переменных токов.

Линейные электрические цепи постоянного тока.

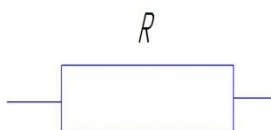
1.1 Электрическая цепь.

Электрическая цепь – совокупность электротехнических устройств, предназначенных для получения электрической энергии, передачи ее на расстояние и преобразования электрической энергии в другие виды энергии, при этом процессы в электрической цепи могут быть описаны с помощью понятий ЭДС, электрического тока и напряжения.

Электрические цепи, в которых величины I и U остаются неизменными во времени называются цепями постоянного тока.

Графическое изображение электрической цепи с помощью ее условных обозначений её элементов называется электрической схемой.

Каждый элемент электрической цепи выполняет свою специфическую функцию, но все элементы объединяет наличие у них активного сопротивления – R .



1.2 Закон Джоуля – Ленца.

При протекании электрического тока I по активному сопротивлению R происходит преобразование электрической энергии в тепловую. Количественно этот процесс описывается законом Джоуля – Ленца:

$$Q = I^2 R t \quad (1),$$

Где: Q – количество теплоты; I – ток; R – активное сопротивление; t – время.

В выражении (1) произведение квадрата тока на активное сопротивление – активная мощность P :

$$P = I^2 R \quad (2).$$

Активная мощность характеризует интенсивность необратимого процесса преобразования электрической энергии в другие виды энергии (тепловую, световую, механическую).

Параметры электрической цепи – характеризуют свойства элементов электрической цепи. В цепи постоянного тока таких параметров два: 1) ЭДС источников электрической энергии – E , 2) активное сопротивление цепи – R .

ЭДС – это работа сторонних (неэлектрических) сил, присущая источнику электрической энергии, затрачиваемая на перемещение единицы положительного заряда внутри источника от вывода с меньшим потенциалом к выводу с большим потенциалом.

1.3 Линейные и нелинейные элементы.

Зависимость U на элементе электрической цепи от I протекающего по элементу называется вольт – амперной характеристикой – $U = f(I)$.

По виду вольт – амперной характеристики все элементы делятся на линейные и нелинейные. У линейных элементов вольт – амперная характеристика является прямой линией, а у нелинейных элементов вольт – амперная характеристика не прямая линия.

Для упрощения анализа реальная электрическая цепь заменяется её схемой замещения (физической моделью), состоящей из идеальных элементов, параметрами которых являются параметрами реальных элементов цепи.

Реальная схема

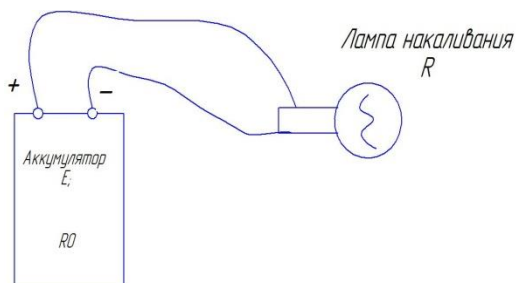
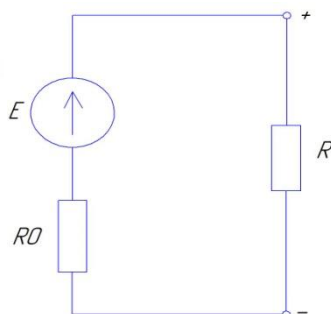


схема замещения



1.4 Конфигурация схемы электрической цепи.

При анализе электрических цепей необходимо учитывать конфигурацию их схем (топологию).

Конфигурация схемы электрической цепи определяется количеством ветвей, узлов и контуров, имеющихся в данной электрической цепи.

Ветвь – участок электрической цепи, состоящий из последовательно соединенных элементов, по которым протекает один и тот же электрический ток.

Узел (узловая точка) – точка, в которой электрически соединяются 3 и более ветвей.

Контур – любой замкнутый путь, проходящий по ветвям схемы.

Независимый контур – контур, в который входит хотя бы одна новая ветвь, не вошедшая в предыдущие контуры.

Режим электрической цепи произвольной конфигурации полностью определяется 1–м и 2–м законами Кирхгофа.

1.5 Законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа: в узловой точке электрической цепи алгебраическая сумма токов равна 0.

$$\sum I = 0 \quad (2).$$

В этом уравнении токи подтекающие к узловой точке будем записывать с плюсом, а токи отрицательные с минусом.

Второй закон Кирхгофа: в любом контуре электрической цепи алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме падений напряжения на пассивных элементах этого контура.

$$\sum E = \sum IR \quad (3).$$

В этом уравнении положительные знаки записываются для ЭДС и токов, направления которых совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура. На примере схемы электрической цепи на рис.1 запишем первый и второй законы Кирхгофа.

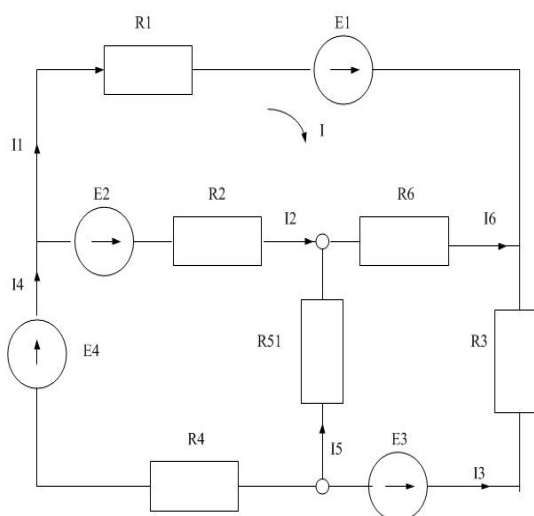


Рис.1

Для первой узловой точки:

$$I1 + I4 - I2 = 0$$

Для первого контура:

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2 - I_6 R_6$$

Анализ электрических цепей может быть осуществлен с помощью законов Кирхгофа.

Вопросы для самоконтроля.

1. Что называется электрической цепью?
2. Что объединяет все элементы электрической цепи?
3. Чем отличаются линейные элементы от нелинейных?
4. Дать определение ветви, узлу и контуру электрической цепи.
5. Сформулировать законы Кирхгофа.

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А. М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 2

Представление реальных источников электрической энергии двумя схемами замещения. Распределение потенциала вдоль участка цепи; закон Ома.

2.1 Последовательная схема замещения .

Схема замещения электрической цепи, содержащей один источник электрической энергии (E ; R_0) и одного потребителя (R), показана на рис.2.

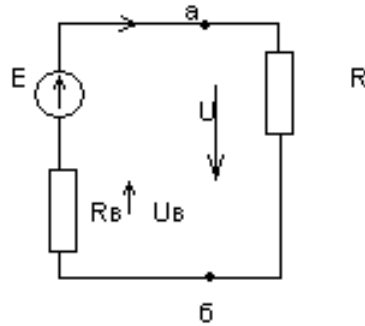


Рис.2

Ток в потребителе R направлен от точки с большим потенциалом φ_1 к точке с меньшим потенциалом φ_2 . Тогда на основании 2-ого закона Кирхгофа можно записать:

$$E = IR + IR_0 \quad \text{или} \quad U = E - IR_0 \quad (4).$$

Напряжение на выводах источника электрической энергии зависит от величины тока I внутреннего сопротивления R_0 источника.

Схема на рис.2 называется последовательной схемой замещения. Если $R_0 = 0$, то $E = U$ и такой источник называется идеальным.

2.2 Параллельная схема замещения.

Разделим выражение $E = U + IR_0$ на R_0 :

$$\frac{E}{R_0} = \frac{U}{R_0} + I,$$

Где: $\frac{E}{R_0} = I_{max}$ - максимальный ток источника при его коротком замыкании; I - ток потребителя; $\frac{E}{R_0} = I_0$ - ток, зависящий от внутренних потерь энергии в источнике. В результате получим выражение, соответствующее 1-му закону Кирхгофа:

$$I_{max} = I_0 + I \quad (5).$$

На основе (5) синтезируем вторую схему замещения рис.3:

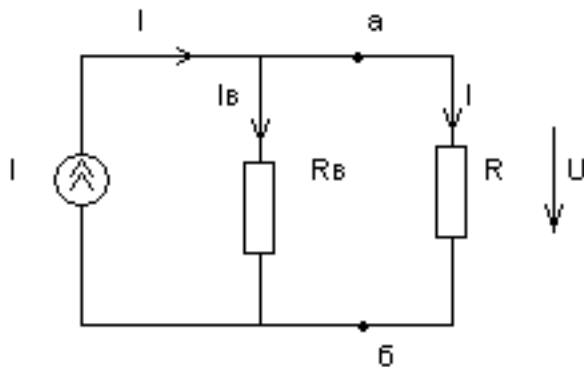


рис. 3

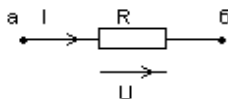
Любой реальный источник электрической энергии может быть представлен двумя схемами замещения последовательной или параллельной. В последовательной схеме имеем последовательное соединение E и R_0 реального источника.

В параллельной схеме R_0 реального источника включается параллельно источнику тока, который независимо от U вырабатывает ток равный току к.з. $-\frac{E}{R_0} = I_{max}$; I_{max} – источник тока.

2.3 Распределение потенциала вдоль неразветвленного участка электрической цепи

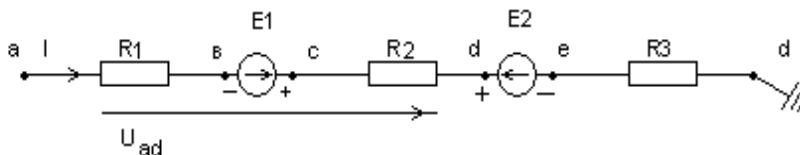
Во внешней цепи ток течет от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом, т.е. $\varphi_a > \varphi_b$.

$$U = IR = \varphi_a - \varphi_b \text{ – известно из физики}$$



$\varphi_a = \varphi_b + IR$, т.е. $\varphi_a > \varphi_b$ на величину $U = IR$ (или $\varphi_b = \varphi_a - IR$) внутри источника ЭДС ток течет от меньшего потенциала к большему

Рассмотрим участок цепи с большим набором элементов:



За точку отсчета возьмем потенциал точки f т.к. точка f заземлена и ее потенциал равен 0. Тогда:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_e &= \varphi + I * R_3 \\ \varphi_d &= \varphi_e + E_2 \\ \varphi_c &= \varphi_d + I R_2 \\ \varphi_b &= \varphi_c - E_1 \\ \varphi_a &= \varphi_b + I R_1 \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

2.4 Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС – обобщенный закон Ома.

Определим φ_a через известные величины и φ :

$$\varphi_a = IR_1 + IR_2 + E_2 + IR_3 + \varphi,$$

Найдем I:

$$I = \frac{\varphi_a - \varphi_d + E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{U_{ad} + E_1 - E_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

Или в общем виде:

$$I_{ав} = \frac{\pm U_{ав} + \sum_1^n E_n}{\sum_1^m R_m}$$

Ток в ветви, содержащей ЭДС, равен дроби, в числителе которой стоит алгебраическая сумма ЭДС и U на данной ветви, а в знаменателе – арифметическая сумма активных сопротивлений данной ветви.

Правило знаков в законе Ома.

Если направление ЭДС, напряжения совпадают с направлением тока, то они берутся со знаком «+», а если не совпадают, то со знаком минус «-».

2.5 Расчет цепей постоянного тока непосредственным применением законов Кирхгофа.

Целью расчета является нахождение токов в ветвях электрической цепи при известных значениях R и E, входящих в данную цепь.

Количество неизвестных токов равно количеству ветвей в электрической цепи.

На основе 1-ого закона Кирхгофа составляется количество уравнений равное (n-1), где n – количество узловых точек в схеме цепи.

На основе 2-го закона Кирхгофа составляются уравнения для каждого независимого контура схемы. Решая полученную систему уравнений находят токи во всех ветвях.

Вопросы для самоконтроля.

1. Какие существуют схемы замещения реальных источников электрической энергии?
2. В каком направлении течет электрический ток во внешней цепи?
3. Сформулировать обобщенный закон Ома.
4. Цель расчета электрической цепи.
5. Порядок расчета электрической цепи на основе законов Кирхгофа.

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энегррия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 3

Метод контурных токов

3.1 Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов.

Рассмотрим данный метод расчета на примере схемы на рис.4:

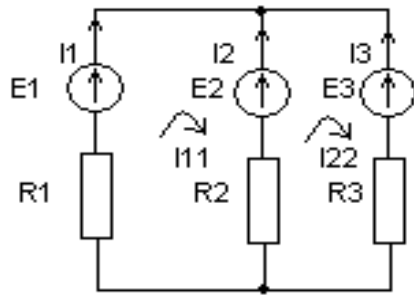


рис.4

Для нахождения токов составим уравнения по законам Кирхгофа:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_3 = 0(1) \\ E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2(2) \\ E_2 - E_3 = I_2 R_2 - I_3 R_3(3) \end{cases}$$

Представим, что в каждом независимом контуре циркулирует свой ток – контурный (обозначим их на схеме). Выразим действительные токи через контурные: I_{11} и I_{22}

$$I_1 = I_{11} ; I_3 = -I_{22} ; I_2 = I_{22} - I_{11}$$

Следовательно, для определения всех токов достаточно найти токи, циркулирующие в независимых контурах – контурные токи.

Для получения расчетных уравнений используются уравнения по 2-му закону Кирхгофа, в которых исключается ток общей ветви – I_{22} :

$$I_2 = -I_1 - I_3$$

$$E_1 - E_2 = I_1(R_1 + R_2) + I_3 R_2$$

$$E_2 - E_3 = -I_3(R_2 + R_3) - I_1 R_2$$

Введем обозначения:

$R_{11} = R_1 + R_2$ - контурное сопротивление 1-го контура

$R_{22} = R_2 + R_3$ - контурное сопротивление 2-го контура

$R_{12} = R_2$ - сопротивление смежной ветви между 1 и 2 контуром.

$E_{11} = E_1 - E_2$ - контурная ЭДС 1-го контура.

$E_{22} = E_2 - E_3$ - контурная ЭДС 2-го контура.

Окончательно получим следующие уравнения:

$$\begin{cases} I_{11}R_{11} - I_{22}R_{12} = E_{11} \\ -I_{11}R_{12} + I_{22}R_{22} = E_{22} \end{cases} \quad (8)$$

В этих уравнениях сопротивление смежной ветви берется с «+», если контурные токи в ней направлены одинаково, и с «-», если встречно. Контурная ЭДС – алгебраическая сумма ЭДС контура; ЭДС берется с «+», если ее направление совпадает с контурным током, и «-», если не совпадает.

Запишем уравнение в общем виде:

$$I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} + I_{33}R_{13} + \dots + I_{nn}R_{1n} = E_{11} \quad (9), \text{ где}$$

I_{11} – контурный ток контура, для которого составляется уравнение.

$I_{22}; I_{33} \dots I_{nn}$ – контурные токи смежных контуров.

$R_{11} = R_i$ – сопротивление контура, для которого составляется уравнение, равно арифметической сумме сопротивлений контура.

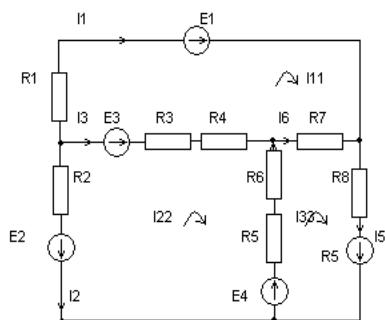
$R_{12}; R_{13} \dots R_{1n} = R_j$ – сопротивление смежной ветви между контурами, для которого составляется уравнение и другими контурами, равно арифметической сумме сопротивлений соответствующей ветви.

$E_{11} = E_i$ – контурная ЭДС контура, для которого составляется уравнение, равна алгебраической сумме ЭДС контура.

3.2 Методика расчета

- 1) Подготовка схемы к расчету.
 - 1.1) Обозначить узловые точки:
 - 1.2) Обозначить направления E и I .
- 2) В каждом независимом контуре схемы обозначить направление контурного тока (рекомендуется в одном направлении).
- 3) Для каждого независимого контура составить уравнение вида (9).
- 4) Решить систему уравнений и найти значения контурных токов.
- 5) По значениям контурных токов найти значения действительных токов.

Рассмотрим схему на рис.5



Найдем значения контурных токов I_{11} ; I_{22} ; I_{33} .

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_3 + R_4 + R_7) - I_{22}(R_3 + R_4) - I_{33} * R_7 = E_1 - E_3 \\ I_{22}(R_2 + R_3 + R_4 + R_6 + R_5) - I_{11}(R_3 + R_4) - I_{33}(R_6 + R_5) = -E_2 - E_4 \\ I_{33}(R_5 + R_6 + R_7 + R_8) - I_{22}(R_6 + R_5) - I_{11} * R_7 = E_5 + E_4 \end{cases}$$

Действительные токи найдем через контурные:

$$I_1 = I_{11} \quad I_4 = I_{33} - I_{22}$$

$$I_2 = -I_{22} \quad I_5 = I_{33}$$

$$I_3 = I_{22} - I_{11} \quad I_6 = I_{33} - I_{11}$$

Вопросы для самоконтроля.

1. Сформулировать суть метода контурных токов.
2. Как определяется знак сопротивления смежной ветви?
3. Чему равна контурная ЭДС?
4. Как по значениям контурных токов найти значения токов действительных?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 4

Расчет цепей постоянного тока методом узловых потенциалов. Баланс мощностей. Теорема о компенсации.

4.1 Метод узловых потенциалов.

Рассмотрим схему на рис.6:

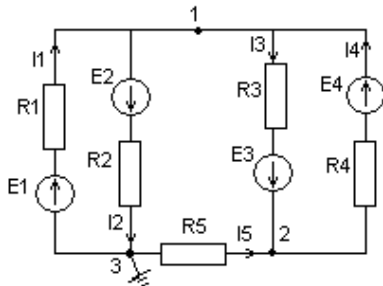


рис.6

Данная схема электрической цепи имеет 5 ветвей, следовательно, расчетом надо найти значения 5-ти токов I_1 - I_5 . По закону Кирхгофа необходимо решить систему из 5-ти уравнений. По методу контурных токов необходимо решить систему из 3-х уравнений, т.к. схема имеет 3 независимых контура.

Если знать потенциалы φ_1 , φ_2 , φ_3 , то токи находятся по закону Ома (обобщенному). Любую узловую точку электрической цепи можно заземлить и считать ее потенциал равным нулю. При этом режим работы цепи не изменяется, т.к. не появляется новых контуров.

Примем $\varphi_3=0$, тогда чтобы определить φ_1 и φ_2 надо составить 2 уравнения, а в общем виде $(n-1)$, где n – число узлов.

Запишем уравнения по 1-му закону Кирхгофа для 1-го и 2-го узла.

$$I_1 + I_4 - I_2 - I_3 = 0 \quad (10)$$

$$I_3 + I_5 - I_4 = 0$$

Выразим токи в ветвях через закон Ома:

$$I_{ab} = \frac{\pm U_{ab} + \sum_1^n E_n}{\sum_1^m R} = \left(\pm U_{ab} + \sum_1^n E_n \right) \cdot \sum_1^m g_m, \text{ где}$$

$$g = \frac{1}{R} \text{ - проводимость}$$

Разность потенциалов берем так, чтобы U совпадало с I .

$$I_1 = [(\varphi_3 - \varphi_1) + E_1] g_1$$

$$I_2 = [(\varphi_1 - \varphi_3) + E_2] g_2$$

$$I_3 = [(\varphi_1 - \varphi_2) + E_3] g_3 \quad (11)$$

$$I_4 = [(\varphi_2 - \varphi_1) + E_4] g_4$$

$$I_5 = (\varphi_3 - \varphi_2) g_5$$

Выражения (2) подставим в (1):

$$\begin{aligned} & \varphi_3^* g_1 - \varphi_1^* g_1 + E_1^* g_1 + \varphi_2^* g_4 - \varphi_1^* g_4 + E_4^* g_4 - \varphi_1^* g_2 + \varphi_3^* g_2 - E_2^* g_2 - \varphi_1^* g_3 + \varphi_2^* g_3 - E_3^* g_3 = 0 \\ & - \varphi_1(g_1 + g_2 + g_3 + g_4) + \varphi_2(g_3 + g_4) = -E_1^* g_1 + E_2^* g_2 + E_3^* g_3 - E_4^* g_4 \end{aligned}$$

Умножим на (-1):

$$\begin{aligned} & \varphi_1(g_1 + g_2 + g_3 + g_4) - \varphi_2(g_3 + g_4) = E_1^* g_1 - E_2^* g_2 - E_3^* g_3 + E_4^* g_4 \\ & \varphi_1^* g_3 - \varphi_2^* g_3 + E_3^* g_3 + \varphi_3^* g_5 - \varphi_2^* g_5 - \varphi_2^* g_4 + \varphi_1^* g_4 - E_4^* g_4 = 0 \\ & - \varphi_2(g_3 + g_4 + g_5) + \varphi_1(g_3 + g_4) = -E_3^* g_3 + E_4^* g_4 \quad (*(-1)) \quad (12) \\ & \varphi_2(g_3 + g_4 + g_5) - \varphi_1(g_3 + g_4) = E_3^* g_3 - E_4^* g_4 \end{aligned}$$

Анализируя структуру выражений (3) можно записать правило нахождения неизвестного потенциала узловой точки: искомый потенциал узловой точки умножается на сумму проводимостей ветвей, сходящихся в данной узловой точке, минус потенциалы соседних узловых точек, умноженные на сумму проводимостей, соединяющих узловые точки, и все это равно алгебраической сумме произведений ЭДС, сходящихся в данной узловой точке на проводимости ветвей, в которых стоят ЭДС. (правило знаков E).

$g_{11} = g_1 + g_2 + \dots + g_n$ - сумма проводимостей, сходящихся в узловой точке 1.

$g_{12}; g_{13} \dots$ - проводимости ветвей, соединяющие узловую точку 1 с другими узловыми точками.

$I_{11} = \sum_{k=1}^n E_k \cdot g_k$ - узловой ток. Если E направлена к узлу, для которого определяется φ , то «+», а если от узла, то «-».

$$\varphi_1^* g_{11} - \varphi_2^* g_{12} - \varphi_3^* g_{13} - \dots - \varphi_n^* g_{1n} = I_{11} \quad (13)$$

Структура выражения (4) аналогична структуре уравнения контурных токов.

4.2 Методика расчета

1. Подготовить схему к расчету

а) обозначить узлы

б) обозначить E и I.

2. Потенциал одной из узловой точки принять равным нулю - $\varphi_i = 0$.

3. Для остальных узловых точек записать уравнения (4).

4. Решив систему уравнений, найти потенциалы узловых точек.

5. Используя обобщенный закон Ома, найти токи в ветвях.

4.3 Метод двух узлов (частный случай метода узловых потенциалов).

Для нахождения токов в схеме на рис.7 необходимо :

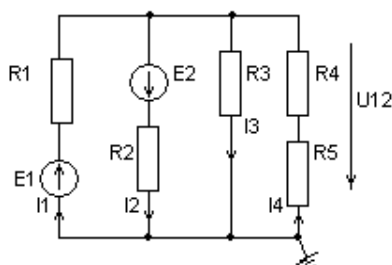


рис.7

Уравнений по законам Кирхгофа – 4;

Уравнений по методу контурных токов – 3;

Уравнений методом узловых потенциалов – 1.

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

На основании выражения (13) запишем:

$$\varphi_1 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4 + R_5} \right) = E_1 \frac{1}{R_1} - E_2 \frac{1}{R_2}$$

$$U = \varphi_1 = \frac{E_1 \cdot g_1 - E_2 \cdot g_2}{g_1 + g_2 + g_3 + g_4}$$

$$\text{В общем виде: } U = \frac{\sum_{n=1}^n E_n \cdot g_n}{\sum_{m=1}^m g_m}$$

Зная U, можно найти токи в ветвях по обобщенному закону Ома.

4.4 Уравнение баланса мощностей.

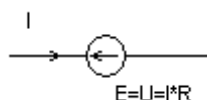
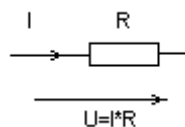
В любой электрической цепи алгебраическая сумма мощностей источников электрической энергии равна арифметической сумме мощностей, которые рассеиваются в активных сопротивлениях цепи.

$$\sum_{n=1}^n E_n I_n = \sum_{m=1}^m I_m^2 R_m \quad (14)$$

Произведение $E_n I_n$ берется с «+», если направления E_n и I_n совпадают, и с «-», если не совпадают.

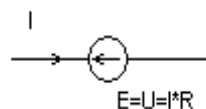
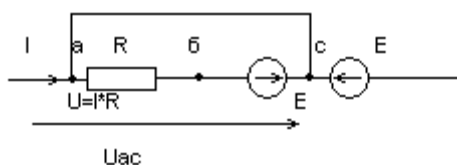
4.5 Теорема о компенсации.

Любой резистивный элемент (активное сопротивление) можно заменить источником E , направление которой встречно I , а величина равна падению U на резистивном элементе.



Доказательство:

Последовательно с K включим две ЭДС, величина которых равна $E = U = IR$



По закону Ома: $I = \frac{U_{ac} + E}{R} \rightarrow$

$$U_{ac} = IR - E = 0, \quad U_{ac} = \varphi_a - \varphi_c \rightarrow \varphi_a = \varphi_c$$

Тогда равнопотенциальные точки можно объединить.

Вопросы для самопроверки.

1. Сформулировать суть метода узловых потенциалов.
2. Изложить методику расчета методом узловых потенциалов.
3. Сформулировать и записать уравнение баланса мощностей.
4. Сформулировать теорему о компенсации.

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 5

Переменный синусоидальный ток. Способы изображения синусоидального тока.

5.1 Переменный синусоидальный электрический ток

Переменный синусоидальный электрический ток – это ток изменяющийся во времени по величине и по направлению по закону синуса.

Особенности синусоидального тока:

- 1) простота и экономичность получения
- 2) простота трансформации.
- 3) простота передачи на дальнем расстоянии
- 4) форма U и I в линейных цепях всегда синусоидальна
- 5) для расчета цепей синусоидального тока существует простая математическая база

5.2 Способы изображения синусоидального тока (напряжения):

1. Аналитический
2. С помощью волновых (временных) диаграмм
3. С помощью векторов на декартовой плоскости
4. С помощью комплексных чисел

Аналитический способ

$$1. u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$$

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$$

u, i - мгновенные значения U и I , т.е. значения в конкретный момент времени;

U_m, I_m - амплитудные или максимальные значения U и I ;

$(\omega t + \psi)$ - фаза колебаний, характеризует состояние колебания, т.е. численное значение в данный момент времени;

1) ω - круговая частота, показывает скорость изменения фазы, в радианах

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f, [\omega] = \frac{\text{рад}}{\text{с}}; \text{ - круговая частота- скорость}$$

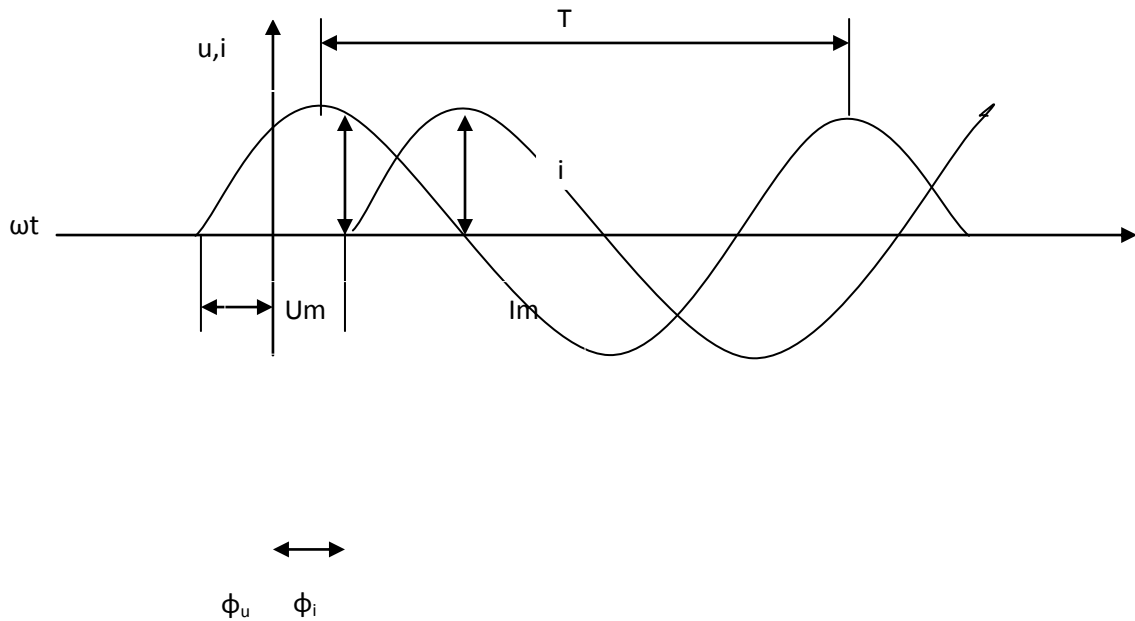
$$2) f = \frac{1}{T} \text{ - циклическая частота, } [f] = \frac{1}{\text{с}} = \text{Гц}$$

3) ψ - начальная фаза, характеризует мгновенные значения U и I в начальный момент времени

В общем случае $\psi_u \neq \psi_i$ и поэтому вводится понятие об угле разности фаз U и I :

$$\varphi = (\omega t + \psi_u) - (\omega t + \psi_i) = \psi_u - \psi_i.$$

2. Временные (волновые) диаграммы – график зависимости U или I относительно времени (t).



$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u) \rightarrow t = 0 \rightarrow u$$

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i) \rightarrow t = 0 \rightarrow -i$$

Если начальная фаза положительна, то синусоида начинается слева от начала координат, а если отрицательна то справа.

3. Вектор это отрезок прямой, длина которого в масштабе соответствует амплитудному или действующему значению E, U, I , а угол относительно исходной оси равен начальной фазе.

$$u = U_m \cdot \sin(\omega t + 45^\circ)$$

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t - 15^\circ)$$

1) выбираем $m_u = B/\text{мм}$; $m_i = A/\text{мм}$;

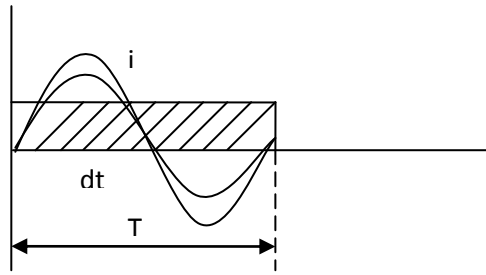
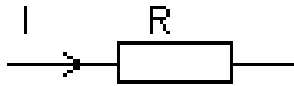
2) Определяем $\ell_{U_m} = \frac{U_m}{m_u}$; $\ell_{I_m} = \frac{I_m}{m_i}$;

Совокупность векторов на плоскости называется векторной диаграммой.

Угол разности фаз - φ на векторных диаграммах отсчитывается от вектора тока к вектору напряжения.

5.3 Действующее значение синусоидального тока.

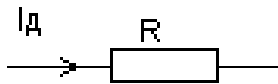
Задан переменный периодический ток, который протекает по активному сопротивлению.



По закону Джоуля-Ленца в R будет выделяться теплота. За период T выделится $Q_{пер. дж.}$ теплоты:

$$Q_{пер} = \int_0^T i^2 \cdot R \cdot dt$$

Пропустим по активному сопротивлению R постоянный ток:



По закону Джоуля-Ленца:

$$Q_{пост} = I^2 \cdot R \cdot T \text{ - за время равное одному периоду периодического тока;}$$

Величину постоянного тока выбирают такой, чтобы выполнялось равенство:

$$Q_{пост} = Q_{пер} \text{ или}$$

$$I^2 \cdot T = \int_0^T i^2 \cdot dt$$

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

Под действующим значением периодического тока понимается значение постоянного тока, при котором постоянный ток за время T в таком же активном сопротивлении R выделит столько же теплоты, что и периодический ток.

Действующее значение периодического тока определяется как среднеквадратическое значение тока за период.

Если ток синусоидальный, то:

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \cdot \sin^2(\omega t + \psi_i) dt}, \text{ рассмотрим подкоренное выражение:}$$

$$(\sin^2 \alpha = \frac{1 - \cos 2\alpha}{2})$$

$$\frac{I_m^2}{T} \int_0^T \frac{1 - \cos(2\omega t + 2\psi_i)}{2} dt = \frac{I_m^2}{2T} t \Big|_0^T - \int_0^T \cos(2\omega t + 2\psi_i) dt = \frac{I_m^2}{2};$$

$$\int_0^T \cos(2\omega t + 2\psi_i) dt = 0;$$

$$I = \sqrt{\frac{I_m^2}{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = 0.707 I_m.$$

Вопросы для самоконтроля.

1. Какой электрический ток называется переменным синусоидальным?
2. Способы изображения переменного синусоидального тока.
3. Что такое вектор?
4. Сформулировать закон Джоуля-Ленца.
5. Что понимается под действующим значением переменного синусоидального тока?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А. М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 6.

Изображение синусоидальных величин с помощью комплексных чисел.

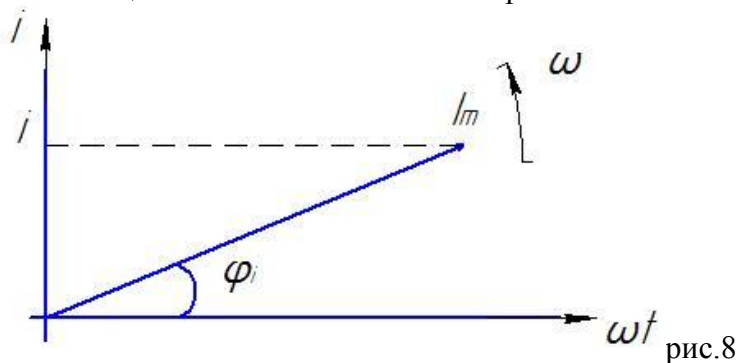
Комплексная амплитуда.

6.1 Изображение синусоидально изменяющейся величины с помощью вращающегося вектора.

Задан синусоидально изменяющийся ток

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

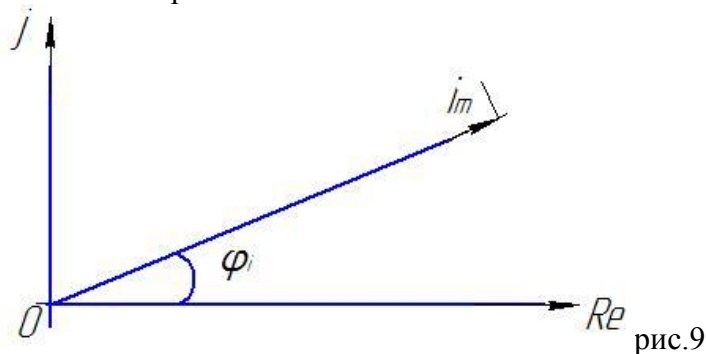
Проекция на вертикальную ось вектора I_m вращающегося против часовой стрелки с угловой скоростью ω является мгновенным током. Следовательно, синусоидально изменяющиеся величины можно изображать такими векторами (рис.8).



6.2 Изображение синусоидально изменяющейся величины на комплексной плоскости.

Графическое изображение синусоидальных величин наглядно и позволяет заменить операции с тригонометрическими функциями на операции с отрезками. Но при этом возникают значительные погрешности и необходимо выполнять громоздкие графические построения.

Чтобы избавиться от этих недостатков, изобразим амплитуду I_m на комплексной плоскости - рис.9:



Где: Re – ось действительных чисел, j – ось мнимальных чисел ($j = \sqrt{-1}$), I_m – комплексная амплитуда.

Начальное положение комплексной амплитуды I_m на комплексной плоскости определяется начальной фазой ψ_i и может быть записано так:

$$I_m = I_m e^{j\psi_i}$$

Где: I_m – амплитуда синусоидального тока; $e^{j\psi_i}$ – оператор поворота.

Умножение на оператор поворота $e^{j\psi_i}$ не изменяет величины I_m .

Чтобы изобразить аналитически синусоидальный ток на комплексной плоскости необходимо его комплексную амплитуду I_m умножить на оператор вращения $e^{j\omega t}$ и от полученного комплексного числа взять мнимую часть:

$$i = J_m (I_m e^{j\omega t}) = J_m [I_m e^{j(\omega t + \psi_i)}] = J_m [I_m \cos(\omega t + \psi_i) + j I_m \sin(\omega t + \psi_i)] = \sin(\omega t + \psi_i)$$

Пример:

Задан ток: $i = 10 \sin(314t + \frac{\pi}{3})$ А.

Комплексная амплитуда тока будет равна: $I_m = 10 e^{j\frac{\pi}{3}}$ А.

6.3 Нахождение мгновенных значений токов (напряжений) по комплексной амплитуде.

Комплексная амплитуда тока равна $I_m = 200 e^{-j\frac{\pi}{4}}$ А, а его угловая частота $\omega = 628 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$. Тогда мгновенное значение i тока равно:

$$i = J_m (I_m e^{j\omega t}) = J_m (200 e^{-j\frac{\pi}{4}} e^{j628t}) = J_m [200 \cos(628t - \frac{\pi}{4}) + j 200 \sin(628t - \frac{\pi}{4})] = 200 \sin(628t - \frac{\pi}{4}) \text{ А}$$

Расчеты в цепях переменного синусоидального тока чаще всего ведутся в действующих значениях синусоидальных величин. Чтобы записать комплекс действующего значения синусоидального тока необходимо его комплексную амплитуду разделить на $\sqrt{2}$:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_i} = I e^{j\psi_i}$$

В цепях постоянного тока было два идеализированных элемента: Е и R. В цепях переменного тока мы сталкиваемся с новым физическими явлениями: переменными магнитными полями, самоиндукцией, взаимной индукцией, переменные электрические поля.

6.4 Элементы цепи переменного тока.

Кроме источников Е и R, которые входили в цепи постоянного тока, в цепях переменного тока вводятся еще ряд пассивных идеальных элементов: индуктивный элемент, параметром индуктивности которого является L и который учитывает наличие переменных магнитных полей; емкостный элемент, параметром которого является емкость С и который учитывает наличие переменных электрических полей; и взаимная индуктивность, параметром которой является М.

Вопросы для самопроверки.

1. Как с помощью вращающегося вектора изобразить синусоидально изменяющуюся величину?
2. Что такое оператор поворота?
3. Как записывается комплексная амплитуда синусоидально изменяющейся величины?
4. Как с помощью комплексных чисел записать синусоидально изменяющийся ток?
5. Какие новые элементы появляются в цепи переменного тока?

Список литературы.

Основная 1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная . Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г 2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 7

Свойства элементов цепи переменного синусоидального тока.

7.1 Активное сопротивление в цепи переменного синусоидального тока.

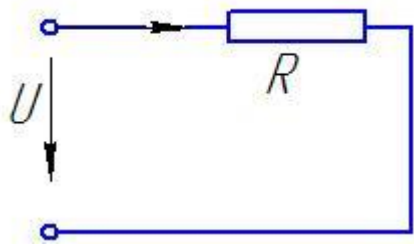


рис.10

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i)$$

По закону Ома:

$$u = i \cdot R = R \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$$

начальная фаза i и u одинаковы $\psi_i = \psi_u$

$$\varphi = (\omega t + \psi_i) - (\omega t + \psi_u) = 0.$$

В активном сопротивлении i и u совпадают по фазе.

Запишем комплексную амплитуду тока:

$$\dot{I}_m = I_m \cdot e^{j\psi_i}$$

или для действующего значения: $\dot{I} = I \cdot e^{j\psi_i}$

$$\dot{U}_m = U_m \cdot e^{j\psi_u} \text{ или } \dot{U} = U \cdot e^{j\psi_u} : \psi_i = \psi_u.$$

7.2 Индуктивный элемент в цепи переменного синусоидального тока. Индуктивный элемент с

индуктивностью L учитывает энергию магнитного поля $\frac{Li^2}{2}$ и явление самоиндукции.

Явление наведения Э.Д.С. в проводящем контуре при изменении тока в этом же контуре называется самоиндукцией.

При изменении тока в индуктивности возникает ЭДС самоиндукции e_L . По закону Ленца она препятствует изменению тока и равна:

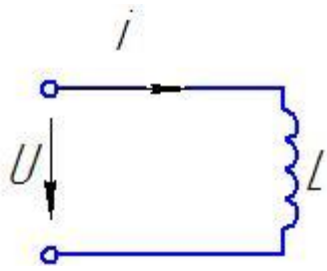


рис.11

$$e_L = -L \frac{di}{dt}.$$

$$i = I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i).$$

По 2-ому закону Кирхгофа:

$$u = -e_L = L \frac{di}{dt} = \underbrace{L\omega}_{x_L} I_m \cdot \cos(\omega t + \psi_i) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u);$$

Где: $\varphi = \psi_u - \psi_i = 90^\circ$;

$$x_L = \omega \cdot L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

x_L – реактивное индуктивное сопротивление. В индуктивности U опережает I на 90° .

Отметим, что e^{j90° равно:

$$e^{j90^\circ} = \cos 90^\circ + j \sin 90^\circ = j$$

Рассмотрим производную: $\frac{di}{dt} = \omega \cdot I_m \cdot \cos(\omega t + \psi_i) = \omega \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i + 90^\circ)$. Если

производную $\frac{di}{dt}$ изобразить комплексным числом, то получим:

$$\omega \cdot \underbrace{I_m \cdot e^{j\psi_i}}_{\dot{I}_m} \cdot \underbrace{e^{j90^\circ}}_j = j \cdot \omega \cdot \dot{I}_m;$$

Если синусоидальная функция изображена комплексным числом, то изображение производной этой функции находится умножением комплексной амплитуды синусоидальной функции, на $j\omega$. Таким образом, при переходе от гармонической функции к комплексной заменяем операцию дифференцирования на умножение на $j\omega$.

7.3 Емкостный элемент в цепи переменного синусоидального тока.

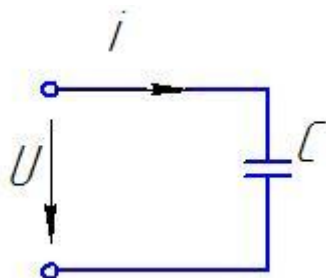


рис.12

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

$$q = C \cdot u;$$

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du}{dt};$$

$$u = \frac{1}{C} \int i \cdot dt = \frac{1}{\omega \cdot C} \cdot I_m [-\cos(\omega t + \psi_i)] = x_C \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u);$$

$$\frac{1}{\omega \cdot C} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} - \text{реактивное емкостное сопротивление.}$$

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -90^\circ.$$

В емкостном элементе U отстает от I на 90° .

Отметим, что $e^{-j90^\circ} = \frac{1}{j}$

Рассмотрим интеграл: $\int i \cdot dt = \frac{I_m}{\omega} \cdot \sin(\omega t + \psi_i - 90^\circ)$. Если интеграл $\int i \cdot dt$ изобразить комплексным числом, то получим:

$$\frac{1}{\omega} \cdot \underbrace{I_m \cdot e^{j\psi_i}}_{\dot{I}_m} \cdot \underbrace{e^{-j90^\circ}}_{\frac{1}{j}} = \frac{\dot{I}_m}{j \cdot \omega}.$$

Таким образом, при переходе от гармонической функции к комплексной операция интегрирования заменяется на деление на $j\omega$.

Вопросы для самопроверки.

1. Свойства активного сопротивления в цепи переменного синусоидального тока.
 2. Свойства индуктивного элемента в цепи переменного синусоидального тока.
 3. Свойства емкостного элемента в цепи переменного синусоидального тока.
 4. При переходе к изображению гармонической функции комплексным числом, какими действиями заменяются действия дифференцирования и интегрирования?
- Список литературы

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.:

Энергия, 2007г

2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 8

Схемы замещения пассивного двухполюсника.

Z - комплексное входное сопротивление пассивного двухполюсника.

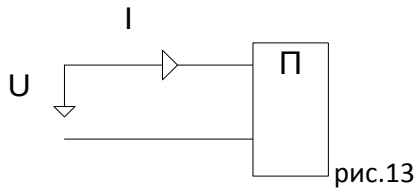


рис.13

8.1 Последовательная схема замещения.

$$I = \frac{U}{Z} \quad U = I * Z = IR + jIx = Ua + Up$$

По 2 закону Кирхгофа $U = Ua + Up$

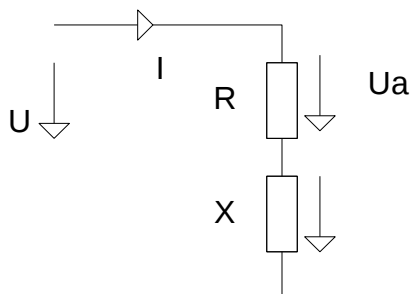


рис.14

8.2 Параллельная схема замещения.

Комплексная входная проводимость пассивного двухполюсника $Y = \frac{1}{Z} = \frac{1}{R+jx} = \frac{R-jx}{R^2+x^2} = \frac{R}{R^2+x^2} - j \frac{x}{R^2+x^2} = g - jb$, где

$$g = \frac{R}{R^2+x^2} \quad b = \frac{x}{R^2+x^2}$$

$$I = UY = U(g - jb) = Ug - jUb = Ia + Ip$$

По 1 закону Кирхгофа $I = Ia + Ip$

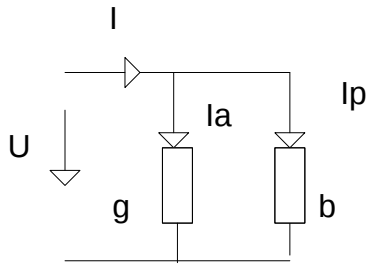


Рис.15

Любой пассивный двухполюсник можно представить двумя эквивалентными схемами замещения:

А) последовательной

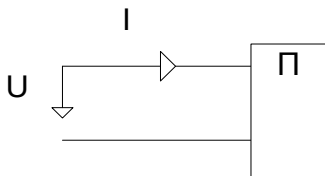
Б) параллельной.

8.3 Мгновенная мощность в цепи переменного синусоидального тока.

Работа, совершаемая источником электрической энергии по перемещению заряда dq по направлению мгновенного напряжения и через пассивный двухполюсник равна:

$$\partial A = U \partial q, p = \frac{\partial A}{\partial t} = U \frac{\partial q}{\partial t} = UI \quad \text{тогда мгновенная мощность равна:}$$

$p = UI$ мгновенная мощность равна произведению мгновенного напряжения на мгновенный ток.



Напряжение и ток на входе пассивного двухполюсника в общем случае сдвинуты по фазе на угол ϕ .

Примем:

$$\text{Тогда } \phi = \psi_u - \psi_i = \psi_i * u * i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$$

$$p = UI = U_m \sin(\omega t - \phi) = \frac{U_m I_m}{2} (\cos \phi - \cos(2\omega t - \phi)) = UI \cos \phi - UI \cos(2\omega t - \phi)$$

Мгновенная мощность имеет постоянную составляющую и гармоническую составляющую $U * I) \cos(2\omega t - \phi)$, частота которой в 2 раза больше частоты напряжения и тока.

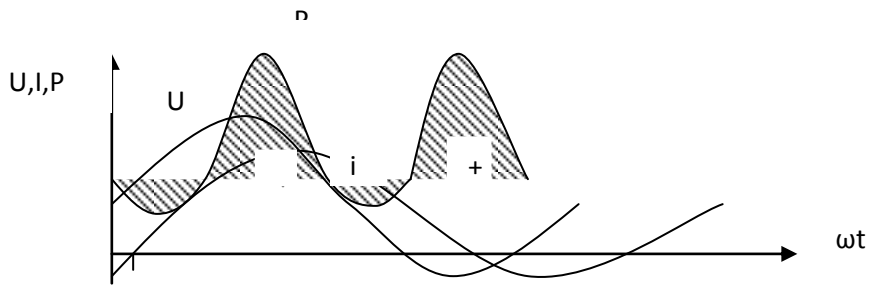


Рис.16

Когда U и i имеют одинаковые знаки, $p > 0$ и при этом двухполюсник получает энергию от источника.

Когда U и i имеют разные знаки, $p < 0$ и при этом энергия возвращается из двухполюсника в источник. Такой возврат энергии возможен, если энергия периодически запасается в магнитных и электрических полях реактивных элементов (L и C), входящих в состав двухполюсника.

Если в двухполюснике отсутствуют реактивные элементы (L и C), то $\phi = 0$ и нет таких моментов времени, когда энергия возвращалась бы из двухполюсника в источник.

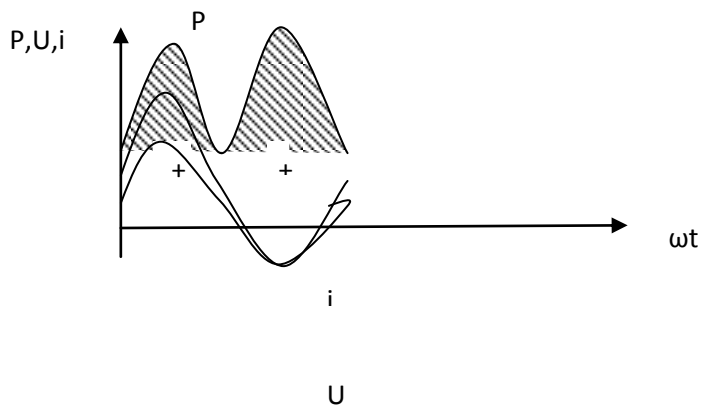


Рис.17

8.4 Активная мощность.

Среднее значение мгновенной мощности за период определяет активную мощность:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p \, dt = \frac{1}{T} \int_0^T UI \cos \varphi \, dt - \frac{1}{T} \int_0^T UI \cos(2\omega t - \varphi) \, dt = UI \cos \varphi$$

$$p = UI \cos \varphi, \quad [p] = \text{Вт}$$

8.5 Реактивная мощность.

При расчетах электрических цепей находит применение так называемая реактивная мощность:

$$Q = UI \sin \varphi; \quad [Q] = \text{вар}$$

Q имеет индуктивный характер, т.е. положительна при отстающем токе ($\varphi > 0$) и емкостный характер, т.е. отрицательна при опережающем токе ($\varphi < 0$).

Q - Характеризует интенсивность обмена энергией между источником и пассивным двухполюсником, содержащем индуктивности или емкости.

8.6 Полная мощность

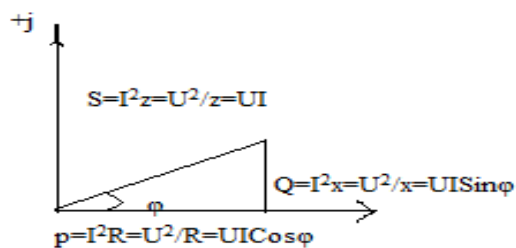
.

Под полной мощностью понимается максимальная активная мощность, которая может быть получена при заданных действующих величинах напряжения и тока:

$$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad [S] = \text{В.А}$$

Треугольник мощностей.

Изобразим полную мощность на комплексной плоскости.



8.7 Полная комплексная мощность.

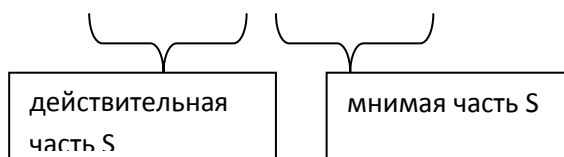
Активная и реактивная мощности могут быть найдены, если известны комплекс U и I . Для этого необходимо комплекс напряжения U умножить на сопряженный комплекс ток I - это произведение называется комплексной мощностью S :

Дано:

$$\dot{U} = U e^{j\psi_u}, I = \dot{I} e^{j\psi_i}$$

$$\dot{S} = \dot{U} \dot{I} = U e^{j\psi_u} * I e^{-j\psi_i} = UI e^{j(\psi_u - \psi_i)} = UI e^{j\varphi} = UI \cos \varphi + j UI \sin \varphi = p + jQ$$

Таким образом: $p = \operatorname{Re}[S], Q = \operatorname{Im}[S]$



Вопросы для самопроверки.

1. Какими схемами замещения может быть представлен пассивный двухполюсник?
2. Какие составляющие имеет мгновенная мощность?
3. Чему равна активная мощность в цепи переменного синусоидального тока?
4. Что понимается под полной мощностью?
5. Как рассчитывается полная комплексная мощность?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 9

Трехфазные цепи.

9.1 Понятие «трехфазная цепь».

Под трехфазной цепью понимается совокупность трех электрических цепей, называемых фазами, в которых действует симметричная трехфазная система ЭДС.

Фаза – это электрическая цепь, содержащая источник электрической энергии, нагрузку и соединительные провода.

Трехфазной симметричной синусоидальной системой ЭДС называется система состоящая из трех ЭДС, имеющих одинаковую амплитуду и частоту, изменяющихся по закону синуса, сдвинутых относительно друг друга на 120° во времени и генерируемых в одном источнике электрической энергии.

9.2 Получение трехфазной симметричной синусоидальной системы ЭДС.

Трехфазная симметричная синусоидальная система ЭДС генерируется в синхронном генераторе.

$W_A = W_B = W_C$ – число витков в фазе статорной обмотки синхронного генератора(СГ).

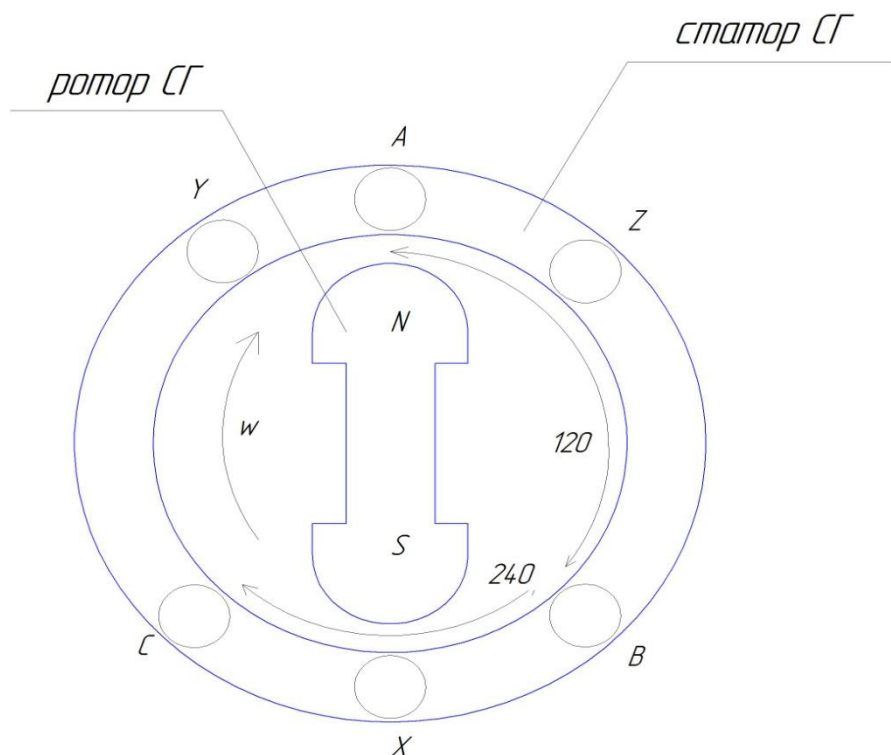


рис. 9.1 Схема синхронного генератора

Отметим, что пространственное смещение осей фаз на 120° геометрических градусов в пространстве приводит к смещению на 120° ЭДС во времени.

9.3 Формы представления трехфазной симметричной синусоидальной системы ЭДС.

- 1) Аналитическая форма представления трехфазной симметричной синусоидальной системы ЭДС:

$$e_A = E_m * \sin(\omega t + \varphi)$$

$$e_B = E_m * \sin(\omega t + \varphi - 120^\circ)$$

$$e_C = E_m * \sin(\omega t + \varphi - 240^\circ)$$

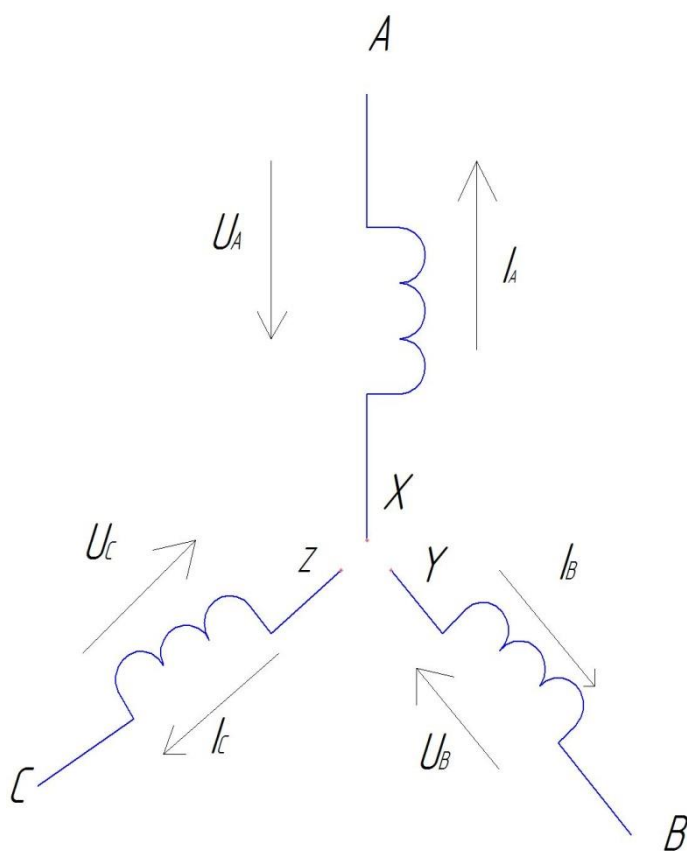


Рис. 9.2 Положительные направления напряжения.

- 2) Волновые диаграммы

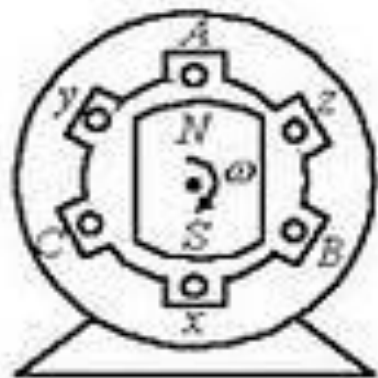


Рис.1

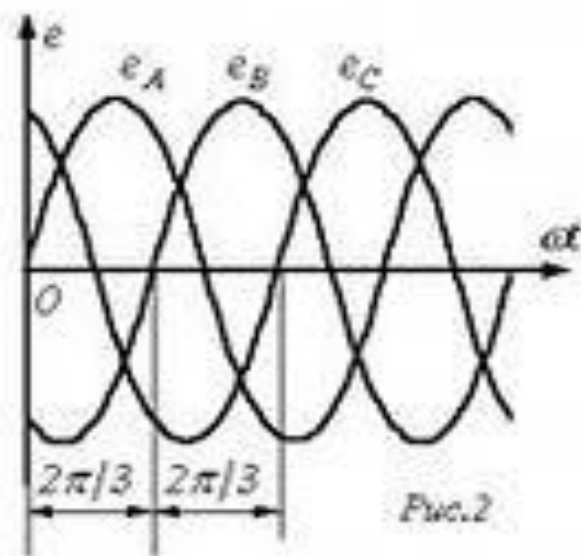
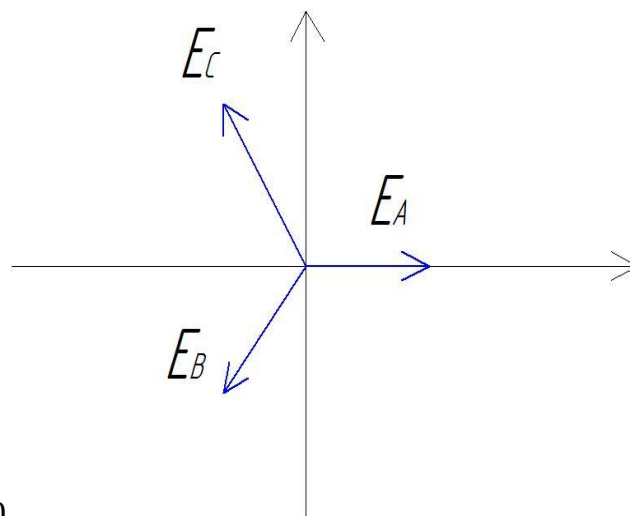


Рис.2

Рис.9.3 Волновые диаграммы

3) Векторная диаграмма

Система прямой последовательности



$$E_A + E_B + E_C = 0$$

Рис. 9.4 Векторная диаграмма

4) Комплексные амплитуды

$$E_{ma} = E_m e^{j\varphi}$$

$$E_{mB} = E_m e^{j(\varphi - 120^\circ)}$$

$$E_{mC} = E_m e^{j(\varphi - 240^\circ)}$$

9.4 Схема соединения фаз генератора.

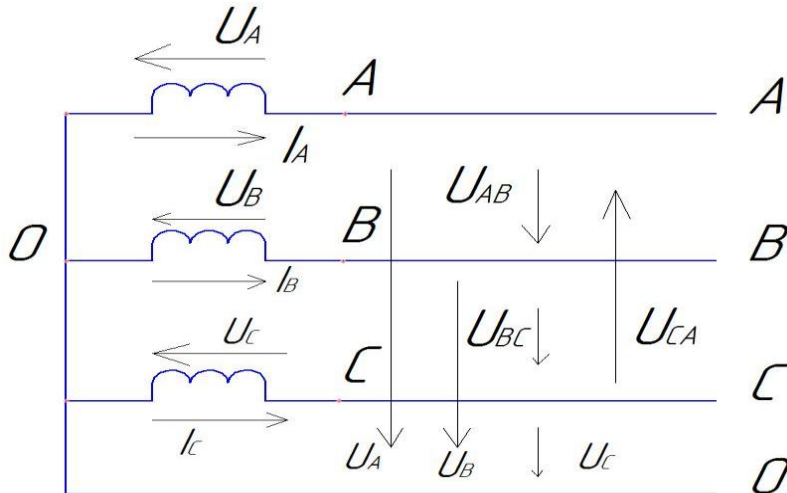


Рис. 9.5 Соединение звездой

Напряжение между началом и концом каждой фазы генератора – фазные напряжения U_A , U_B , U_C

Напряжение между линейными проводами (началами фаз) – линейные напряжения U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} .

9.5 Связь между фазным и линейным напряжением.

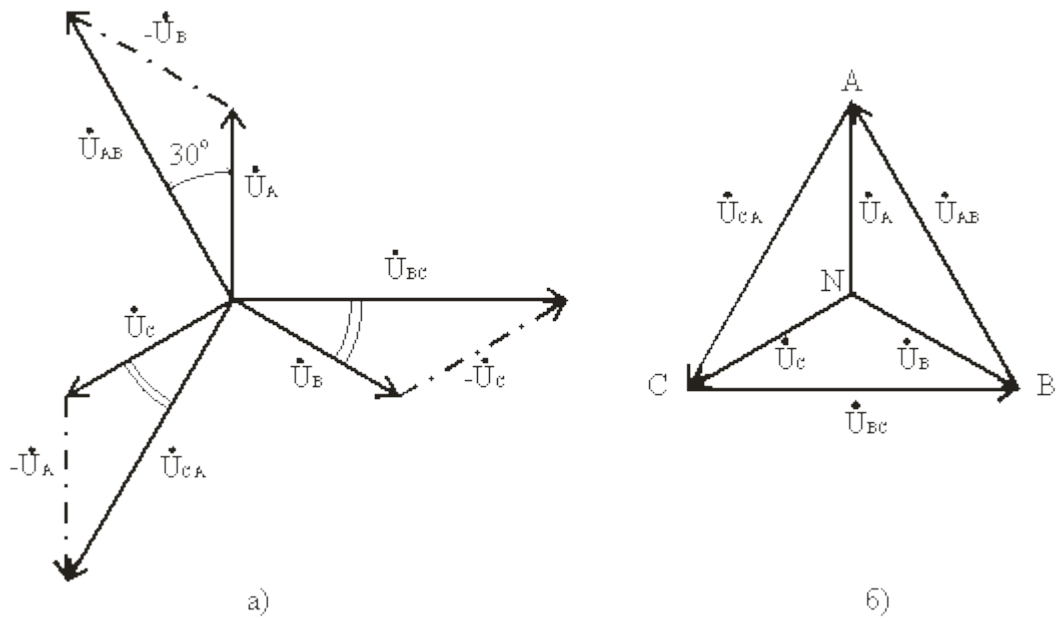


Рис. 9.6 Линейные и фазные напряжения

По 2-му закону Кирхгофа имеем:

$$U_A - U_B - U_C = 0$$

$$U_{AB} = U_A - U_B$$

Любое линейное напряжение равно геометрической разности соответствующих фазных напряжений. Эта связь справедлива для симметричных и несимметричных цепей.

Фазные напряжения U_B и U_C можно получить, если фазное напряжение U_A повернуть против часовой стрелки на 240° и 120° .

Введем понятие оператора трехфазной системы:

$$\alpha = e^{j120^\circ}$$

$$U_B = U_A \alpha^2$$

$$U_C = U_A \alpha$$

Вопросы для самопроверки

1. Что понимается под трехфазной цепью?
2. Какая система ЭДС называется трехфазной, симметричной, синусоидальной?
3. Какое напряжение называется фазным?
4. Какое напряжение называется линейным?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 10

Симметричные и несимметричные трехфазные цепи.

10.1 Симметричная цепь.

Трехфазная цепь, содержащая симметричную нагрузку, будет симметричной. Под симметричной нагрузкой, понимают такую нагрузку, у которой комплексные сопротивления трех фаз равны:

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z}e^{j\psi}$$

Если равны модули комплексных сопротивлений фаз, то нагрузка называется равномерной, т.е. $Z_A = Z_B = Z_C$

Расчет симметричной трехфазной нагрузки при соединении в звезду.

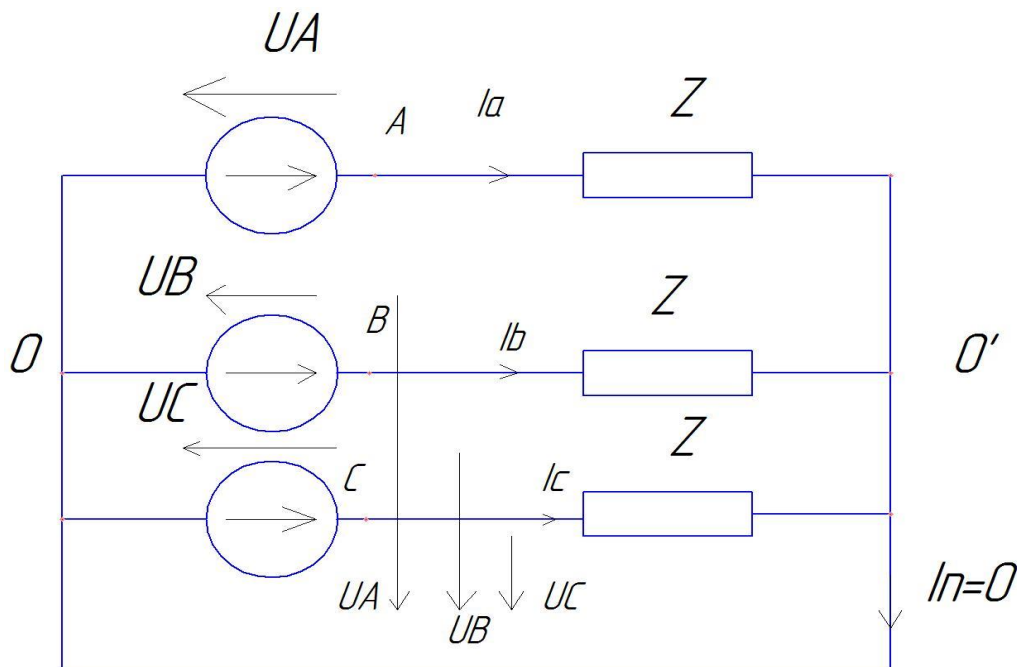


Рис. 10.1 схема симметричной цепи

При симметричной нагрузке расчет можно выполнять на одну фазу.

Методика расчета.

1. По закону Ома находим ток фазы А:

$$\dot{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{\underline{Z}_A}$$

2. Так как нагрузка симметрична, находим токи фаз В и С с помощью оператора трехфазной системы:
3. Ток нулевого провода по первому закону Кирхгофа равен:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$$

Следовательно, $\varphi_0 = \overline{\varphi}_0$ и нулевой провод необязателен.

10.2 Расчет трехфазной несимметричной цепи при соединении в звезду при $Z_N = 0$

$Z_N = 0$ – сопротивление нулевого провода

Так как $Z_N = 0$, то $\varphi_0 = \varphi'_0 U_N = \varphi_0 - \varphi'_0 = 0$

Используя 2-ой закон Кирхгофа выразим фазные напряжения на нагрузке через фазные напряжения источника и напряжение U_N :

$$\dot{U}'_A = \dot{U}'_A - \dot{U}_N = \dot{U}_A$$

$$\dot{U}'_B = \dot{U}'_B - \dot{U}_N = \dot{U}_B$$

$$\dot{U}'_C = \dot{U}'_C - \dot{U}_N = \dot{U}_C$$

Методика расчета

По закону Ома рассчитываем ток в фазах

$$1. \quad \dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_A}$$

$$2. \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{\underline{Z}_B} = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_B} \alpha^2$$

$$3. \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{\underline{Z}_C} = \frac{\dot{U}_A}{\underline{Z}_C}$$

4. по 1-му закону Кирхгофа находим I_N :

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

10.3 Расчет несимметричной цепи трехфазной сети при $Z_N \neq 0$

Т.к. $Z_N \neq 0$, то $\varphi_0 \neq \varphi'_0$, т.е. $\dot{U}_N = \varphi'_0 - \varphi_0 \neq 0$. В нулевом проводе возникает напряжение $\dot{U}_N = \varphi'_0 - \varphi_0 = \dot{I}_N \underline{Z}_N$. следовательно, потенциалы нулевых точек будут отличаться на величину падения напряжения в нулевом проводе:

$\varphi'_0 = \varphi_0 + \dot{U}_N$. В этом случае говорят о смещении нейтрали, а напряжение $\dot{U}_N$ называют напряжением смещения.

Методика расчета:

1. фазные $\dot{U}_N$ нагрузки:

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

2. По методу 2-х узлов определяем $\dot{U}_N$:

$$\dot{U}_N = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C + \underline{Y}_N}; \quad \underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$$

3. По закону Ома находим токи:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}'_A}{\underline{Z}_A} = \frac{\dot{U}_A - \dot{U}_N}{\underline{Z}_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}'_B}{\underline{Z}_B} = \frac{\dot{U}_B - \dot{U}_N}{\underline{Z}_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}'_C}{\underline{Z}_C} = \frac{\dot{U}_C - \dot{U}_N}{\underline{Z}_C};$$

4. По 1-му закону Кирхгофа находим I_N :

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

Нулевой провод симметрирует фазные напряжения потребителя. Обрыв нулевого провода считается аварийным режимом, поэтому в нулевой провод запрещается ставить предохранители и какие-либо коммутирующие устройства.

Вопросы для самопроверки.

1. Какая трехфазная цепь называется симметричной?
2. На основании, какого закона находят ток нулевого провода?
3. Как выразить фазные напряжения потребителя через фазные напряжения источника?
4. Какова роль нулевого провода в трехфазной цепи?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 11

Расчет трехфазных цепей при соединении в треугольник

11.1 Расчет симметричного треугольника.

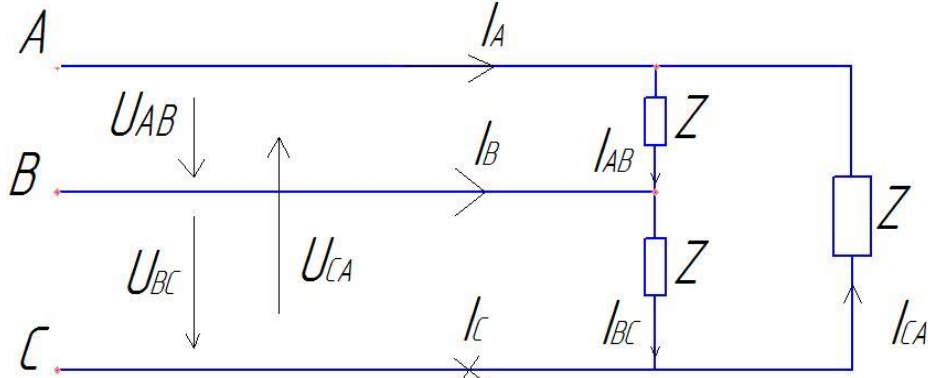


Рис. 11.1 схема симметричного треугольника

В симметричной цепи расчет выполняется на одну фазу, а далее используется оператор трехфазной системы.

Методика расчета:

1. По закону Ома находим фазный ток одной фазы

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}}, \text{ а затем } \dot{I}_B = \dot{I}_{AB}\alpha^2; \dot{I}_{CA} = \dot{I}_{AB}\alpha$$
2. По 1-му закону Кирхгофа находим линейный ток

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

Линейный ток в треугольнике равен разности соответствующих фазных токов. В симметричном треугольнике линейный ток можно найти через фазный по формуле:

$$\dot{I}_A = \sqrt{3}\dot{I}_{AB}e^{-j30}$$

Токи $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$ найдем через операторы трехфазной системы:

$$\dot{I}_B = \dot{I}_A\alpha^2; \dot{I}_C = \dot{I}_A\alpha$$

11.2 Расчет несимметричного треугольника

$$\underline{Z}_{AB} \neq \underline{Z}_{BC} \neq \underline{Z}_{CA}$$

1. По закону Ома определяем фазные токи

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}; \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}$$
2. По 1-му закону Кирхгофа определяем линейные токи:

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

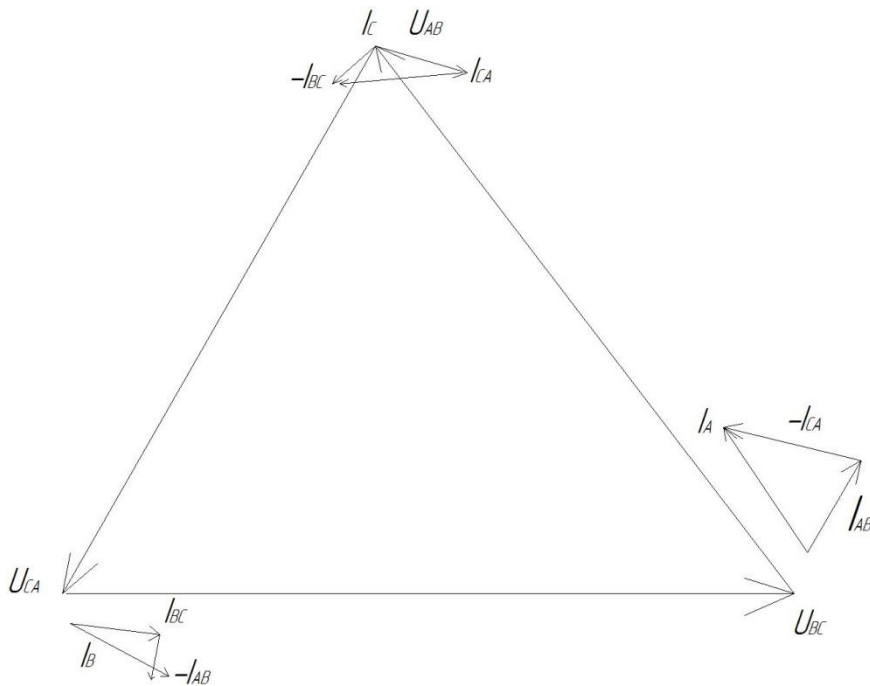


Рис. 11.2 Векторная диаграмма симметричного треугольника

10.3 Мощность в трехфазных цепях

1. Мгновенная мощность симметричной цепи:

$$i_A = I_m \sin \omega t; U_A = U_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t - 120^\circ); U_B = U_m \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)$$

$$i_C = I_m \sin(\omega t + 120^\circ); U_C = U_m \sin(\omega t + \varphi + 120^\circ)$$

$$\sin \alpha \sin \beta = \frac{1}{2} [\cos(\alpha - \beta) - \cos(\alpha + \beta)]$$

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A i_A + U_B i_B + U_C i_C = 3 I_\phi U_\phi \cos \varphi = 3 f_\phi$$

Мгновенная мощность в симметричной трехфазной цепи величина постоянная и равная утроенной активной мощности одной фазы

2. Активная мощность

- 2.1 симметричная цепь

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi dt = 3 U_\phi I_\phi \cos \varphi$$

$$\text{"Y"} - U_L = \sqrt{3} U_\phi; I_L = I_\phi$$

$$\text{"Δ"} - U_L = U_\phi; I_L = \sqrt{3} I_\phi$$

$$P = 3 U_L I_L \cos \varphi$$

- 2.2 несимметричная цепь

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T (P_A + P_B + P_C) dt = P_A + P_B + P_C$$

$$= U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

3. реактивная мощность

- 3.1 симметричная цепь

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = 3 U_\phi I_\phi \sin \varphi_\phi = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi_\phi$$

- 3.2 несимметричная цепь:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C$$

4. полная комплексная мощность

$$\tilde{S} = \tilde{S}_A + \tilde{S}_B + \tilde{S}_C = \dot{U}_A I_A^* + \dot{U}_B I_B^* + \dot{U}_C I_C^*; P = \operatorname{Re}[\tilde{S}]; Q = \operatorname{Im}[\tilde{S}]$$

ток I^* сопряженный с током $\dot{I}$.

Вопросы для самопроверки.

1. Как потребителей соединить в схему треугольник?
2. Как выразить линейный ток через фазные токи в схеме треугольник?
3. Чему равна активная и реактивная мощности в трехфазной цепи?
4. Как рассчитать полную комплексную мощность?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 12

Метод симметричных составляющих.

12.1 Общие положения о методе симметричных составляющих.

Для анализа и расчетов несимметричных режимов в трехфазных цепях широко применяется метод симметричных составляющих. Он основан на представлении любой трехфазной симметричной системы величин (токов, напряжений, магнитных потоков) в виде суммы в общем случае трех симметричных величин.

Выясним, сколько симметричных систем может быть в трехфазной системе. Условиями симметричных систем векторов являются:

- 1) Равенство модулей всех векторов;
- 2) Равные углы сдвига между векторами.

Угол сдвига между векторами в симметричной системе определяется по выражению:

$$\varphi_m = \frac{360^\circ}{m} k$$

Где, $m=3$ – число фаз

$K=0,1,2,3$ и т.д.

$$1) K=0 \rightarrow \varphi_m = \frac{360^\circ}{m} 0 = 0$$

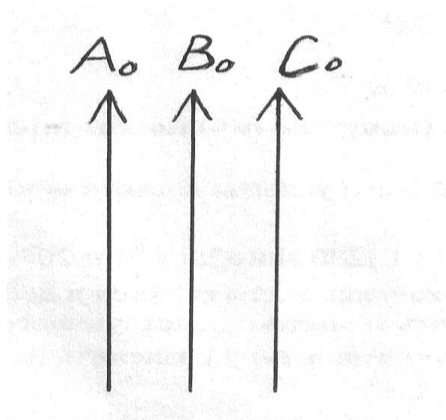


рис. 12.1 система векторов нулевой последовательности.

$$2) K=1 \rightarrow \varphi_m = \frac{360^\circ}{3} 1 = 120^\circ$$

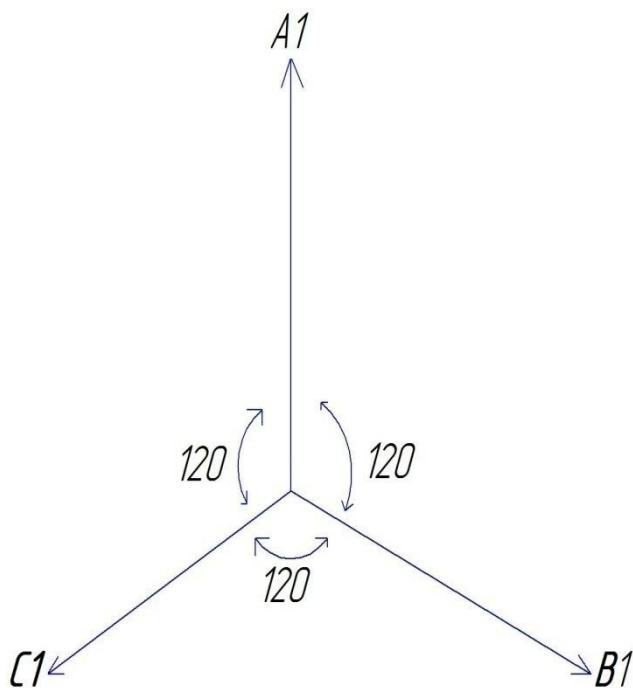


Рис. 12.2 система векторов прямой последовательности

3) $K=2 \rightarrow \varphi_m = \frac{360^\circ}{3} 2 = 240^\circ$

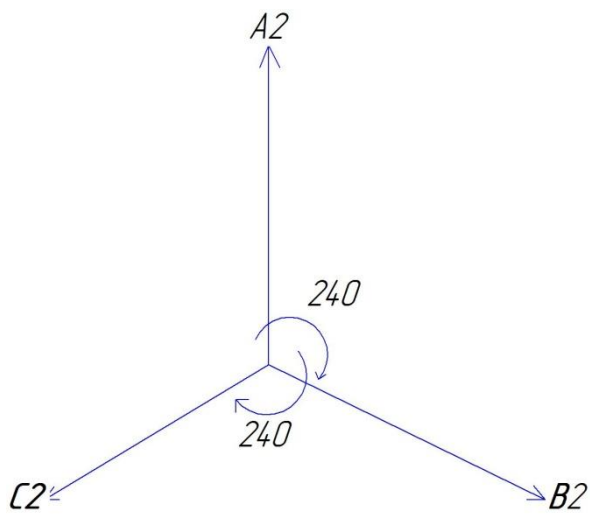
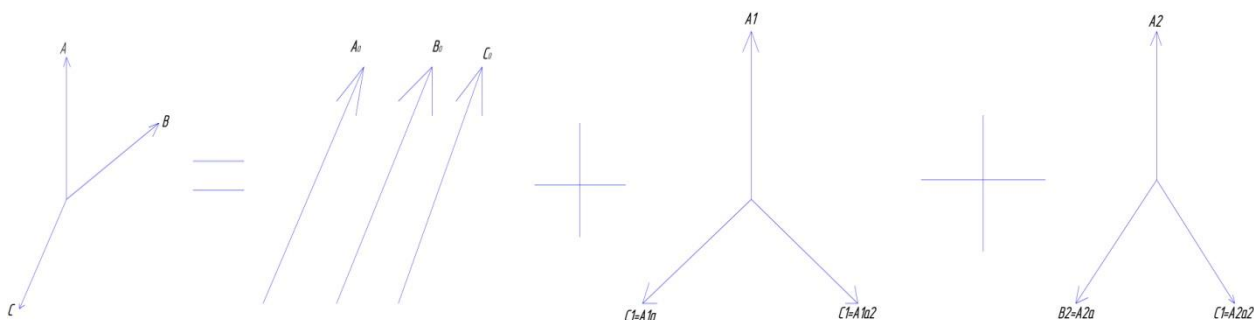


рис. 12.3 система векторов обратной последовательности

При дальнейшем переборе $k(3,4,5$ и т.д.) будут повторяться системы $0,1,2$. Таким образом, любая трехфазная несимметричная система векторов может быть представлена как сумма трех симметричных систем – нулевой, прямой и обратной последовательностей.



Докажем это. Если это возможно, то можно записать:

$$\dot{A} = \dot{A}_0 + \dot{A}_1 + \dot{A}_2$$

$$\dot{B} = \dot{B}_0 + \dot{B}_1 + \dot{B}_2$$

$$\dot{C} = \dot{C}_0 + \dot{C}_1 + \dot{C}_2$$

Перепишем полученные уравнения, используя оператор α :

$$\dot{A} = \dot{A}_0 + \dot{A}_1 + \dot{A}_2$$

$$\dot{B} = \dot{A}_0 + \dot{A}_1\alpha^2 + \dot{A}_2\alpha$$

$$\dot{C} = \dot{A}_0 + \dot{A}_1\alpha + \dot{A}_2\alpha^2$$

Из полученных уравнений можно однозначно определить векторы $\dot{A}_0$; $\dot{A}_1$; $\dot{A}_2$

12.2 Расчетные выражения для нахождения симметричных составляющих.

Предварительно отметим, что сумма единичных векторов $1, \alpha, \alpha^2$ равна 0 т.е.

$$1 + \alpha + \alpha^2 = 0$$

Кроме этого: $\alpha^3 = e^{j120^\circ \cdot 3} = 1$; $\alpha^4 = \alpha^3\alpha = \alpha$

1. Нулевая последовательность

$$\dot{A} = \dot{A}_0 + \dot{A}_1 + \dot{A}_2$$

$$\dot{B} = \dot{A}_0 + \dot{A}_1\alpha^2 + \dot{A}_2\alpha$$

$$\dot{C} = \dot{A}_0 + \dot{A}_1\alpha + \dot{A}_2\alpha^2$$

$$\dot{A} + \dot{B} + \dot{C} = 3\dot{A}_0 + \dot{A}_1(1 + \alpha + \alpha^2) + \dot{A}_2(1 + \alpha + \alpha^2) = 3\dot{A}_0$$

$$\dot{A}_0 = \frac{\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}}{3}$$

2. Прямая последовательность

Умножим второе уравнение на α , а 3 уравнение на α^2 и сложим:

$$\dot{A} = \dot{A}_0 + \dot{A}_1 + \dot{A}_2$$

$$\alpha\dot{B} = \dot{A}_0\alpha + \dot{A}_1\alpha^3 + \dot{A}_2\alpha^2$$

$$\alpha^2\dot{C} = \dot{A}_0\alpha^2 + \dot{A}_1\alpha^3 + \dot{A}_2\alpha^4$$

$$\dot{A} + \alpha\dot{B} + \alpha^2\dot{C} = \dot{A}_0(1 + \alpha + \alpha^2) + \dot{A}_1(1 + \alpha^3 + \alpha^3) + \dot{A}_2(1 + \alpha^4 + \alpha^2) = 3\dot{A}_1$$

$$\dot{A}_1 = \frac{\dot{A} + \alpha\dot{B} + \alpha^2\dot{C}}{3}$$

3. Обратная последовательность

Умножим 2-ое уравнение на α^2 , а 3-е на α и сложим:

$$\dot{A} = \dot{A}_0 + \dot{A}_1 + \dot{A}_2$$

$$\alpha^2 \dot{B} = \dot{A}_0 \alpha^2 + \dot{A}_1 \alpha^4 + \dot{A}_2 \alpha^3$$

$$\alpha \dot{C} = \dot{A}_0 \alpha + \dot{A}_1 \alpha^2 + \dot{A}_2 \alpha^3$$

$$\dot{A} + \alpha^2 \dot{B} + \alpha \dot{C} = \dot{A}_0(1 + \alpha + \alpha^2) + \dot{A}_1(1 + \alpha^4 + \alpha^2) + \dot{A}_2(1 + \alpha^3 + \alpha^3) = 3\dot{A}_2$$

$$\dot{A}_2 = \frac{\dot{A} + \alpha^2 \dot{B} + \alpha \dot{C}}{3}$$

Вопросы для самопроверки.

1. В чем сущность метода симметричных составляющих?
2. Как рассчитать величину вектора нулевой последовательности?
3. Как рассчитать величину вектора прямой последовательности?
4. Как рассчитать величину вектора обратной последовательности?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 13

13.1 Фильтры симметричных составляющих.

Симметричные составляющие токов и напряжений могут быть измерены с помощью специальных электрических измерительных схем, называемых фильтрами симметричных составляющих. Эти фильтры получили широкое применение в релейной защите ЛЭП.

Под фильтром симметричных составляющих понимается такая схема, на вход которой подается несимметричная система токов или напряжений, а на выходе создается сигнал пропорциональный симметричным составляющим тока или напряжений на входе.

Примеры фильтров.

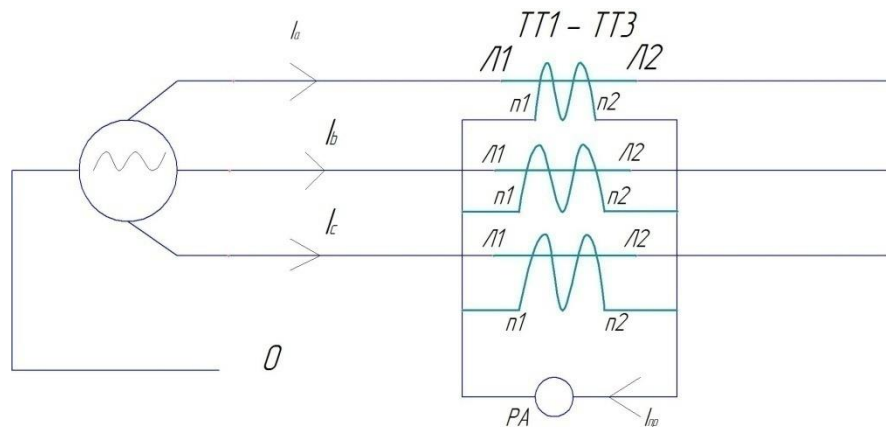


Рис. 13.1 фильтр токов нулевой последовательности

ТТ - измерительный трансформатор тока

n_T - коэффициент трансформации ТТ

$$I_{\text{пр}} = \frac{I_A}{n_T} + \frac{I_B}{n_T} + \frac{I_C}{n_T} = \frac{1}{n_T} = (I_A + I_B + I_C) = \frac{3I_0}{n_T}$$

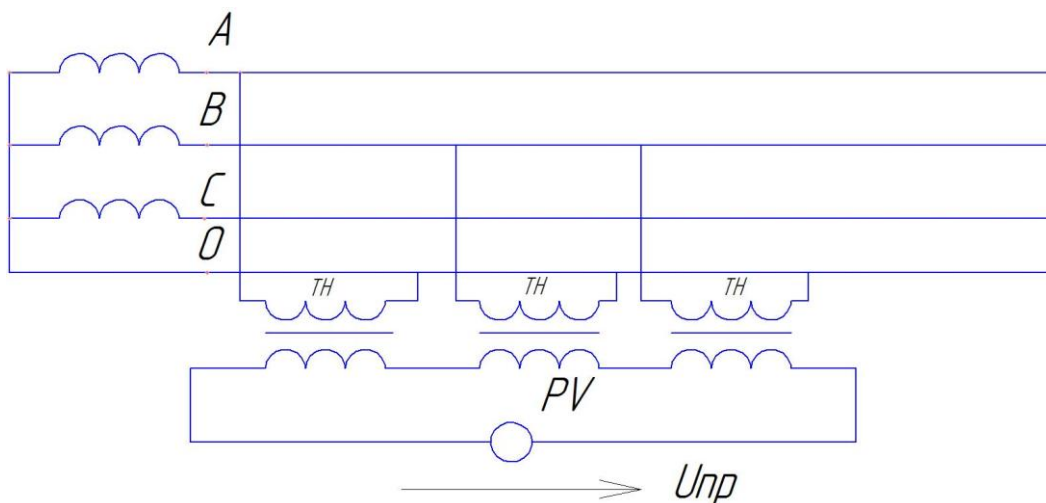


Рис. 13.2 фильтр напряжения нулевой последовательности

ТН – измерительный трансформатор напряжения;

nТ – измерительный трансформатор напряжения

$$U_{\text{пр}} = \frac{U_A}{n_V} + \frac{U_B}{n_V} + \frac{U_C}{n_V} = \frac{3U_0}{n_V}$$

13.2 Свойства трехфазных цепей в отношении симметричных составляющих.

1. В четырехпроводных линиях в нулевом проводе протекает ток равный утроенному значению тока нулевой последовательности.
2. В трехпроводных линиях отсутствуют токи нулевой последовательности (нет нулевого провода).
3. В линейных напряжениях отсутствует напряжение нулевой последовательности (т.к. сумма линейных напряжений равна).
4. Фазные напряжения различных приемников, соединенных звездой, при одних и тех же линейных напряжениях, имеют одинаковые симметричные составляющие прямой и обратной последовательностей и могут отключаться друг от друга только за счет составляющих нулевой последовательности.

Если при несимметричном режиме ток в одной или двух фазах отсутствует, то сумма симметричных составляющих токов в этих фазах равна 0; т.е.:

$$I_A = 0 \rightarrow I_{A1} + I_{A2} + I_{A3} = 0$$

13.3 Сопротивления симметричным составляющим.

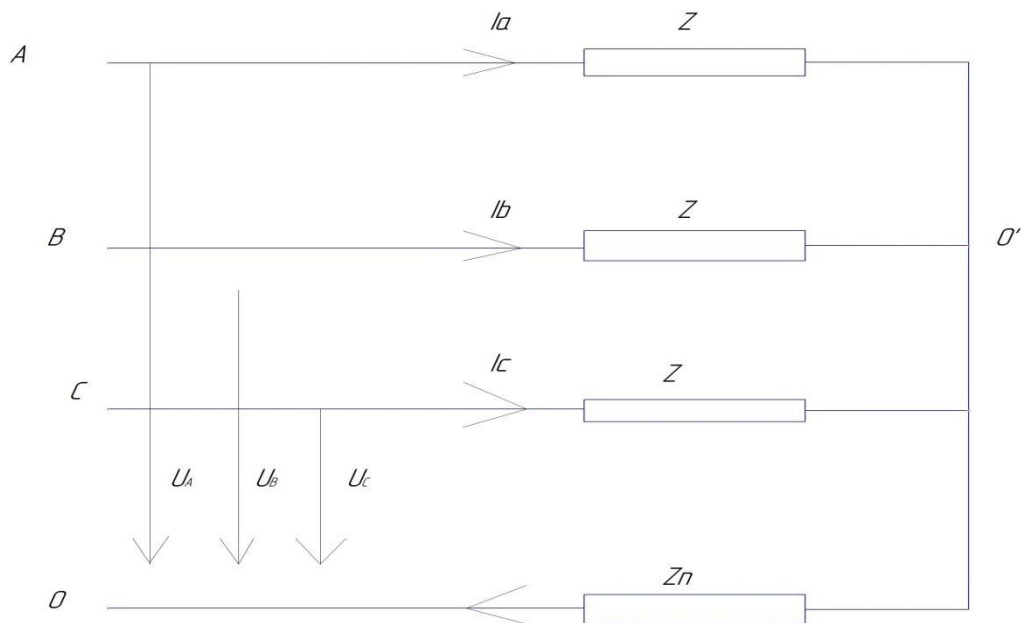
Если к выводам симметричной трехфазной цепи приложена симметричная система напряжений прямой, обратной или нулевой последовательности, то в цепи возникает симметричная система токов той же самой последовательности, какую имеют приложенные напряжения. Отношения приложенных комплексных фазных напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей и соответствующим комплексным токам, называют комплексными сопротивлениями цепи прямой, обратной и нулевой последовательностей.

$$Z_1 = \frac{U_{A1}}{I_{A1}}; \quad Z_2 = \frac{U_{A2}}{I_{A2}}$$

В симметричных трехфазных статических цепях (не содержащих вращающихся машин) изменение порядка следования фаз приложенных симметричных напряжений с прямого на обратный не изменяет значения токов. Поэтому для таких цепей сопротивление прямой и обратной последовательностей равна :

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}$$

Рассмотрим следующую цепь.



$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = \underline{Z} = \underline{Z}_1 = \underline{Z}_2$$

К выводам цепи приложены симметричные системы фазных напряжений нулевой последовательности: $U_A = U_B = U_C = U_0$, при этом система токов также симметрична и имеет нулевую последовательность $I_A = I_B = I_C = I_0$

На основе 2-го закона Кирхгофа запишем:

$$U_A = \underline{Z}_A I_A + \underline{Z}_N I_N, \quad \dot{U}_A = \dot{U}_0; \quad I_A = I_0; \quad I_N = 3I_0$$

$$\dot{U}_0 = \underline{Z} I_0 + \underline{Z}_N 3I_0 \rightarrow \dot{Z}_0 = \frac{\dot{U}_0}{I_0} = (\underline{Z} + 3\underline{Z}_N)$$

Сопротивление нулевой последовательности включает в себя утроенное значение сопротивления нейтрального провода и сопротивление, включенное в фазу нагрузки. При отсутствии нейтрального провода токи нулевой последовательности отсутствуют:

$$Z_0 = \infty \text{ и } I_0 = 0$$

Сопротивления прямой, обратной и нулевой последовательностей у вращающихся электрических машин различна: $Z_1 \neq Z_2 \neq Z_0$

Вопросы для самопроверки.

1. Что понимается под фильтром симметричных составляющих?
2. Где используются фильтры симметричных составляющих?
3. В каких ЛЭП отсутствуют токи нулевой последовательности?
4. В каких напряжениях отсутствует напряжение прямой последовательности?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 14

Расчет несимметричных трехфазных цепей методом симметричных составляющих.

14.1 Сущность метода.

Сущность метода симметричных составляющих (мсс) состоит в том, что несимметричный режим работы цепи представляется в виде суммы трех симметричных режимов.

Рассмотрим возможные варианты несимметрии:

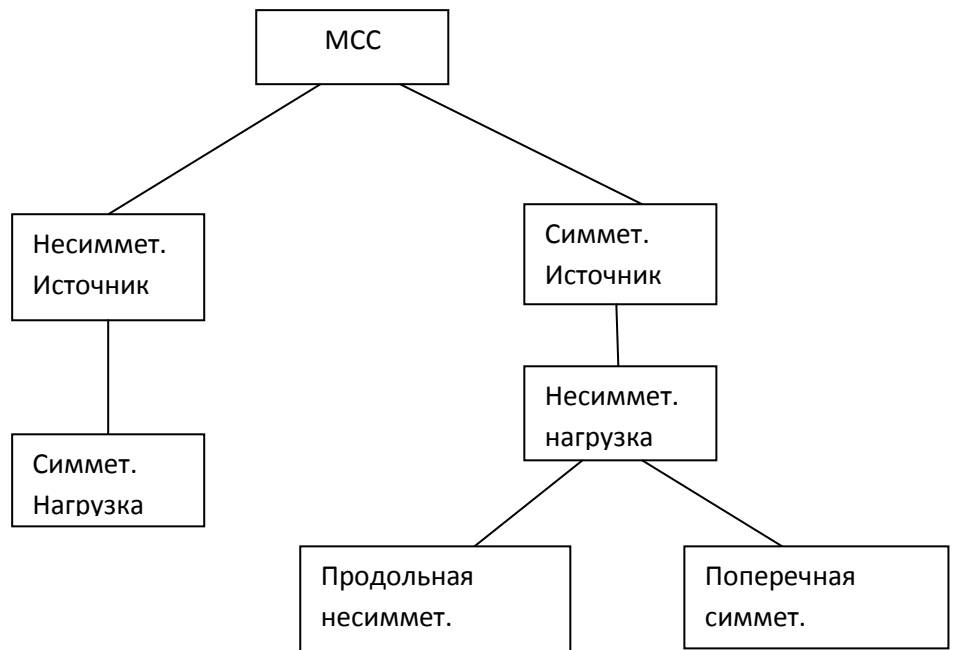


Рис. 14.1 варианты несимметрии

Продольная несимметрия – различное сопротивление проводов ЛЭП.

Поперечная несимметрия – возникает при несимметричной нагрузке.

14.2 Методика расчета при симметричной нагрузке и несимметричном источнике.

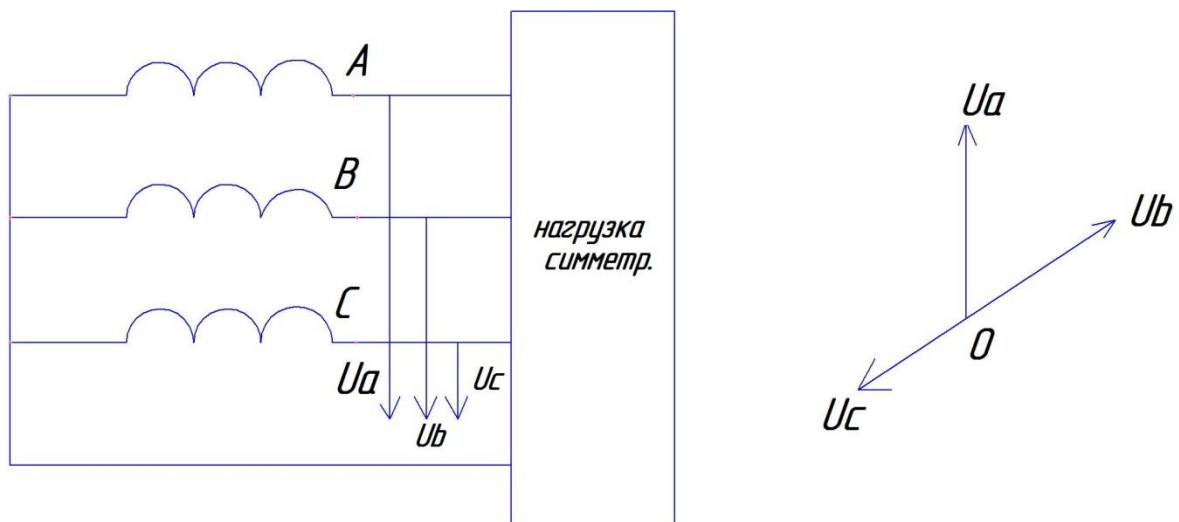


Рис. 14.2 симметричная нагрузка и несимметричный источник

1. Представим несимметричную систему напряжений источника в виде трех симметричных систем прямой, обратной и нулевой последовательностей.

$$\dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C)$$

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha\dot{U}_B + \alpha^2\dot{U}_C)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \alpha^2\dot{U}_B + \alpha\dot{U}_C)$$

2. Заменяем несимметричные напряжения на входе цепи на сумму трех симметричных.

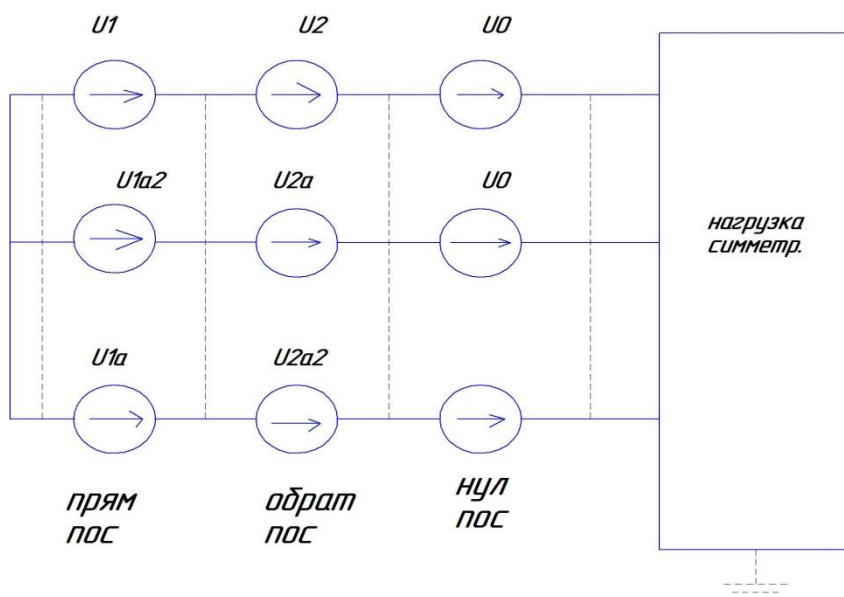


Рис. 14.3 схема замещения

3. Используя метод наложения можно найти токи в линии вызванные каждой симметричной системой $\dot{U}$ в отдельности. Для нахождения токов составляет схемы замещения на одну фазу, т.к рассчитываются симметричные цепи.

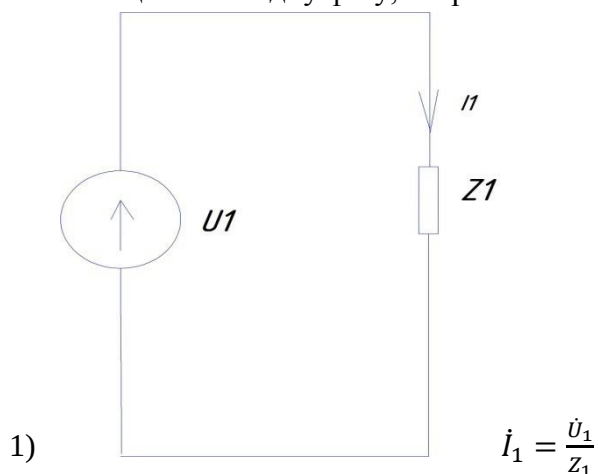


Рис. 14.4 прямая последовательность

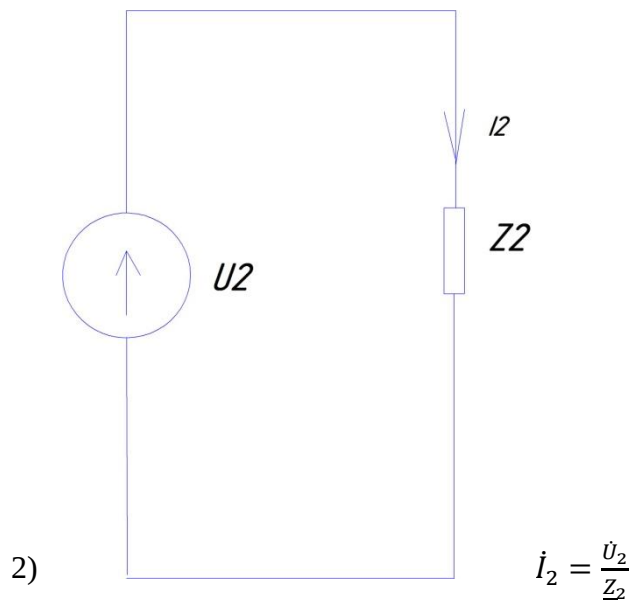


Рис. 14.5 обратная последовательность

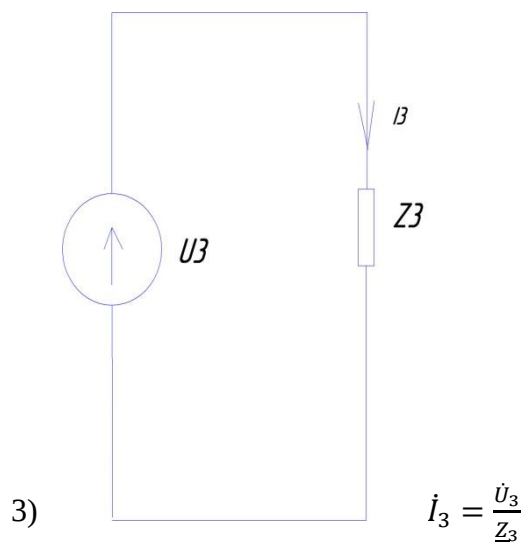


Рис. 14.6 нулевая последовательность

4) $\dot{I}_A = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_0$

$$\dot{I}_B = \alpha^2 \dot{I}_1 + \alpha \dot{I}_2 + \dot{I}_0$$

$$\dot{I}_C = \alpha \dot{I}_1 + \alpha^2 \dot{I}_2 + \dot{I}_0$$

14.3 Методика расчета трехфазной цепи при несимметричной нагрузке и симметричном источнике.

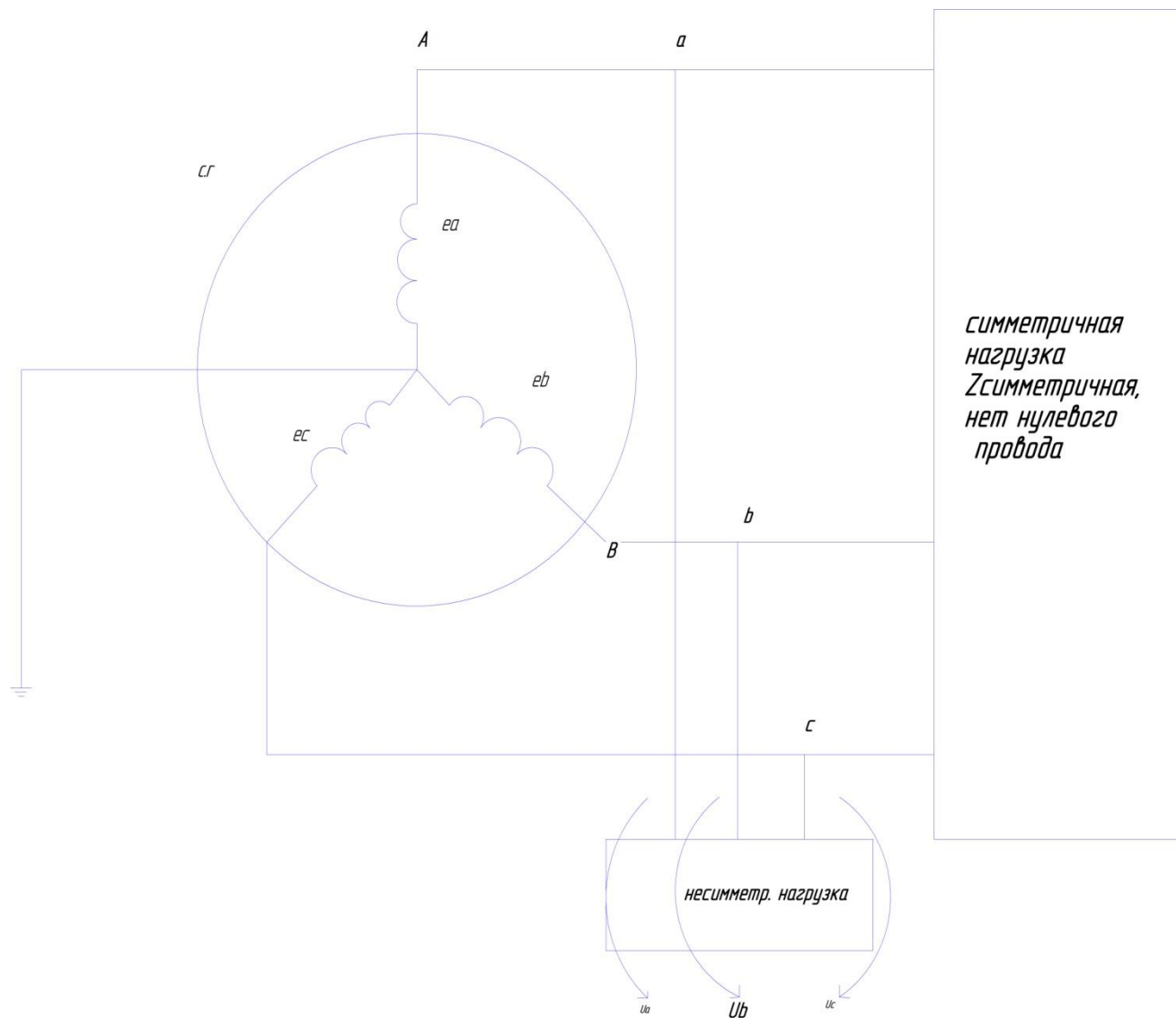


Рис. 14.7 схема, содержащая симметричный источник и несимметричную нагрузку

1. На основании теоремы компенсации заменим несимметричную систему напряжений U_a , U_b , U_c с источниками ЭДС.

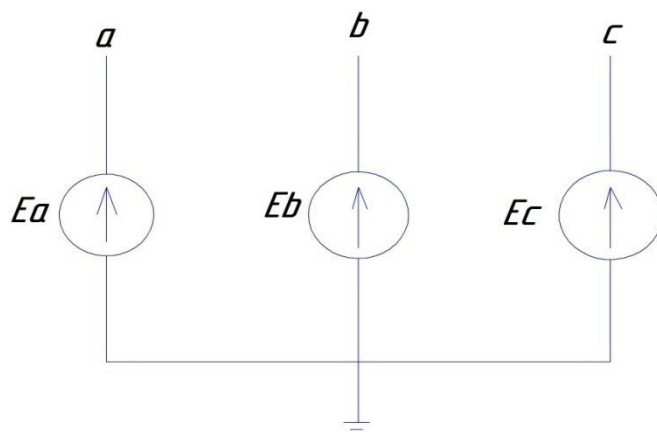


рис. 14.8 несимметричная система ЭДС

2. Полученную несимметричную систему ЭДС заменяем симметричными составляющими.

$$\dot{E}_0 = \frac{1}{3}(\dot{E}_A + \dot{E}_B + \dot{E}_C)$$

$$\dot{E}_1 = \frac{1}{3}(\dot{E}_A + \alpha \dot{E}_B + \alpha^2 \dot{E}_C)$$

$$\dot{E}_2 = \frac{1}{3}(\dot{E}_A + \alpha^2 \dot{E}_B + \alpha \dot{E}_C)$$

3. Далее расчет производится на основе метода наложения.

Для нахождения токов прямой, обратной и нулевой последовательностей необходимо составить схемы замещения соответствующих последовательностей. Расчет ведется на одну фазу, т.к. система симметрична. Любым методом рассчитываются все токи.

- 3.1. Расчет тока прямой последовательности.

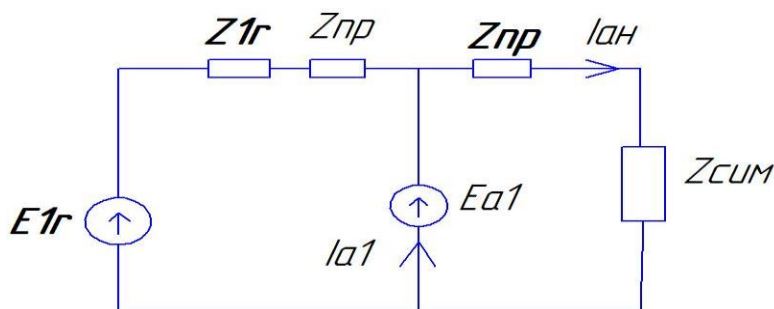


рис. 14.9

- 3.2. Расчет тока обратной последовательности.

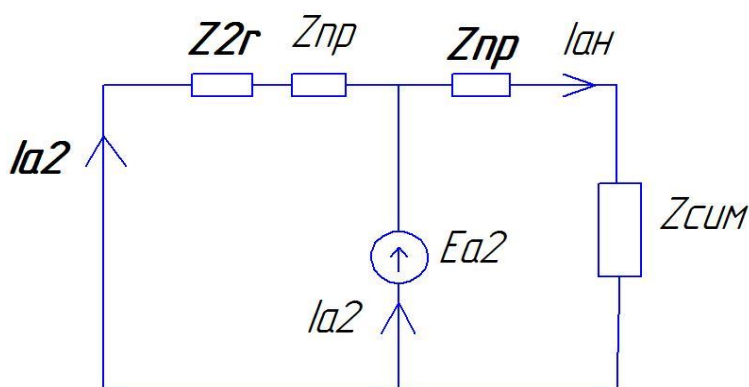


рис 14.10

- 3.3. Расчет тока нулевой последовательности.

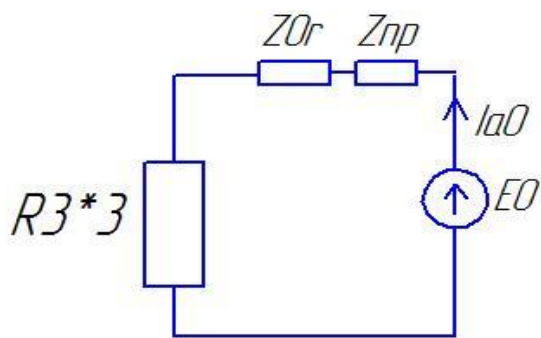


рис.14.11

3.4. Искомые токи.

$$i_A = i_{A1} + i_{A2} + i_{A3}$$

Вопросы для самопроверки.

1. Причина возникновения продольной несимметрии?
2. Причина возникновения поперечной несимметрии?
3. Сущность расчета электрической цепи методом наложения.
4. Сформулировать теорему о компенсации.

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А. М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 15

Вращающееся магнитное поле. Принцип действия асинхронного и синхронного двигателей.

15.1 Магнитное поле катушки.

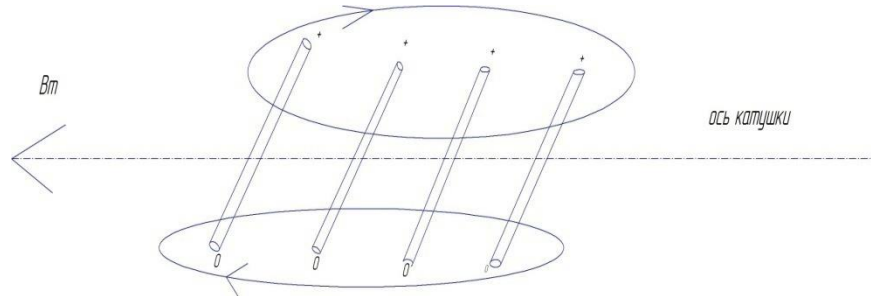


Рис.15.1 Магнитное поле катушки.

Если к катушке подвести синусоидально изменяющееся напряжение, то ток в ней будет изменяться по закону косинуса. Магнитное поле, создаваемое этим током так же будет изменяться по закону косинуса:

$$B = B_m \cos \omega t$$

Причем вектор максимальной магнитной индукции B_m всегда будет направлен по оси катушки. Такое магнитное поле называется пульсирующим.

15.2 Представление пульсирующего магнитного поля двумя вращающимися полями.

Формула Эйлера:

$$\cos \omega t = \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2}$$

$$B(t) = B_m \cos \omega t = B_m \frac{e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}}{2} = \frac{B_m}{2} e^{j\omega t} + \frac{B_m}{2} e^{-j\omega t}$$

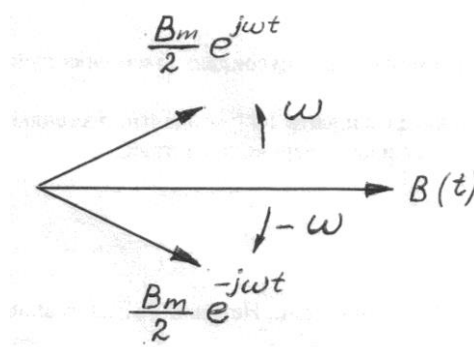


Рис. 15.2 Представление пульсирующего поля двумя вращающимися

15.3 Получение вращающегося магнитного поля.

Разместим в пространстве 3 катушки (А, В, С) под углом 120° друг к другу. Суммарное магнитное поле катушек А, В и С будет равно:

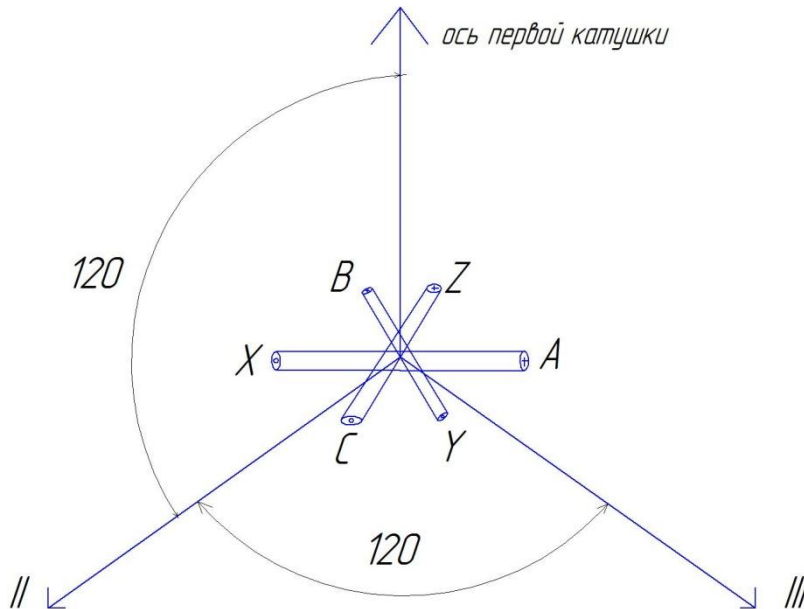


Рис. 15.3 получение вращающегося поля

$$\begin{aligned} B(t) &= B_A + B_B + B_C \\ &= \frac{B_m}{2} (e^{j\omega t} + e^{-j\omega t}) + \frac{B_m}{2} [e^{j(\omega t - 120^\circ)} + e^{-j(\omega t - 120^\circ)}] * e^{j120^\circ} \\ &\quad + \frac{B_m}{2} [e^{j(\omega t - 240^\circ)} + e^{-j(\omega t - 240^\circ)}] = \frac{B_m}{2} e^{j\omega t} + \frac{B_m}{2} e^{j\omega t} + \frac{B_m}{2} e^{j\omega t} = 1.5B_m e^{j\omega t} \end{aligned}$$

Вращающееся магнитное поле получается путем сложения трех пульсирующих полей трех катушек в пространстве на 120° , по которым протекает симметричная синусоидальная трехфазная система токов.

$$B(t) = 1.5B_m e^{j\omega t}$$

Трехфазные двигатели переменного тока делятся на две группы:

1. Асинхронные - $\omega_p < \omega_{\text{поля}}$
2. Синхронные - $\omega_p = \omega_{\text{поля}}$

15.4 Принцип действия асинхронного двигателя.

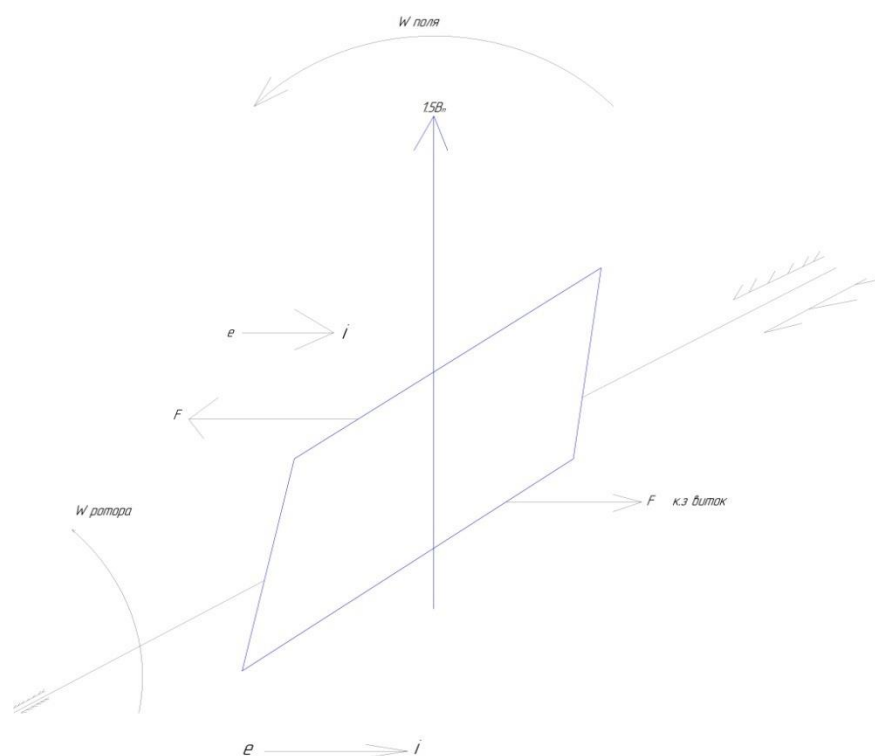


Рис. 15.4 принцип действия АД

Если во вращающееся магнитное поле внести к.з. виток, то в нем возникнет ЭДС (закон электромагнитной индукции), направление которой можно определить по правилу правой руки. Под действием ЭДС по витку будет протекать электрический ток. На проводники витка будут действовать выталкивающие силы (по закону Ампера), под действием которых виток (ротор) будет вращаться $\omega_{\text{ротора}} < \omega_{\text{поля}}$

15.5 Принцип действия синхронного двигателя.

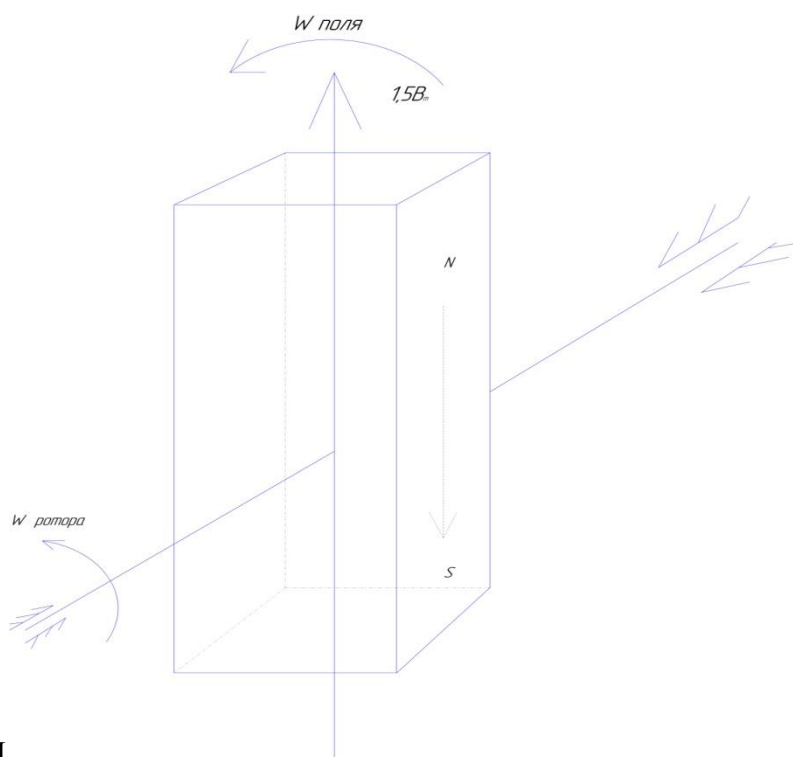


Рис. 15.5 принцип действия СД

Если во вращающееся магнитное поле внести постоянный магнит, то его магнитное поле сцепится с вращающимся магнитным полем и постоянный магнит начнет вращаться. $\omega_{\text{ротора}} = \omega_{\text{поля}}$

Вопросы для самоконтроля.

1. Каким является магнитное поле катушки, если к ней подвести синусоидальное напряжение?
2. Как необходимо разместить в пространстве три катушки, чтобы получить вращающееся магнитное поле?
3. Принцип действия АД.
4. Принцип действия СД.

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 16

Переходные процессы в линейных электрических цепях.

16.1 Причины возникновения переходных процессов.

В электрических цепях могут происходить включения и отключения пассивных или активных ветвей, к.з. отдельных участков, различного рода переключения и т.д. В результате таких изменений происходящих мгновенно и называемых коммутациями, в цепи возникают переходные процессы.

Переходный процесс – это процесс в эл.цепи при ее переходе от одного установившегося (стационарного) режима к другому. Переходные процессы заканчиваются спустя некоторое время (теоретически бесконечно большое) после коммутации.

Переходные процессы, сопровождающие коммутации, возникают за счет наличия реактивных элементов (L и C) в эл.цепи.

16.2 Законы коммутации.

Рассмотрим явления в цепи при включении ЭДС:

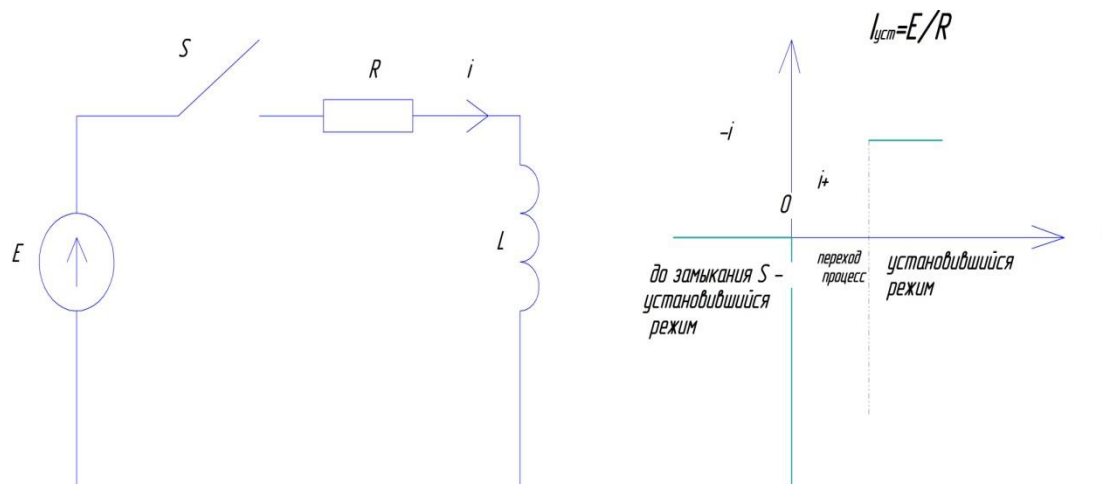


Рис. 16.1 включение индуктивности на постоянное напряжение

1-ый закон коммутации.

Ток и магнитный поток в ветви, содержащей L скачком измениться не может, т.е. каким ток и магнитный поток были до коммутации, такими же они будут и в первое мгновение после нее.

Доказать справедливость 1-го закона коммутации можно используя 2-ой закон Кирхгофа:

$$iR = +L \frac{di}{dt} = E$$

Если ток меняется скачком, то $\frac{di}{dt} \rightarrow \infty$ и 2-ой закон Кирхгофа нарушается, кроме того, $W = (LI^2) \rightarrow \frac{dW}{dt} = P \rightarrow \infty$ т.е. для изменения тока скачком нужна бесконечно большая мощность, что также невозможно.

2-ой закон коммутации.

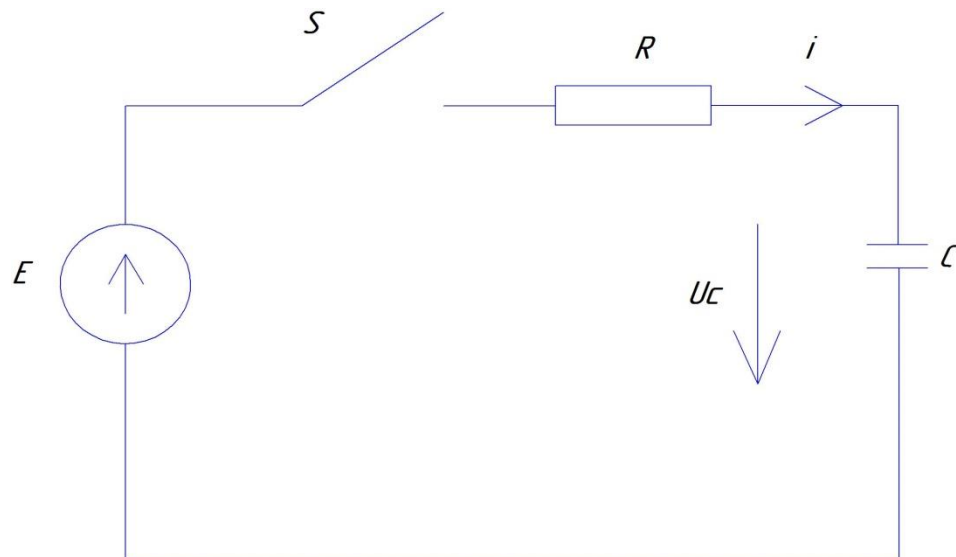


Рис. 16.2 включение емкости на постоянное напряжение

В ветви, содержащей C напряжение и заряд на C скачком измениться не могут, т.е. напряжение и заряд на C до коммутации равны напряжению и заряду в первое мгновение после нее:

Доказательство:

$$iR + U_C = E, i = C \frac{dU_C}{dt}, \text{ тогда: } RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = E \text{ (2-ой закон Кирхгофа)}$$

Если U_C меняется скачком, то $\frac{dU_C}{dt} \rightarrow \infty$, но тогда нарушается 2-ой закон Кирхгофа, кроме того: $W = \frac{CU^2}{2}, \frac{dU_C}{dt} = \frac{dW}{dt} = P \rightarrow \infty$, т.е. для изменения напряжения скачком нужна бесконечно большая мощность.

Пример опасного проявления 1-ого закона коммутации

Измерение сопротивления обмоток постоянного тока методом А-В.

$$R_v = 100 \text{ кОм}; I = \frac{E}{R} = \frac{100}{1000} = 0.1 \text{ А}$$

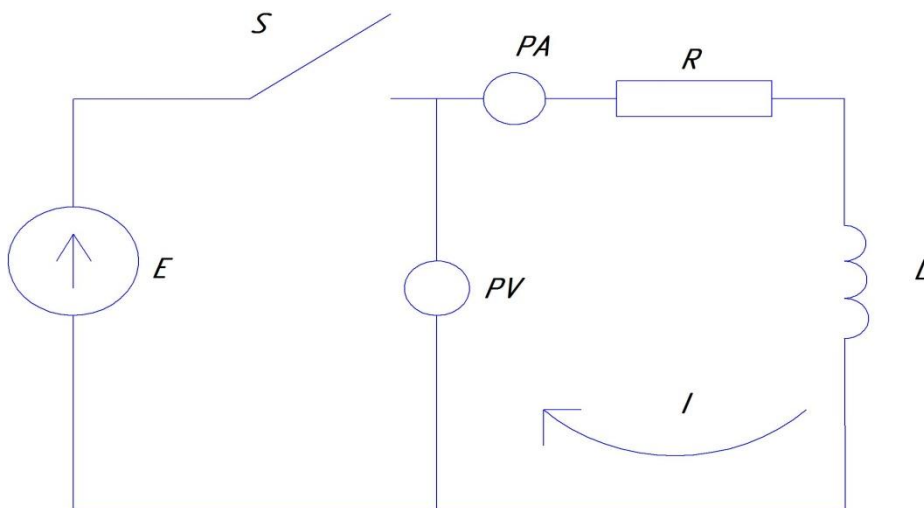


Рис. 16.3 измерение R методом

При размыкании ключа S ток I скачком изменится не может и в первое мгновение после коммутации на вольтметре будет напряжение равное: $U_v = IR_v = 0,1 * 100000 = 10000 \text{ В!!!}$

16.3 Переходный процесс при включении C на постоянное напряжение.

2-ой закон Кирхгофа:

$$iR + U_C = E$$

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{dU_C}{dt}$$

$RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = E$ – неоднородное дифференциальное уравнение 1-го порядка

Решение данного уравнения имеет вид: $U_C = U_{\text{част}} + U_{\text{общ}}$.

Частное решение ($U_{\text{с част}}$) – это новое установившееся значение U (или I) на C (или L) в новом установившемся режиме, т.е. после окончания переходного процесса. При этом

$$\frac{dU_C}{dt} = 0 \text{ и } U_{\text{с част}} = E.$$

$U_{\text{общ}}$ – решение однородного дифференциального уравнения вида:

$$RC \frac{dU_C}{dt} + U_C = 0$$

$$U_{\text{общ}} = U_{\text{своб}} = Ae^{pt}$$

A – постоянная интегрирования, p – корень характеристического уравнения.

Характеристическое уравнение:

$$RC Ae^{pt} + Ae^{pt} = 0$$

$$RCp + 1 = 0$$

$$p = -\frac{1}{RC}, p < 0 \text{ – потому что переходный процесс с течением времени затухает.}$$

Постоянная времени (τ) характеризует инерционность цепи к переходному процессу.

$$\tau = \frac{1}{|p|} = RC$$

Для нахождения A используются законы коммутации и начальные условия. Нач. условия – ток в L и напряжение на C до коммутации. Если они равны 0 – задача называется с нулевыми начальными условиями.

2-ой закон коммутации:

$$U_{C(-0)} = U_{C(+0)} \text{ или:}$$

$$0 = E + AEe^{pt}, \text{ т.к. } pt=0 \text{ то } A = -E.$$

Окончательно:

$$U_C = E - Ee^{-\frac{t}{RC}}$$

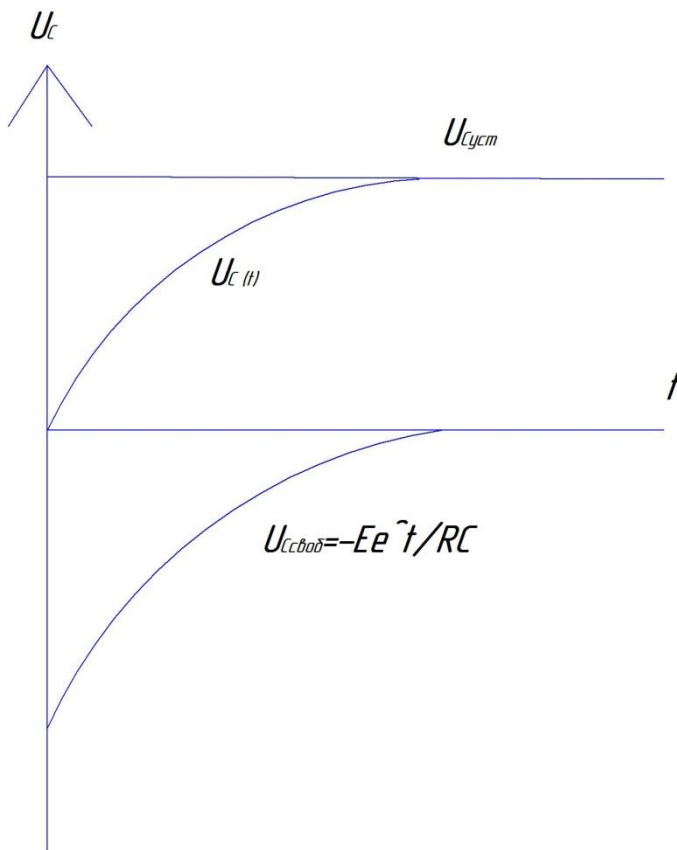


Рис. 16.4 заряд конденсатора

Вопросы для самоконтроля

1. Причины возникновения переходных процессов.
2. Сформулировать и доказать 1-ый закон коммутации.
3. Сформулировать и доказать 2-ой закон коммутации.
4. Почему корень p характеристического уравнения отрицателен?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 17

Классический метод расчета переходных процессов.

17.1 Методика расчета.

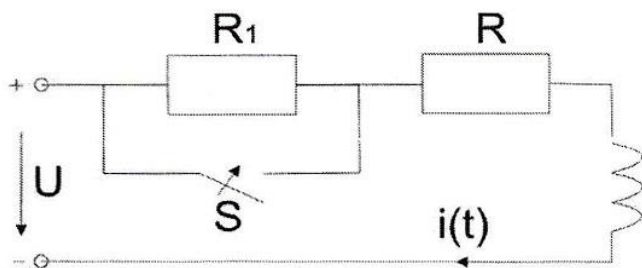


рис.17.1 При замыкании рубильника S возникнет переходный процесс

1. Если в цепи имеется L, то неизвестное принимается ток переходного процесса в ней (а при наличие C напряжение на C)

Составляется уравнение(система уравнений для описания схемы после коммутации для мгновенных значений I и U).

$$U = R \cdot I + L \frac{di}{dt}$$

Порядок дифференциального уравнения определяется числом независимых реактивных элементов в цепи (независимые элементы - это элементы которые нельзя заменить эквивалентными).

Записывается решение дифференциального уравнения, которое состоит из двух слагаемых: установившегося и свободного.

$$i = i_{уст} + i_{св}$$

Установившее значение определяется левой частью уравнения, когда переходный процесс закончен, т.е. когда имеет место новый установившийся режим:

$$i_{уст} = \frac{U}{R} \text{ (Если } U \text{ синусоидально, то и } i \text{ синусоидально)}$$

Свободное значение находится при условии, что возмещающая сила равна 0 – это будет свободный ток:

$$R \cdot i_{св} + L \frac{di_{св}}{dt} = 0 \text{ – однородное дифференциальное уравнение}$$

$$i_{св} = Ae^{pt}$$

число корней дифференциального уравнения определяется его степенью:

$$i_{св} = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots + A_n e^{p_n t}, \text{ } p_n \text{ – корни характеристического уравнения}$$

$$i = \frac{U}{R} + Ae^{pt}$$

Составление характеристического уравнения (после коммутации)

Существует 3 способа:

- а) Путем подстановки свободного тока в однородное дифференциальное уравнение

$$R \cdot i_{св} + L \frac{di_{св}}{dt} = 0$$

$$R \cdot Ae^{pt} + L \cdot Ae^{pt} p = 0$$

$$R + pL = 0 \text{ – характеристическое уравнение}$$

- б) $Z(\omega) = R + j\omega L; j\omega = p$

$$R + pL = 0$$

- в) В сложных цепях характеристическое уравнение получают из системы уравнений, составленных по закону Кирхгофа для свободных токов. Производится алгебраизация

этих уравнений и вычисляется главный определитель системы - Δ . Приравняв Δ к 0 получаем характеристическое уравнение: $\Delta=0$

Отыскание корней(корня) характеристического уравнения.
Решая характеристическое уравнение находят его корни p ,
 $[p] = c^{-1}$, а модуль равен $|p| = \alpha$ - коэффициент затухания

$$\frac{1}{p} = \frac{1}{\alpha} = \frac{L}{R} = \tau - \text{постоянная времени}$$

Физический смысл τ

$\frac{i_{CB}(t)}{i_{CB}(t+\tau)} = \frac{Ae^{pt}}{Ae^{p(t+\tau)}} = e^{-p\tau} = e^{-1} = \frac{1}{2.72}$, т.е. τ – это время, в течении которого свободный ток уменьшается в e раз по сравнению со своим начальным значением.

Теоретически переходный процесс никогда не заканчивается, а практически считают, что переходный процесс заканчивается через $(3-5) \tau$.

Определение постоянной интегрирования A .

A определяется из законов коммутации и начальных условий.

$i_{(-0)} = i_{(+0)}$, т.е. начальные условия- ток в L и напряжение на C до коммутации

$$\begin{aligned} \frac{R}{R_1+R} &= \frac{U}{R} + Ae^{p0} \\ A &= \frac{U}{R_1+R} - \frac{U}{R} = \frac{UR - UR_1 - UR}{(R_1+R)R} = -U \frac{R_1}{(R_1+R)R} \\ i &= \frac{U}{R} - U \frac{R_1}{(R_1+R)R} e^{-\frac{R}{L}t} \end{aligned}$$

Построим графики

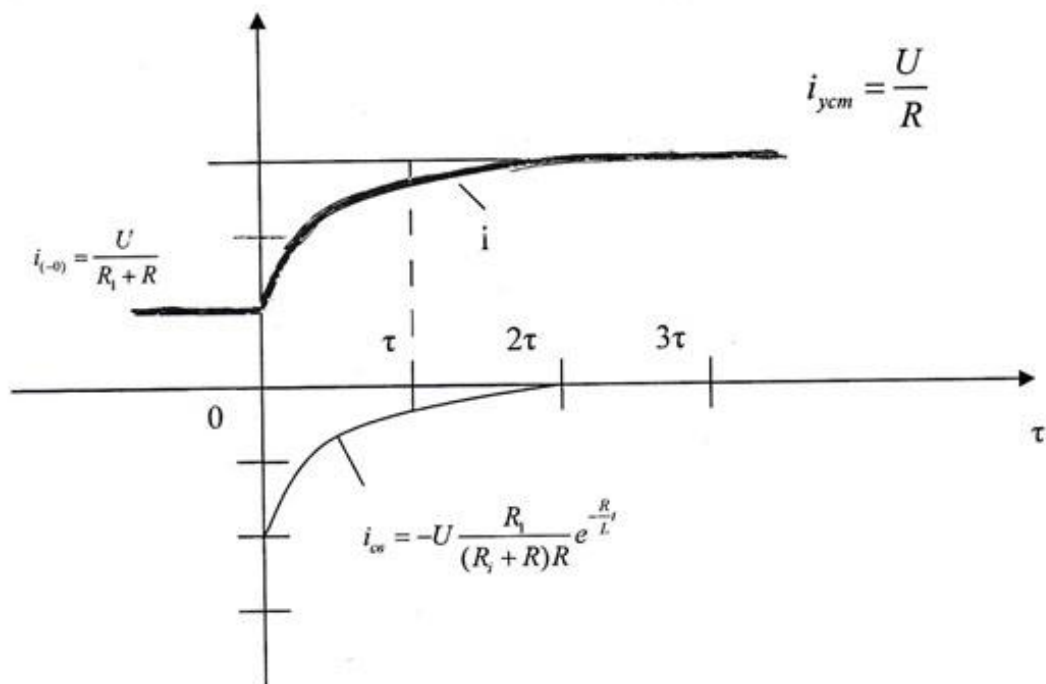


Рис.17.2 Изменение тока в цепи

Рассмотрим как изменяется напряжение на индуктивности

$$U_L = L \frac{di}{dt} = U - iR = U - \frac{UR}{R} + \frac{RUR_1}{(R_1+R)R} e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{UR_1}{R_1+R} e^{-\frac{R}{L}t} = IR_1 e^{-\frac{R}{L}t}$$

I – ток до коммутации

IR_1 – падение напряжения на R_1 до коммутации.

После коммутации падение напряжения перераспределились: на R осталось что было, а на L появилось то, что было на R_1 , т.е. IR_1 – напряжение на L изменилось скачком.

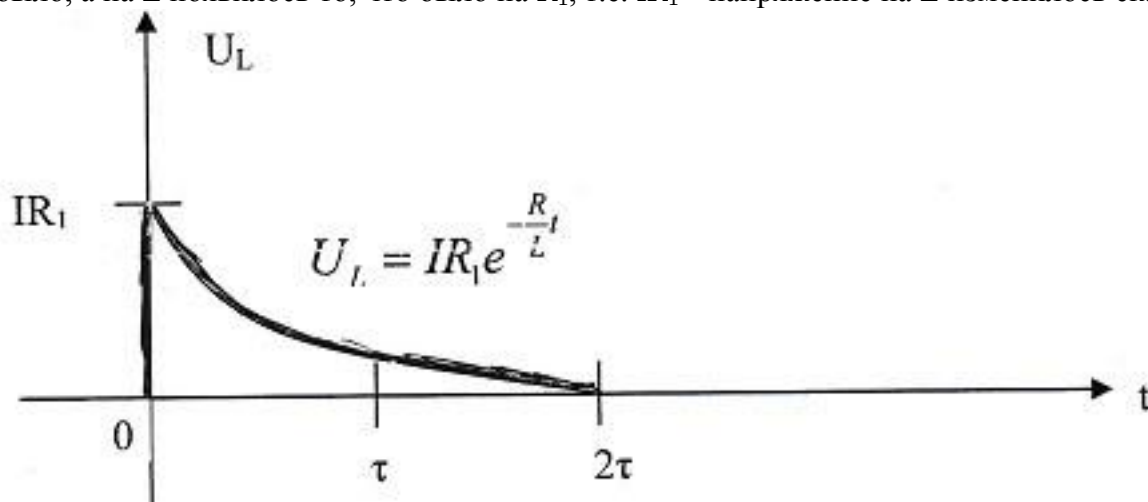


Рис.17.3 Изменение напряжения на индуктивности в цепи

Вопросы для самоконтроля.

1. Чем определяется порядок дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс?
2. Какие существуют способы получения характеристического уравнения?
3. Физический смысл постоянной времени τ .
4. Как определяется постоянная интегрирования A ?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 18

Апериодический и колебательный разряд конденсатора.

18.1 Общие положения.

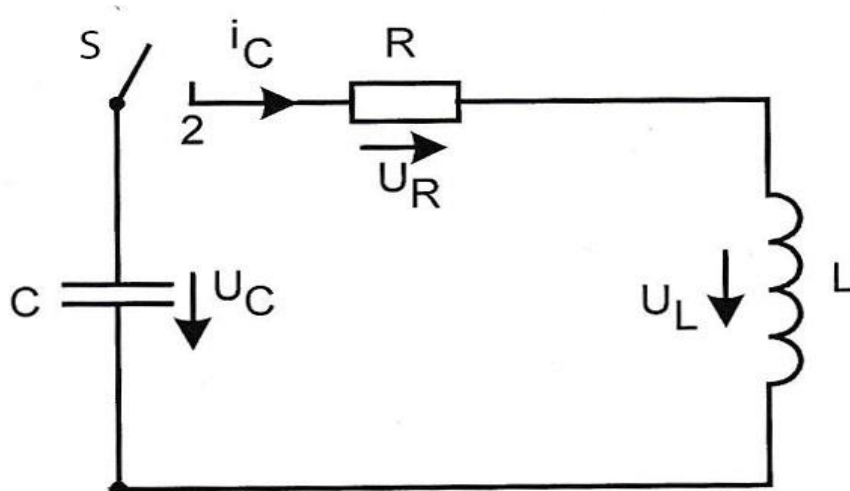


Рис.18.1 Разряд конденсатора на R-L

Допустим, что емкость C , заряжена до напряжения U_0 , замыкается на цепь с последовательным соединением сопротивления и индуктивности. В этом случае установившиеся токи и напряжения будут равны нулю и переходные напряжения и токи будут равны свободным составляющим. Уравнение после коммутационной цепи, составленное по второму закону Кирхгофа, будет однородным.

$$Ri + L \frac{di}{dt} + u_c = 0$$

Учитывая, что $i = C \frac{du_c}{dt}$, уравнение можно привести к виду

$$\frac{du_c^2}{dt} + \frac{R}{L} \frac{du_c}{dt} + \frac{1}{LC} u_c = 0$$

Его характеристическое уравнение

$$p^2 + \frac{R}{L} p + \frac{1}{LC} = 0$$

Имея два корня

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

Характер корней зависит от знака подкоренного выражения (дискриминанта – D), здесь возможны три случая:

$$D=0, \text{ т.е. } R=2\sqrt{\frac{L}{C}},$$

в этом случае корни уравнения будут отрицательными, вещественными и равными, $p_1=p_2<0$;

$$D>0, \text{ т.е. } R>2\sqrt{\frac{L}{C}},$$

корни уравнения будут отрицательными, вещественными и различными $p_1 \neq p_2$;

$$D<0, \text{ т.е. } R<2\sqrt{\frac{L}{C}},$$

корни уравнения будут комплексными и сопряженными,

$$p_1, p_2 = -\alpha \pm j\omega.$$

Во всех случаях физические процессы разряда конденсатора будут различны, характер переходного процесса зависит от соотношения между параметрами R , L , C .

18.2 Аперриодический разряд конденсатора.

Рассмотрим подробнее разряд конденсатора, когда

$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$. В этом случае корни p_1 и p_2 будут вещественными и отрицательными, и решение дифференциального уравнения следует искать в форме $u_c = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}$, а ток в цепи $i_c = CA_1 p_1 e^{p_1 t} + CA_2 p_2 e^{p_2 t}$.

Из начальных условий в момент времени $t=0$ напряжение на емкости будет равно U_0 , а ток в цепи, содержащей индуктивность, равен 0, следовательно,

$$U_{c(+)} = A_1 + A_2 = U_0; \quad U_{c(+)} = CA_1 p_1 + CA_2 p_2 = 0$$

$$A_1 = -\frac{p_2 U_0}{p_1 p_2}; \quad A_2 = \frac{p_1 U_0}{p_1 p_2}$$

Следовательно, окончательно можно записать

$$i = -\frac{U_0}{2L\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}}(e^{p_1 t} - e^{p_2 t});$$

$$u_c = -\frac{U_0}{2L\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}}(p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t});$$

$$u_L = -\frac{U_0}{2L\sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}}(p_1 e^{p_1 t} - p_2 e^{p_2 t});$$

$$u_a = Ri$$

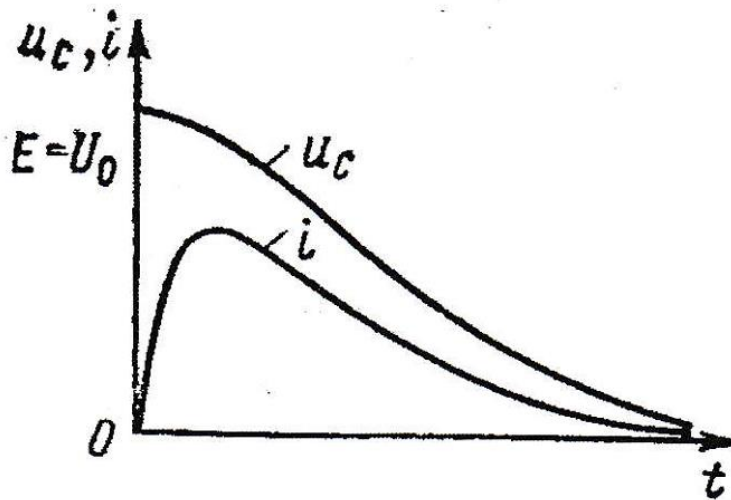


Рис.18.2 Аперриодическая разрядка конденсатора в последовательном контуре

Это означает, что все вычисленные величины состоят из алгебраической суммы двух экспонент, причем первая экспонента медленнее, чем вторая. В результате напряжение на конденсаторе, начиная с U_0 , непрерывно убывает, оставаясь всегда положительным (рис.18.2). Ток в цепи и напряжение на активном сопротивлении $u_a = Ri$, начинаясь с нуля, всегда отрицательны, что соответствует току разряда. Напряжение U_L на индуктивности возникает скачком до значения $-U_0$, затем проходит через нуль в момент времени t_m при равенстве своих экспонент, т.е. при $p_1 e^{p_1 t_m} = p_2 e^{p_2 t_m}$, и затем становится положительным. В момент времени $t=t_m$ значение тока проходит через максимум.

Рассмотренный вид разряда называется аперриодическим.

Физическая суть апериодического процесса заключается в следующем. Так как напряжение U_c непрерывно убывает, емкость отдает энергию, индуктивность с ростом тока накапливает энергию, но, начиная с $t=t_m$, ток убывает и индуктивность постоянно отдает энергию. Процесс продолжается до тех пор, пока вся энергия не будет рассеяна на активном сопротивлении.

18.3 Колебательный разряд конденсатора.

В этом случае, когда $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, характер разряда конденсатора существенно изменяется и становится колебательным.

Введем обозначения:

$$\alpha = \frac{R}{2L} - \text{коэффициент затухания};$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} - \text{угловая частота собственных затухающих колебаний};$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} - \text{угловая частота собственных затухающих колебаний}.$$

Ток и напряжение цепи будут:

$$i = -\frac{U_0}{\omega_0 L} \sin \omega_0 t;$$

$$u_a = Ri;$$

$$u_c = U_0 \sin(\omega_0 t + \frac{\pi}{2});$$

$$u_L = U_0 \sin(\omega_0 t - \frac{\pi}{2}).$$

Следовательно, если бы в цепи не происходило рассеивание энергии, ток и напряжение на индуктивности и емкости были бы синусоидальными и в цепи установились бы собственные незатухающие колебания с угловой частотой собственных незатухающих колебаний $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$, определяемой величинами L и C .

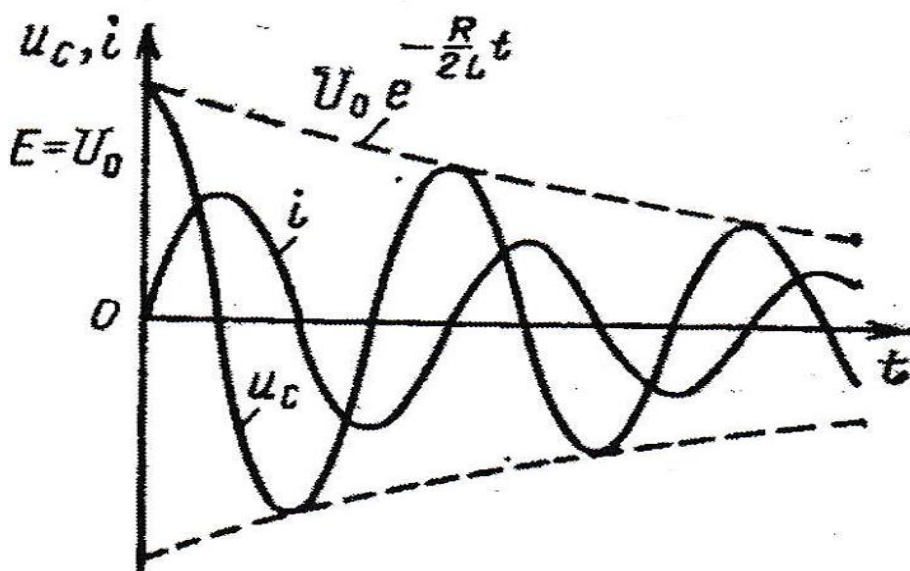


Рис.18.3 Колебательный процесс разрядки конденсатора в последовательном контуре

График мгновенных значений тока и напряжений на индуктивности и емкости приведен на рис.18.3. Физические процессы, происходящие в контуре, соответствуют резонансу в цепи с последовательным соединением R, L, C , происходящему на собственной частоте ω_0 . В контуре происходит полный обмен энергиями между C и L .

Корни характеристического уравнения будут комплексными. Их можно записать следующим образом.

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm j\sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} = -\alpha \pm j\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} = -\alpha \pm j\omega.$$

После подстановки значений p_1 и p_2 в общее решение и очевидных преобразований выражения для тока и напряжения на участках получают вид:

$$\begin{aligned} i &= -\frac{U_0}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t; \\ u_a &= iR; \\ u_c &= \frac{U_0}{\sin \gamma} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \gamma); \\ u_L &= \frac{U_0}{\sin \gamma} e^{-\alpha t} \sin(\omega t - \gamma). \end{aligned}$$

$\gamma = \arctg \frac{\omega}{\alpha}$ – величина, введенная для рационализации преобразований.

Для понимания физической сущности процесса важно рассмотреть идеальный случай разряда при $R=0$ и, следовательно, $\alpha=0$, $\omega=\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, $\gamma = \frac{\pi}{2}$. Тогда в реальной цепи, когда $R \neq 0$, разряд носит колебательный характер, но амплитуды тока и напряжения постепенно уменьшаются, так как $e^{-\alpha t}$ с течением времени стремятся к нулю.

Угловая частота этих собственных затухающих колебаний $T = \frac{2\pi}{\omega}$.

Отношение мгновенного значения какой-либо величины, например тока i , к значению этой величины через период T называется декрементом колебания Δ :

$$\Delta = e^{\alpha T}$$

Критический апериодический разряд конденсатора

В этом случае, когда $R=2\sqrt{\frac{L}{C}}$, дискриминант $D=0$, угловая частота собственных затухающих колебаний $\omega \rightarrow 0$ возникает критический случай апериодического разряда конденсатора. Ток такого разряда можно рассчитать по формуле

$$i = -\frac{U_0}{L} t e^{-\frac{r}{2L}t}.$$

Сопротивление $R_k=2\sqrt{\frac{L}{C}}$, называется критическим сопротивлением.

Вопросы для самопроверки

1. В чем заключается физическая суть апериодического разряда конденсатора?
2. Чему равно критическое сопротивление и что оно определяет?
3. Что такое декремент колебания?
4. Почему при колебательном разряде уменьшается амплитуда колебаний?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 19

19.1 Включение R, L цепи на синусоидальное напряжение.

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

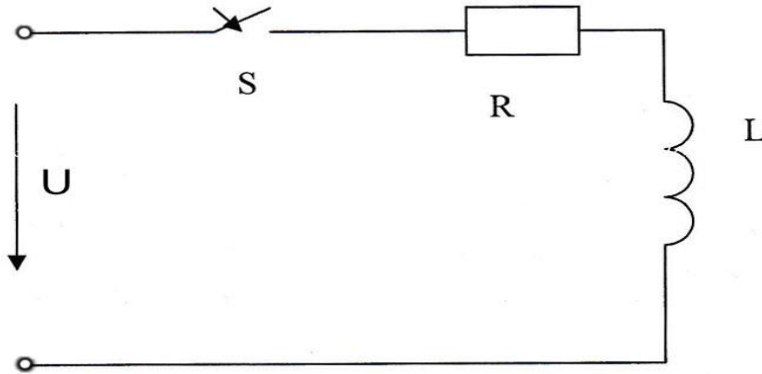


Рис.19.1 Схема включения R-L цепи на синусоидальное напряжение

1. На основании 2-го закона Кирхгофа запишем:

$$iR + L \frac{di}{dt} = U(t)$$

2. Решение этого дифференциального уравнения имеет вид:

$$i = i_{\text{уст}} + i_{\text{св}}$$

3. Ток в установившемся режиме будет синусоидален (цепь линейная), следовательно расчет $i_{\text{уст}}$ ведем в комплексной форме:

$$\dot{U}_m = U_m e^{j\psi_n}$$

$$\underline{z} = R + j\omega L = z e^{j\varphi}$$

$$z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$\angle \varphi = \arctg \frac{X_L}{R}$$

$$\dot{I}_m = \frac{\dot{U}_m}{\underline{z}} = I_m e^{j(\psi_n - \varphi)}$$

$$i_{\text{уст}} = I_m \sin(\omega t + \psi_i); \quad \psi_i = \psi_u - \varphi$$

4. Ток свободный найдем из уравнения $iR + L \frac{di}{dt} = 0$: $i_{\text{св}} = A e^{+pt}$

5. Составим характеристическое уравнение

$$\underline{z}(\omega) = R + j\omega L; \quad j\omega = P$$

$$R + PL = 0$$

$$P = -\frac{R}{L}$$

6. А ищем из начальных условий законов коммутации.

Под начальными условиями понимается ток в индуктивности или напряжения на емкости до коммутации

$$i_{(-0)} = i_{(+0)}$$

$$0 = I_m \sin(\psi_u - \varphi) + A$$

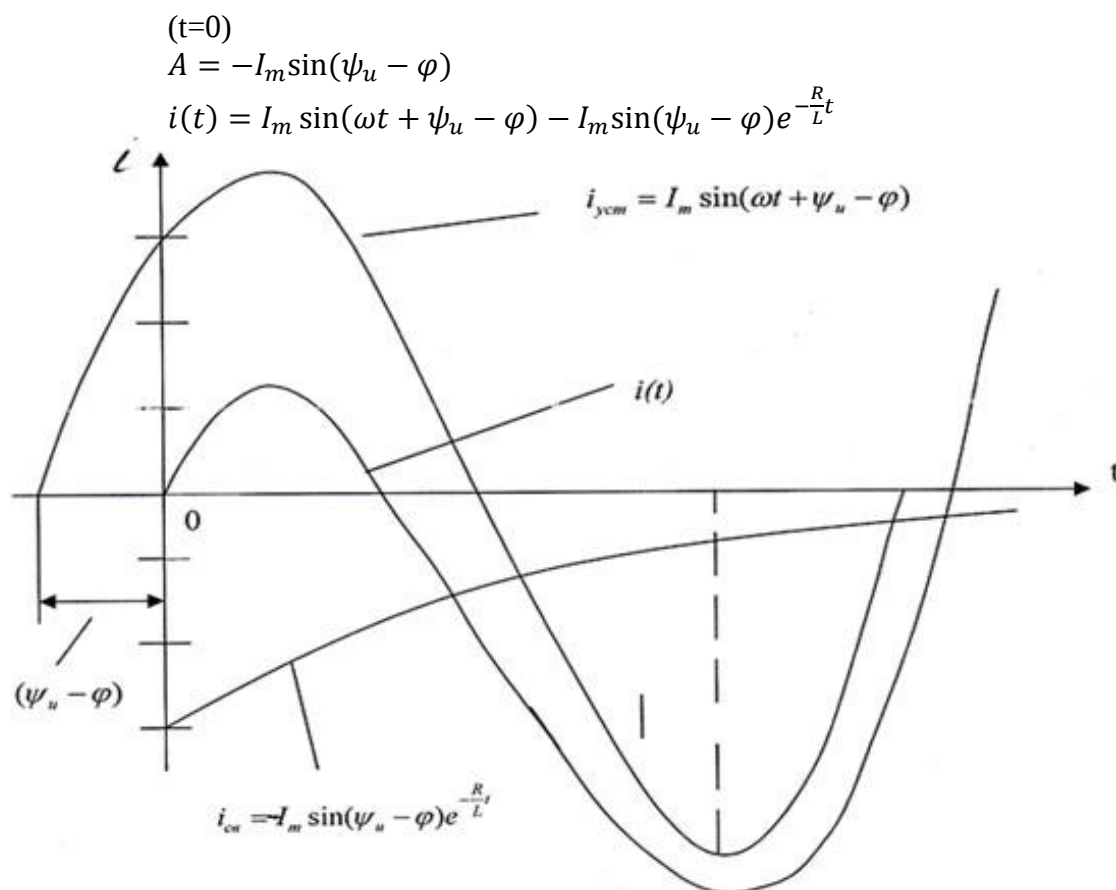


Рис.19.2 Токи включения R-L

Из выражения для $i(t)$ следует, что если включение цепи происходит в момент времени, когда $\psi_u = \varphi$, то $i_{cv}=0$ и переходный процесс отсутствует.

Вопросы для самопроверки.

1. Какой метод расчета используется для нахождения установившегося тока?
2. Что понимается под начальными условиями?
3. При каком условии переходный процесс при включении индуктивности на синусоидальное напряжение будет отсутствовать?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 20

Нелинейные электрические цепи.

20.1 Общие положения.

Электрическая цепь считается нелинейной если она содержит хотя бы один нелинейный элемент т.е. такой элемент у которого вольт-амперная характеристика (ВАХ) $U=f(I)$ не является прямой линией. У нелинейного элемента сопротивление зависит от тока по нему протекающему

1. Нелинейные электрические цепи постоянного тока

В зависимости от вида ВАХ нелинейные элементы принято разделять на 2 группы:

А) с симметричной относительно начала координат характеристик

Б) с несимметричной ВАХ

Режим работы нелинейного элемента в симметричной ВАХ не меняется при перемене знака напряжения и тока.

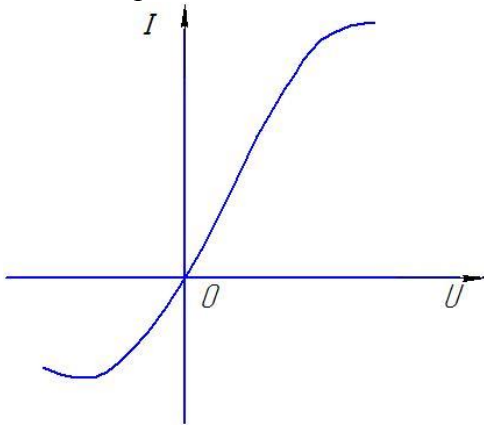


рис.20.1

ВАХ нелинейного элемента имеющего не симметричную характеристику весьма существенно зависит от знака тока и напряжения на нем.

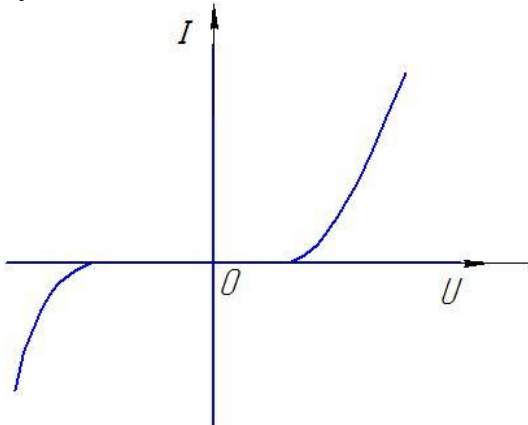


рис.20.2

Нелинейные элементы делятся так же на управляемые и не управляемые.

Управляемых нелинейных элементов ВАХ изменяется под воздействием некоторого управляющего фактору не образующих семейство ВАХ

$$I_k = f(U_k) \quad I_0 = \text{const}$$

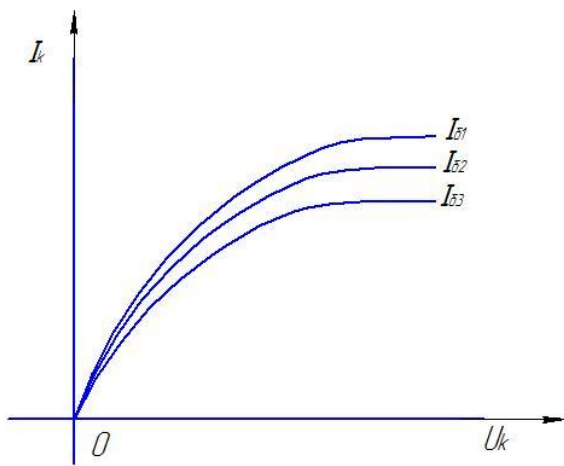


рис.20.3

У неуправляемых нелинейных элементов ВАХ изображается одной кривой
Расчет нелинейных цепей постоянного тока может быть выполнен как графически, так и статически.

Для выполнения расчета нелинейных цепей должны быть заданы ВАХ нелинейных элементов входящих в данную схему.

20.2 Графический метод расчета нелинейных цепей постоянного тока.

Рассмотрим последовательную цепь состоящую из линейного и нелинейного элементов.

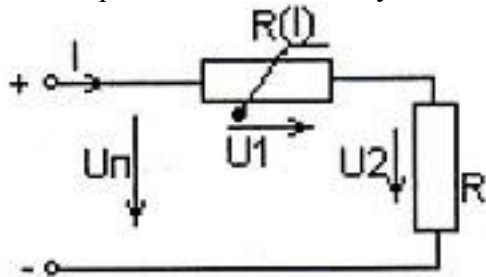


рис.20.4

Дано: ВАХ $R(I)$, R , U_n , I -?

Решение: В одной системе координат необходимо построить ВАХ нелинейного и линейного элементов

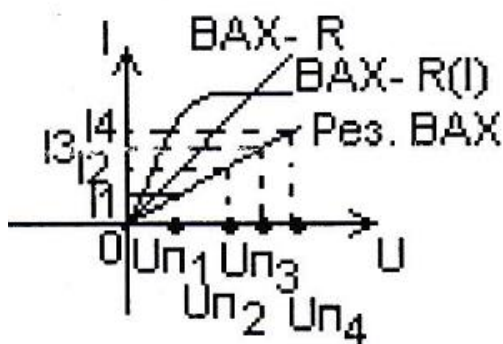


рис.20.5

ВАХ линейного элемента (прямая линия строится по 2 точкам) 1 точка - начало координат; 2 точка - может быть получена, если задаться некоторым напряжением на линейном элементе и по закону Ома найти ток

На основании 2 закона Кирхгофа можно записать, что

$$U_n = U_1 + U_2$$

Задаваясь различными значениями тока в цепи и используя 2 закон Кирхгофа строим результирующую.

По результирующей ВАХ для заданного напряжения питания (или другого назначения питания) можно найти ток в цепи.

Если с нелинейным элементом последовательно включен источник постоянной ЭДС, то ВАХ участка цепи с нелинейным элементом и ЭДС получается смещением ВАХ нелинейного элемента на величину ЭДС в лево или в право.

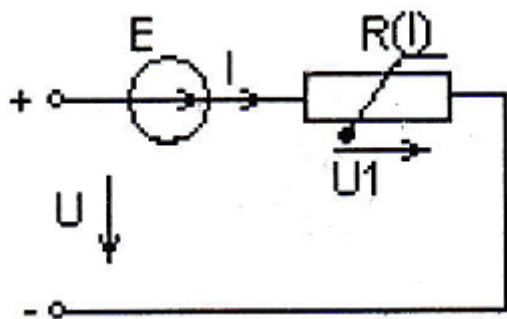


рис.20.6

$$E = U_1 - U \quad U = -E + U_1$$

3. Расчет последовательной цепи содержащей 2 нелинейных элемента

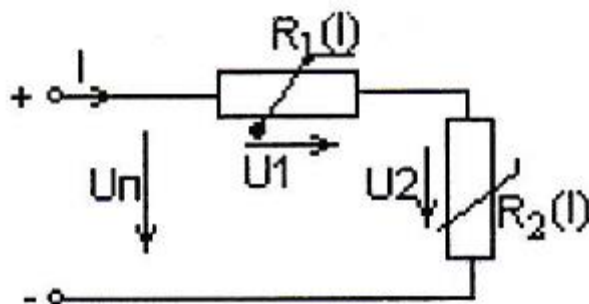


рис.20.7

Дано: ВАХ $R_1(I)$, $R_2(I)$, U_n I -?

Решение: В одной системе координат строим ВАХ $R_1(I)$ и $R_2(I)$ $U_n = U_1 + U_2$

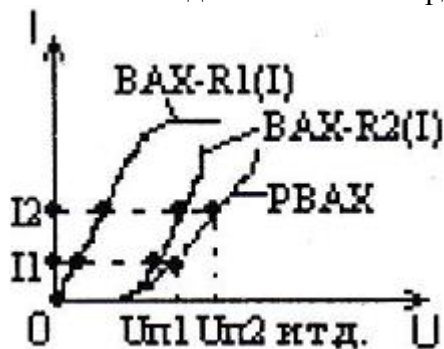


рис.20.8

Строим результирующую ВАХ задаваясь различными значениями тока.

По результирующей ВАХ для заданного значения напряжения питания, находим ток в цепи и если необходимо напряжения U_1 и U_2

4. Расчет цепи постоянного тока содержащей параллельно включенные нелинейные элементы

Дано: ВАХ $R_1(I)$, $R_2(I)$, U_n I -? I_1 -? I_2 -?

Решение: В одной системе координат строим ВАХ нелинейных элементов

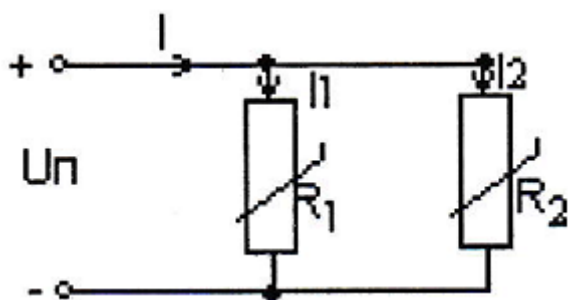


рис.20.9

На основании 1 закона Кирхгофа можно записать $I = I_2 + I_1$

Строим результирующую ВАХ задаваясь значениями напряжения

По результирующей ВАХ и для заданного напряжения питания определяем ток I .

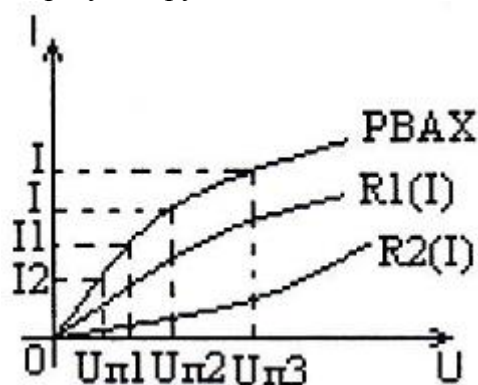


рис.20.10

5. Расчет цепи постоянного тока, содержащей смешанное соединение нелинейных элементов.

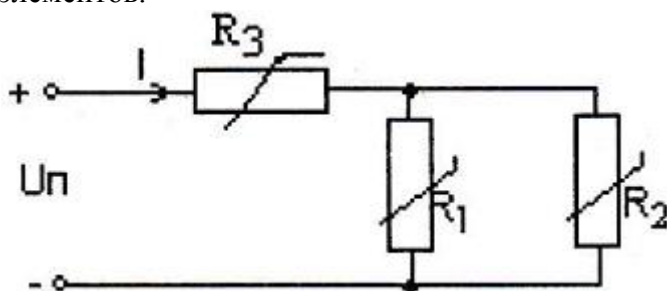


рис.20.11

Заданы ВАХ всех нелинейных элементов $R_1(I)$, $R_2(I)$, $R_3(I)$; I -? I_1 -? I_2 -?

В одной системе координат строим ВАХ нелинейных элементов.

Построим результирующую ВАХ для параллельно включенных элементов $R_1(I)$ и $R_2(I)$ – P_BAX №1.

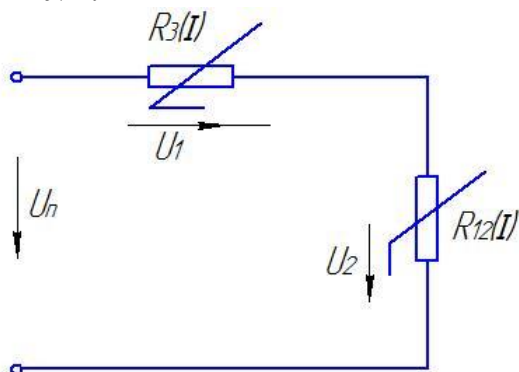


рис.20.12

Строим 2 результирующую ВАХ для последовательно включенных нелинейных элементов.

Для заданного напряжения питания по 2 результирующей ВАХ находим ток I в цепи и напряжении U_2 .

Зная напряжение U_2 по ВАХ 1 и 2 нелинейного элемента находим их токи.

6. Расчет сложных цепей при одном нелинейном элементе.

Электрическая цепь (актив двухполюсника) относительно нелинейного элемента заменяется эквивалентным генератором – но между эквивалента генератора. А затем выполняется графический расчет тока I .

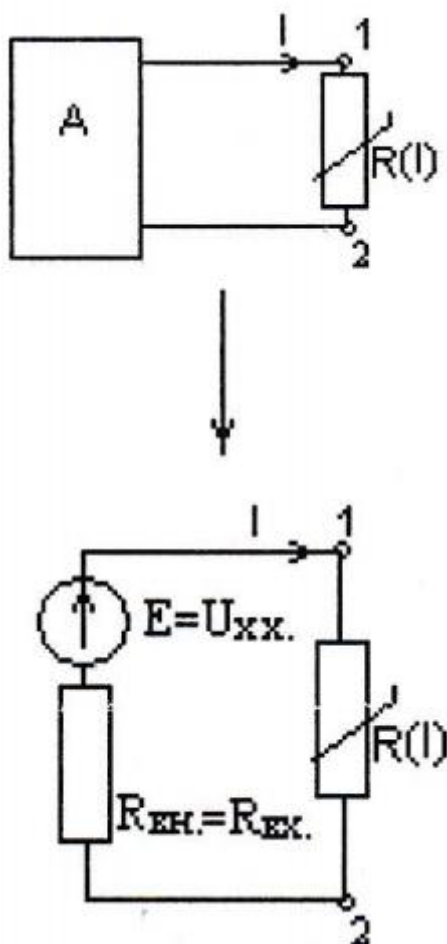


рис.20.13 Эквивалентный генератор.

Вопросы для самопроверки.

1. Какая электрическая цепь считается нелинейной?
2. Чем отличаются управляемые нелинейные элементы от неуправляемых?
3. В чем отличие нелинейных элементов с симметричной ВАХ от элементов с несимметричной ВАХ?
4. На основе каких законов выполняется графический расчет нелинейных цепей?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 21

Аналитический метод расчета нелинейных цепей постоянного тока

Данный метод применим, когда рабочая точка находится на прямолинейном участке ВАХ. Для нелинейного элемента используются понятия статического и дифференциального сопротивлений.

21.1 Статическое сопротивление рис.21.1

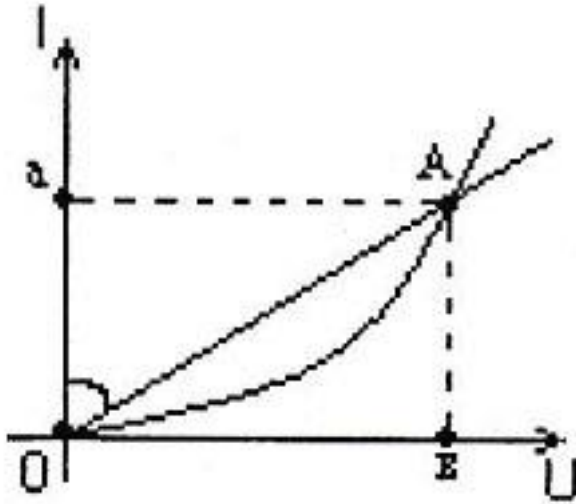


Рис.21.1

$$R_{cm} = \frac{U}{I} = \frac{ov \cdot m_U}{oa \cdot m_I} = m_R \cdot tg\alpha - \text{отношение } U \text{ на Н.Э к току в нем для данных ВАХ}$$

R_{cm} в любой рабочей точке пропорционально tg угла между осью токов и прямой, соединяющей начало координат и рабочую точку. В каждой рабочей точке R_{cm} различно.

21.2 Дифференциальное сопротивление рис.21.2

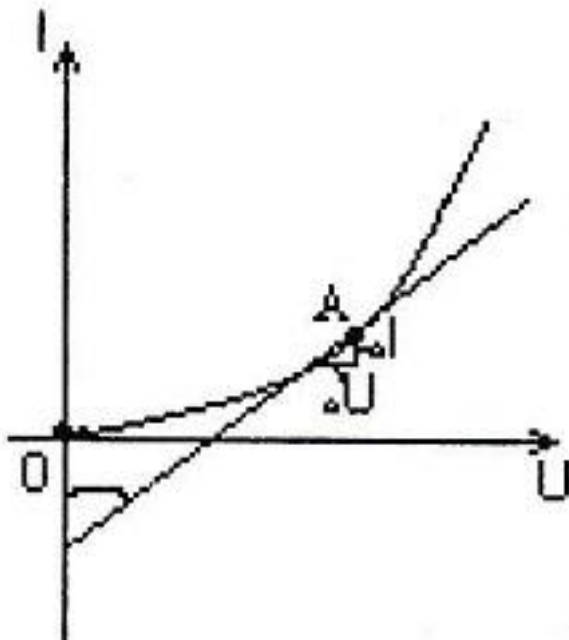


Рис.21.1

Дифференциальным сопротивлением называется величина характеризующая Н.Э. при малых отклонениях от рассматриваемой точки на ВАХ и равна:

$$R_{\text{диф}} = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU}{dI} \quad \Delta I \rightarrow 0$$

Дифференциальное сопротивление пропорционально tg угла между осью токов и касательной в рабочей точке.

21.3 Замена Н.Э. линейным сопротивлением и ЭДС рис.21.3

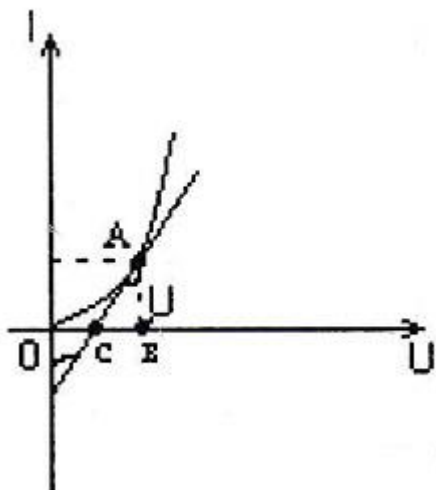


Рис.21.3

$$U = U_0 + m_U \cdot \text{св} = U_0 + m_U \cdot \text{Ав} \cdot \text{tg} \beta = U_0 + m_1 \cdot m_R \cdot \text{Ав} \cdot \text{tg} \beta = U_0 + I \cdot R_{\text{диф}}$$

$$m_1 \cdot \text{Ав} = I; \quad m_R \cdot \text{tg} \beta = R_{\text{диф}}$$

И так: $U = U_0 + I \cdot R_{\text{диф}}$

Полученному уравнению соответствует схема на рис.21.4

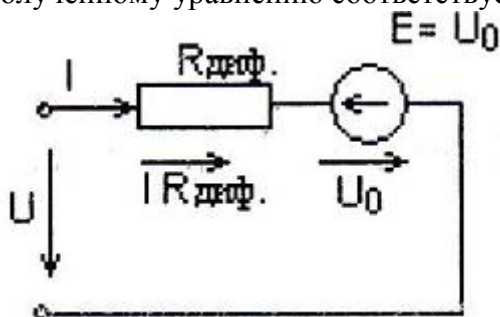


Рис.21.4

Если рабочая точка находится на прямолинейном участке ВАХ, то данное нелинейное сопротивление можно заменить $R_{\text{диф}}$ и последовательно включенной ЭДС. При выгнутой ВАХ ЭДС направлена навстречу току.

После замены Н.Э. линейным R и ЭДС цепь рассчитывается как линейная но рабочая тока не должна выходить за пределы прямолинейного участка ВАХ.

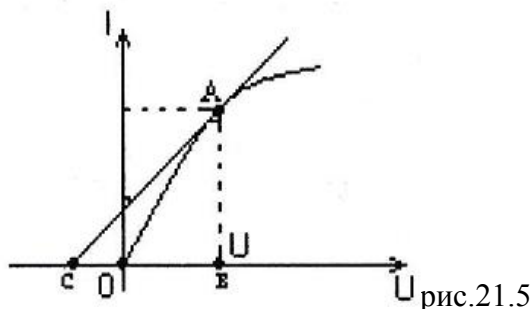


рис.21.5

$$U = m_U \cdot c_B - U_0 = m_U \cdot A_B \cdot \operatorname{tg} \beta - U_0 = m_1 \cdot m_R \cdot A_B \cdot \operatorname{tg} \beta - U_0 = I \cdot R_{\text{диф}} - U_0$$

$$U = I \cdot R_{\text{диф}} - U_0$$

При выпуклой ВАХ ЭДС направлены с током

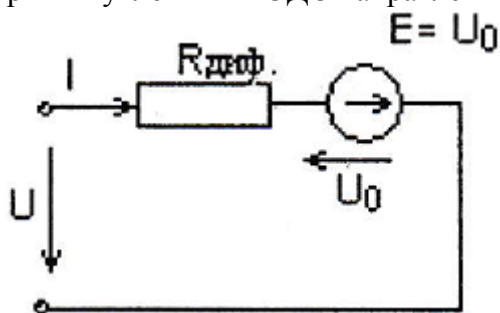


рис.21.6

21.4 Нелинейные электрические цепи переменного тока.

Для проведения математического анализа нелинейных цепей переменного тока и изучения их свойств целесообразно выразить аналитические зависимости между мгновенными значениями u и i Н.Э. Замена заданной нелинейной характеристики аналитической функцией, приближено выражающей заданную зависимость, называется аппроксимацией нелинейной характеристики.

Точная аппроксимация нелинейной характеристики обычно проводится к сложным математическим выражениям, что сильно затрудняет аппроксимацию на практике пользуются различными способами аппроксимации нелинейной характеристики: степенным, ломанной прямой и т.д.

Если к Н.Э. протекает I , то U на нем будет не синусоидально. Но и в первом и во втором случае они будут периодическими величинами. Для расчета таких цепей используется метод гармонических составляющих – разложение в ряд Фурье.

Вопросы для самоконтроля.

1. Что такое статическое сопротивление нелинейного элемента?
2. Что такое дифференциальное сопротивление нелинейного элемента?
3. Когда применим аналитический метод расчета нелинейных цепей?
4. Чем и как можно заменить нелинейный элемент?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 22

Магнитные цепи при постоянном магнитном потоке.

22.1 Магнитная цепь.

Магнитной цепью называется совокупность устройств, содержащих ферромагнитные тела, служащие для сосредоточения магнитного потока в определенном объеме пространства.

У ферромагнитных материалов магнитная проницаемость μ величина постоянная, поэтому магнитные цепи относятся к нелинейным цепям.

Магнитная цепь, во всех сочетаниях которой магнитный поток одинаков, называется неразветвленной (по аналогии с электрической – отсутствуют узловые точки). В разветвленной (сложной) магнитной цепи потоки на различных участках не одинаковы. Магнитное поле проявляется себя двумя путями: силовые воздействия на электрический ток (закон Ампера) и наведение ЭДС (закон электромагнитной индукции). В различных электрических устройствах (реле, трансформаторы, электродвигатели и т.д.) необходимо создавать магнитные поля в заданном пространстве, необходимой конфигурации и с необходимыми параметрами – все это позволяет сделать магнитную цепь.

22.2 Закон полного тока.

Одним из основных законов, используемых при расчете магнитной цепи, является закон полного тока гласит: циркуляция вектора напряженности $\vec{H}$ магнитного поля по замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, охватываемых этим контуром. Знак тока определяется по правилу правого винта.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

Если контур интегрирования охватывает W витков катушки, через которую проходит ток I , закон полного тока принимает вид

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I \cdot W = F$$

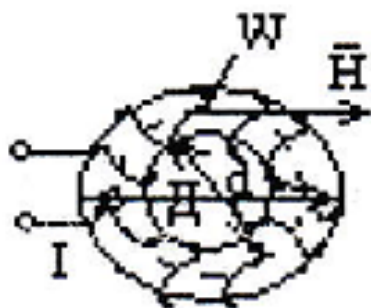
F – намагничивающая или магнитодвижущая сила, измеряется в амперах или ампер-витков.

Для практических расчетов интегрирование заменяют суммой произведений $H_k L_k$, где индекс k указывает участок магнитной цепи, на котором $H_k = \text{const}$.

Тогда закон полного тока примет вид:

$$\sum_{k=1}^K H_k L_k = IW = F$$

Пример: Дано: I ; W ; D ; d $H = ?$



–рис.22.1

$$H \cdot \pi \cdot D_{\text{ср}} = IW \quad D_{\text{ср}} = \frac{D+d}{2} \quad H = \frac{IW}{\pi D_{\text{ср}}}$$

С вектором напряженности H магнитные поля связан вектор магнитной индукции B :

$$B = \mu \cdot \mu_0 \cdot H = \mu_a \cdot H$$

Где μ – относительная магнитная проницаемость, показывающая во сколько раз индукция в среде отключается от индукции в вакууме; $\mu = B/B_0$, B_0 – индукция в вакууме; μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\frac{\text{Г}}{\text{М}}]$; μ_a – абсолютная магнитная проницаемость [Г/М]; $H_k = B_k/\mu_{ak}$ – подставим в закон полного тока:

$$\sum_1^k \frac{B_k}{\mu_{ak}} l_k = F$$

Для воздуха абсолютная магнитная проницаемость равна магнитной постоянной и связь между B и H приобретает вид:

$$H = \frac{B}{\mu_a} = \frac{B}{4\pi \cdot 10^{-7}} \approx 0,8 \cdot 10^6 \cdot B$$

22.3 Закон Ома для магнитной цепи.

В неразветвленной магнитной цепи магнитный поток на всех ее участках одинаков (аналогия с электронной цепью и током). Если принять, что вектор индукции B одинаков во всех точках поперечного сечения S неразветвленной магнитной цепи, то магнитный поток будет равен:

$$\Phi = B_k \cdot S_k \rightarrow B_k = \Phi / S_k - \text{подставим в закон Полного тока:}$$

$$\sum \frac{\Phi}{\mu_{ak} \cdot S_k} l_k = F \quad \text{или} \quad \Phi = \frac{F}{\sum \frac{l_k}{\mu_{ak} \cdot S_k}} = \frac{F}{\sum R_{mk}} \quad \text{закон Ома для магнитной цепи}$$

$$R_m = \frac{l_{\text{ср}}}{\mu_a \cdot S} - \text{магнитное сопротивление}$$

$$[R] = 1/\text{Гн} \quad (\text{аналогия с } R = \rho \frac{l}{S}).$$

22.4 Законы Кирхгофа для магнитной цепи.

Рассмотрим следующую разветвленную магнитную цепь

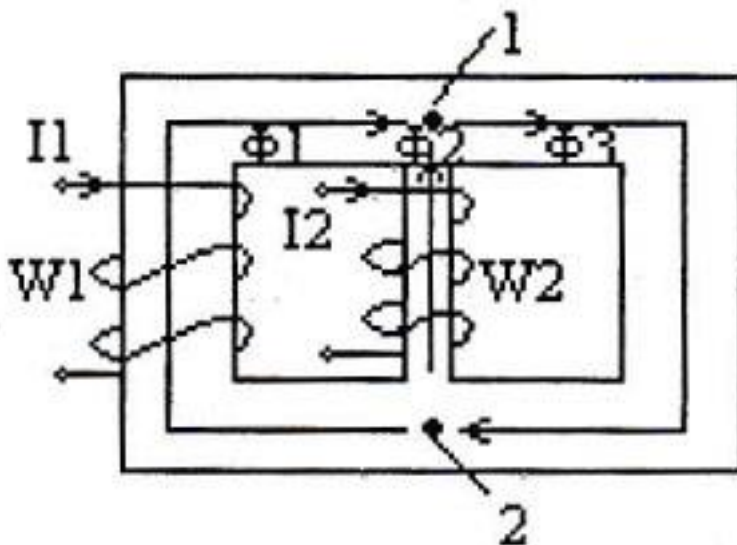


Рис.22.3 Разветвленная магнитная цепь

1 закон Кирхгофа для магнитной цепи

$\Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_3 = 0$ – Алгебраическая сумма магнитных потоков в узловой точке равна 0.

2 закон Кирхгофа для магнитной цепи

В любом замкнутом контуре магнитные цепи алгебраической сумма м.д.с. равна алгебраической сумме падений магнитных напряжений:

$$I_1 \cdot W_1 - I_2 \cdot W_2 = \Phi_1 R_{M1} - \Phi_2 R_{M2} \text{ (направление обхода).}$$

22.5 Свойства ферромагнитных материалов.

Свойства ферромагнитных материалов достаточно полно отражает магнитной индукции B от напряженности H магнитного поля. Примерная графическая зависимость $B=f(H)$ для ферромагнитных материалов имеет вид:

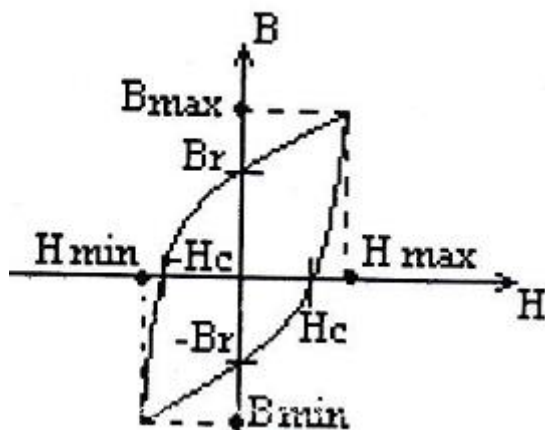


Рис.22.4 Петля гистерезиса

Этот график называется петлей гистерезиса.

При возрастании H индукция B изменяется (возрастает) по нижней части петли гистерезиса, а при убывании H индукция изменяется (уменьшается) в верхней части петли. При $|B_{max}| = |-B_{min}|$ получается симметричная петля гистерезиса. Индукция B_r при $H=0$ называется остаточной. Ширина петли гистерезиса зависит от свойств материала, в некоторой степени от H_{max} и от скорости изменения H . Напряженность магнитного тока H_c , при которой магнитная индукция предварительно намагниченного материала равна 0, называется коэрцитивной силой. Ширина петли равна удвоенному значению коэрцитивной силы H_c . Ферромагнитные материалы с широкой петлей гистерезиса ($H_c > 4000$ А/л) называются магнитотвердыми; их применяют для изготовления постоянных магнитов. Ферромагнитные материалы с узкой петлей гистерезиса ($H_c > 200$ А/л) называют магнитномягкими; их применяют для приготовления магнитных вводов, по которым распространяются переменные магнитные поля (эл. Маг. переменного тока)

В справочной литературе для ферромагнитных материалов приводится основная кривая намагничивания.

Основной кривой намагничивания называют геометрическое место вершин симметричных гистерезисных петель, полученных при различных максимальных значениях напряженности H магнитного поля.



Рис.22.5 Основная кривая намагничивания.

Вопросы для самоконтроля.

1. Сформулировать закон полного тока
2. Сформулировать законы Кирхгофа для магнитной цепи
3. Что описывает петля гистерезиса?
4. Что называют основной кривой намагничивания?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 23

Расчет магнитной цепи.

При расчете магнитных цепей могут решаться 2 задачи: прямая и обратная.

При решении прямой задачи задана величина магнитного потока Φ и требуется определить величину намагничивающей силы $F=IW$, которую необходимо иметь для создания магнитного потока

$$\Phi \rightarrow F = IW - ?$$

При решении обратной задачи задана величина намагничивающей силы $F=IW$, необходимо определить Φ -?

$$F=IW \rightarrow \Phi - ?$$

23.1 Решение прямой задачи при расчете неразветвляемой магнитной цепи.

Должно быть задано:

1. Геометрические размеры магнитной цепи
2. Основная кривая намагничивания ферромагнитного материала
3. Величина потока Φ

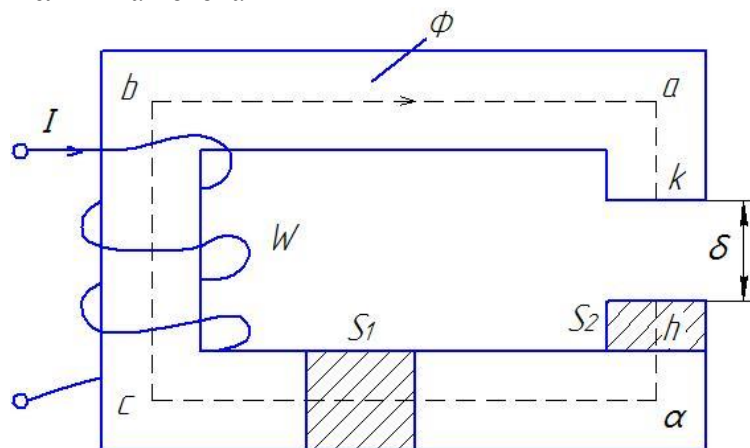


рис.23.1

Методика расчета

1. Магнитная цепь разбивается на ряд однородных участков, на каждом из которых напряженность H величина постоянная:

$$1) l_{abcd} \quad 2) l_{an} + l_{nd} \quad 3) l_{kn} = \delta$$

2. используя геометрические размеры магнитной цепи рассчитывается длина средней линии для каждого из однородных участков и его площадь поперечного сечения. При расчете площади воздушного зазора следует учесть: если воздушный зазор мал, то площадь зазора $S_0 = S_2$, а если зазор велик, то площадь зазора будет равна $S_0 = kS_2$, $k > 1$ k -из справочной литературы

3. Для каждого участка магнитной цепи рассчитывается величина магнитной индукции B

$$B_1 = \frac{\Phi}{S_1}; \quad B_2 = \frac{\Phi}{S_2}; \quad B_0 = \frac{\Phi}{S_0}$$

Используя основную кривую намагничивания определяем напряженность магнитного поля

$$B_1 \rightarrow H_1 \quad B_2 \rightarrow H_2 \quad H_0 = 0.8 \cdot 10$$

4. На основании закона полного тока определяем величину намагничивающей силы необходимой для создания магнитного потока

$$F = H_1 l_{abcd} + H_2 (l_{ak} + l_{nd}) + H_0 \delta = IW$$

23.2 Решение обратной задачи при расчете неразветвленной магнитной цепи

Заданы намагничивающая сила $F=IW$, геометрические размеры магнитной цепи и основная кривая намагничивания. Определить Φ -?

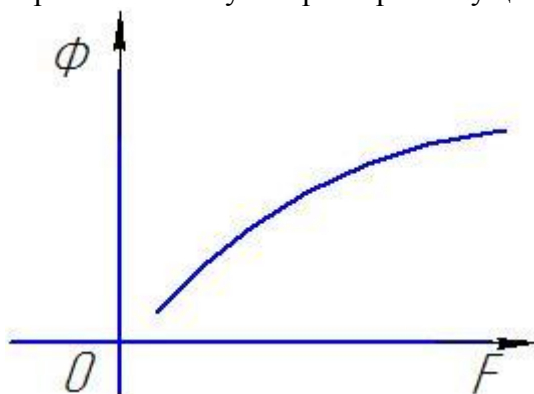
Методика расчета:

1. Магнитная цепь разбивается на ряд однородных участков
2. Для каждого однородного участка рассчитывается длина средней линии и площадь поперечного сечения
3. Подсчитывается величина магнитного потока Φ , который может быть в воздушном зазоре магнитной цепи при заданной величине намагничивающей силы

$$\Phi' = \frac{F \cdot S_0}{0.8 \cdot 10^6 \cdot \delta}$$

Причем величина магнитного потока Φ' будет $>$, чем величина искомого магнитного потока Φ

4. Задаваясь рядом значений магнитного потока Φ меньших чем Φ' , находим для каждого из них величину намагничивающей силы, т.е. решаем прямую задачу несколько раз.
5. По значениям магнитного потока Φ и соответствующих или намагничивающих сил строим магнитную характеристику цепи.



6. По характеристике цепи для заданного значения магнитного потока Φ определим намагничивающую силу.

Вопросы для самопроверки.

1. Какие задачи решаются при расчете магнитной цепи?
2. Какой участок магнитной цепи называется однородным?
3. Методика решения прямой задачи.
4. Методика решения обратной задачи.

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 24

Линейные цепи с периодическими несинусоидальными токами

Периодическими несинусоидальными токами(напряжениями) называют токи (напряжения), изменяющиеся во времени по периодическому несинусоидальному закону.

24.1 Причины возникновения периодических несинусоидальных токов(напряжений).

Периодические несинусоидальные токи(напряжения) возникают при четырех различных режимах работы электрических цепей (и при сочетании этих режимов)

- 1) Источник ЭДС (тока), вырабатывает несинусоидальную ЭДС (ток), а все элементы цепи нелинейны;
- 2) Источник ЭДС (тока) вырабатывает синусоидальную ЭДС (ток), но один или несколько элементов цепи нелинейны;
- 3) Источник ЭДС (тока), вырабатывает несинусоидальную ЭДС (ток), а один или несколько элементов нелинейны;
- 4) Источник ЭДС (тока) вырабатывает постоянную или синусоидальную ЭДС (ток), а один или несколько элементов цепи периодически изменяют во времени свои параметры.

24.2 Аналитическое представление периодической несинусоидальной функции.

Из курса математики известно, что всякая периодическая функция $f(t)$, удовлетворяющая условиям Дирихле, может быть разложена в тригонометрический ряд Фурье (все периодические функции в электротехнике условиям Дирихле удовлетворяют)

$$f(t) = A_0 + A_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + A_{2m} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + A_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k)$$

Каждый член зависит от ωt и φ_k .

A_0 - постоянная составляющая;

A_{1m} – амплитуда первой или основной гармоники, ее частота равна частоте $f(t)$

A_{km} – амплитуда высших гармоник.

В каждом конкретном случае определенные члены ряда Фурье могут отсутствовать. φ_k = нач.фаза гармоники.

Из тригонометрии известно:

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin\alpha \cos\beta + \cos\alpha \sin\beta$$

Обозначим:

$$B_{1m} = A_{1m} \cos\varphi_1 \quad \text{за} \quad C_{1m} = A_{1m} \sin\varphi_1$$

Тогда ряд Фурье можно записать в ином виде:

$$f(t) = A_0 + B_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + B_{2m} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + B_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k) + C_{1m} \cos\omega t + C_{2m} \cos 2\omega t + C_{km} \cos k\omega t$$

$$A_{km} = \sqrt{B_{km}^2 + C_{km}^2}; \quad \varphi_k = \arctg_k = \frac{C_{km}}{B_{km}}$$

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt; \quad B_{km} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \sin k\omega t \cdot \omega t \cdot dt; \quad C_{km} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} f(t) \cos k\omega t \cdot \omega t \cdot dt$$

24.3 Частотные спектры несинусоидальной периодической функции.

Совокупность гармонических составляющих несинусоидальной периодической функции называется ее дискретным частотным спектром.

Амплитудно-частотный спектр показан на рис.25.1

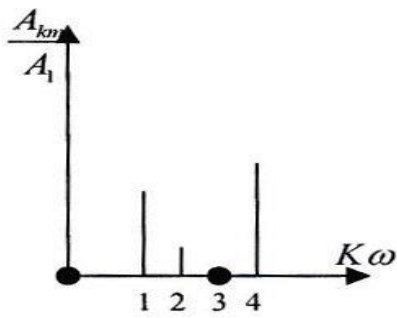


Рис. 24.1

Фазочастотный спектр показан на рис.25.2

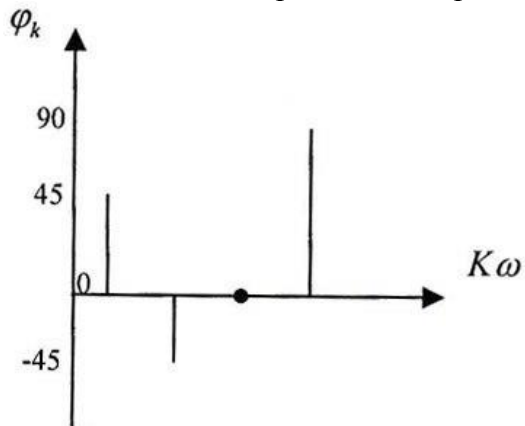


Рис. 24.2

24.4 Методика расчета линейных цепей с несинусоидальными токами (U, ЭДС).

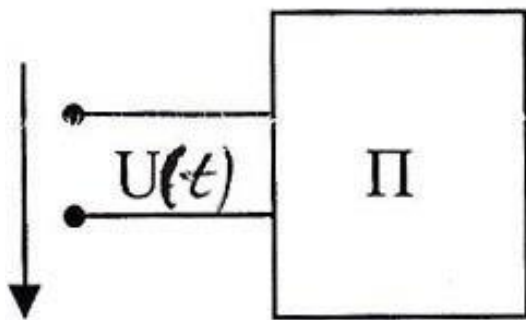


рис.24.3Схема питания двухполюсника

$U(t)$ – периодическая несинусоидальная функция

1. Разложение функции U_t в ряд Фурье
2. На основе метода наложения рассчитываются токи.

Рассмотрим методику расчета на примере следующей схемы:

Дано: U_t , R_1 , L_1 , R_2 , L_2 , C

Определить: $i_1(t)$

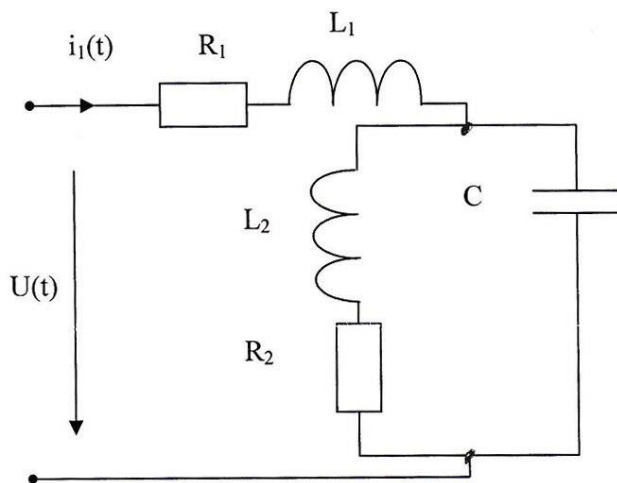


рис.24.4 Схема двухполюсника

Решение:

1. Напряжение $U(t)$ представим тригонометрическим рядом Фурье

$$U(t) = U_0 + U_{1m} \sin(\omega t + \varphi_1) + U_{2m} \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots + U_{km} \sin(k\omega t + \varphi_k)$$
 Кол-во членов ряда зависит от необходимой точности расчета (чем больше членов, тем точнее расчет). Обычно ограничиваются тремя-четырьмя членами.
2. На основании теоремы о компенсации напряжения отдельных гармоник представим соответствующими ЭДС

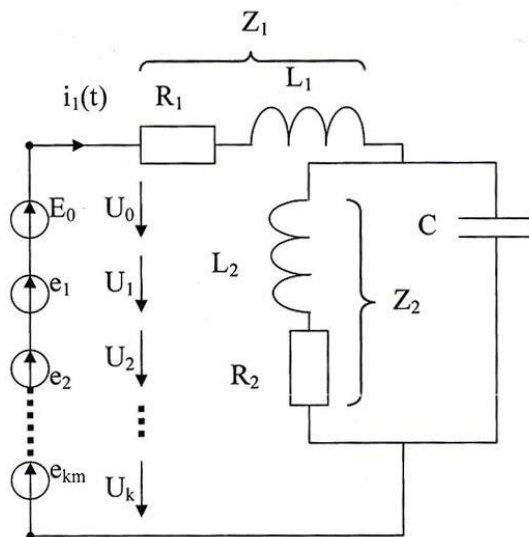


рис.24.5 Расчетная схема

3. Определяем ток от U_0 для этого составляем схему замещения постоянного тока, учитывая что $X_{L1}=0$, а $X_C=\infty$

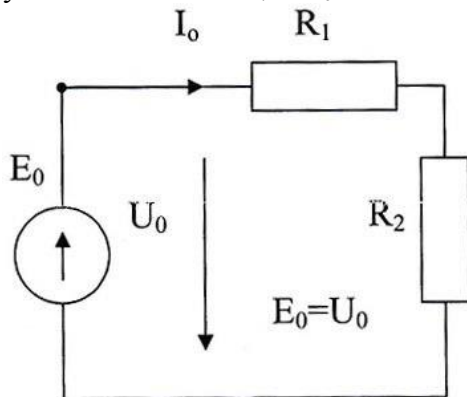


рис.24.6 Схема замещения на постоянном токе

$$I_0 = \frac{E_0}{R_1 + R_2}$$

4. Определим ток 1-ой гармоники, для этого на вход исходной цепи подается синусоидальная ЭДС 1-ой гармоники e_1 . Расчет 1-ой и высших гармоник производится символическим методом. В зависимости от сложности исходной цепи выбирается наиболее рациональный метод расчета (как то...).

$$E_{1m} = U_{1m}; \quad \dot{E}_{1m} = E_{1m} e^{j\varphi_1}$$

$$Z_{1\text{гp}} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}; \quad \underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1; \quad \underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2; \quad \underline{Z}_3 = -j \frac{1}{\omega C}$$

$$I_{1m} = \frac{E_{1m}}{\underline{Z}_{1\text{гp}}} = I_{1m} e^{j\varphi_{i1}}; \quad i_1 = I_{1m} \sin(\omega t + \varphi_{i1})$$

5. Аналогично рассчитываются точки высших гармонических составляющих. При этом необходимо помнить, что реактивные сопротивления зависят от частоты, т.е. в данном случае от номера гармоники.

$$X_{lk} = \omega_k \cdot L = k \cdot \omega_1 \cdot L = k \cdot X_{l1}; \quad X_{ck} = \frac{1}{\omega_k \cdot C} = \frac{1}{k \cdot \omega_1 \cdot C} = \frac{X_{c1}}{k}$$

Ответ задачи: $i(t) = i_0 + i_1 + i_2 + \dots + i_k$

Действующее значение несинусоидального периодического тока равно:

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2}$$

Действующее значение несинусоидального периодического тока не зависит от начальных фаз отдельных гармоник и определяется как корень квадратный из суммы квадрата постоянной составляющей и квадратов действующих значений всех гармоник.

Вопросы для самоконтроля.

1. Причины возникновения периодических несинусоидальных токов (напряжений).
2. Как аналитически можно представить периодическую несинусоидальную функцию?
3. Что такое амплитудно-частотный спектр?
4. Что такое фазочастотный спектр?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.: Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Лекция 25

Мощности в цепях синусоидального тока.

25.1 Активная мощность.

Активная мощность периодического тока произвольной формы определяется как средняя мощность за период:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (U_0 + U_1 + U_2 + \dots + U_K)(I_0 + i_1 + i_2 + \dots + i_K) dt = U_0 I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} U_K I_K \cos \varphi_K$$

Интегралы от $U_0 I_K, I_0 i_q$ – равны 0, т.к. это синусоиды.

$$P = U_0 I_0 + U_1 I_1 \cos \varphi_1 + U_K I_K \cos \varphi_K$$

$$P = U_0 I_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_K$$

Активная мощность в цепях несинусоидального тока равна мощности постоянной составляющей плюс активные мощности всех гармонических составляющих.

25.2 Реактивная мощность.

$$Q = \sum_{K=1}^{\infty} Q_K = U_1 I_1 \sin \varphi_1 + U_2 I_2 \sin \varphi_2 + \dots + U_K I_K \sin \varphi_K$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_K$$

25.3 Полная мощность.

$$S = UI = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_K^2} * \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_K^2}$$

(по аналогии с синусоидальным током)

Коэффициент мощности:

$$\cos \alpha = \frac{P}{S}$$

Угол α , это такой угол сдвига фаз между эквивалентными синусоидальными напряжения и тока, при котором активная мощность, выделяемая в цепи, равная мощности несинусоидального тока.

В цепях несинусоидального тока обычно:

$$S \geq P + Q, \text{ т.е. } S = P + Q + T, \text{ где } T\text{-мощность искажений}$$

25.4 Расчет цепей несинусоидального тока с помощью эквивалентных синусоид.

Если несинусоидальные токи и напряжения не содержат постоянных составляющих и мало отличаются от синусоидальных, можно воспользоваться приближенным расчетом. Суть которого заключается в том, что несинусоидальные ток и напряжение заменяются синусоидальным током и напряжением, действующие значения, которых равны действующим значениям несинусоидальных величин. Благодаря такой замене отпадает необходимость выполнять расчеты для каждой гармонической составляющей.

25.5 Коэффициенты, характеризующие форму несинусоидальных периодических кривых.

Дана кривая: рис.25.1

A_m – амплитудное значение

A – действующее значение

$A_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T |f(t)| dt$ – перевернутое отрицательное значение при интегрировании

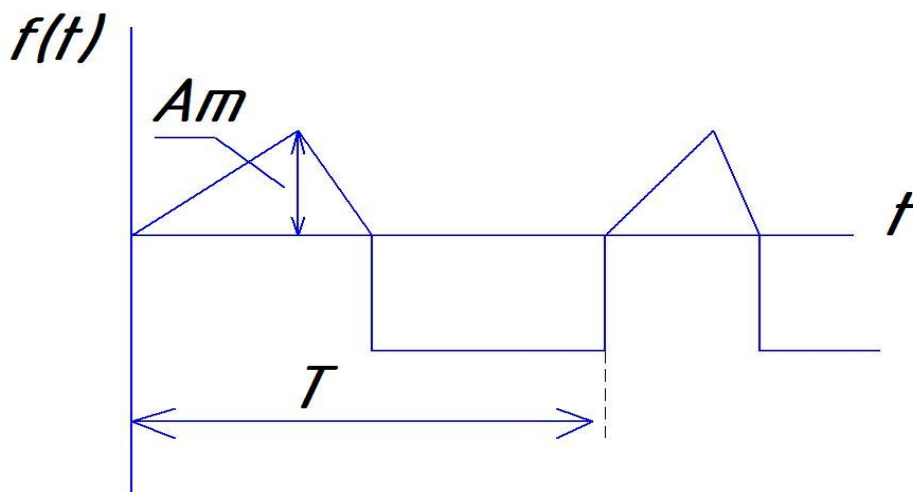


Рис.25.1 несинусоидальная периодическая функция

Для оценки несинусоидальности периодических кривых в электроэнергетике пользуются следующими коэффициентами:

1. Коэф.амплитуды:

$$K_a = \frac{A_m}{A}, \text{ где } K_a = 1,41 \text{ — для синусоиды}$$

2. Коэф.формы:

$$K_f = A/A_{cp} \text{ (} K_f = 1,11 \text{ — для синусоиды)}$$

3. Коэф.искажения:

$$K_u = \frac{A_1}{A}, \text{ где } K_u = 1 \text{ для синусоиды, } A_1 \text{ — действующее значение первой гармоники}$$

4. Коэф.гармоник:

$$K_r = \frac{\sqrt{A_2^2 + A_3^2 + \dots + A_K^2}}{A_1}, A_2, A_3 \text{ — действующее значение высших гармоник. (} K_r = 0 \text{ — для синусоиды)}$$

25.6 Резонансные явления в цепях несинусоидального периодического тока.

При несинусоидальных напряжениях и токах явление резонанса усложняется, т.к. возможны отдельные резонансы гармонических составляющих. Предположим, имеется источник несинусоидального напряжения, состоящего из трех гармоник:

$$U(t) = U_{1m}(\omega t + \varphi_1) + U_{2m}(2\omega t + \varphi_2) + U_{3m}(3\omega t + \varphi_3)$$

Данное напряжение $U(t)$ приложено к цепи, показанной на рис.25.2.

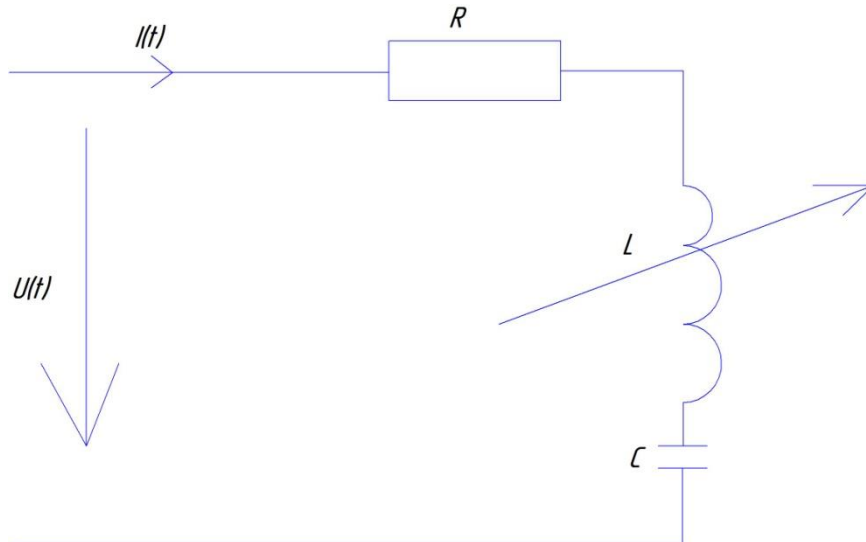


Рис. 25.2

Ток каждой гармоники определяется выражением : $I_k = U_k / \sqrt{R^2 + \left(K\omega L - \frac{1}{K\omega C}\right)^2}$

Известно, что при $X_{lk} = X_{ck}$ в последовательной цепи наступает резонанс напряжений и ток достигает максимального значения. Если в последовательной цепи изменять, например, L от 0 до ∞ , то действующее значение каждой гармоники тока будет изменяться по резонансной кривой.

При $L=0, I_{k0} = U_k / \sqrt{R^2 + \frac{1}{K^2\omega^2 C^2}}$ далее при увеличении L , ток растет и при $X_{lk} = X_{ck}$ наступает резонанс, т.е. ток достигает максимума, при дальнейшем увеличении L ток снижается и стремится к 0 при $L \rightarrow \infty$.

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2}$$

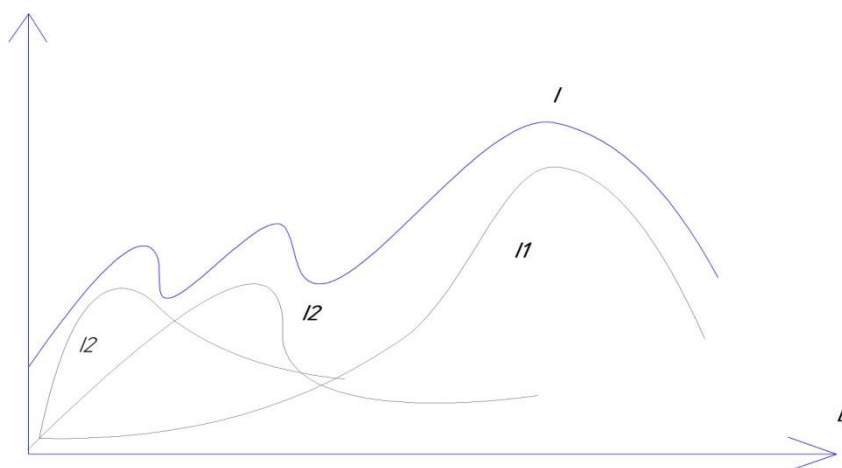


рис. 25.3 резонанс в последовательной цепи

В цепях, содержащих источники несинусоидальных ЭДС и токов, резонансные явления могут применяться, для подавления нежелательных частот.

25.7 Трехфазные цепи с несинусоидальными напряжениями.

В трехфазных цепях кривые напряжения во всех фазах обычно имеют одинаковую форму.

Если напряжения фазные несинусоидальны, то будем иметь:

$$U_A = \sum_1^k U_{km} \sin k\omega t$$

$$U_B = \sum_1^k U_{km} \sin(k\omega t - k120^\circ) \quad (1)$$

$$U_C = \sum_1^k U_{km} \sin(k\omega t + k120^\circ)$$

Анализируя выражения (1) для различных значений k , можно заметить следующее:

- 1) Гармоники кратные трем ($k=3n$, где $n=1,2,3\dots$) во всех фазах имеют одинаковые направления, т.е образуют систему напряжений нулевой последовательности;
- 2) Гармоники с номерами $k=3n+1$, ($n=0,1,2,3\dots$) образуют симметричную систему напряжений прямой последовательности;
- 3) Гармоники с номерами $k=3n+2$ ($n=0,1,2,3\dots$) образуют симметричную систему напряжений обратной последовательности.

(показать на примере!)

Постоянные составляющие напряжений, так же образуют систему нулевой последовательности. В большинстве практических случаев в напряжениях отсутствует как постоянная составляющая, так и четные гармоники.

Рассмотрим различные схемы соединения трехфазных цепей.

Если фазы генератора соединены звездой, то при несинусоидальных фазных напряжениях, линейные напряжения не содержат гармоник кратных трем. Это объясняется тем, что гармоники кратные трем образуют систему нулевой последовательности, а линейные напряжения равны разности соответствующих фазных, т.е. $U_{ab} = U_A - U_B$ и т.д. Таким образом получаем:

$$U_{\phi} = \sqrt{U_1^2 + U_3^2 + U_5^2 + U_7^2 \dots}$$

$$U_L = < \sqrt{3} \sqrt{U_1^2 + U_5^2 + U_7^2 \dots}, \text{ следовательно}$$

$$\frac{U_L}{U_{\phi}} < \sqrt{3}$$

При симметричной нагрузке фазные токи основной частоты и все высшие гармоники, кроме кратных третьей, образуют системы прямой и обратной последовательности и дают в сумме нуль (ток в нулевом проводе). Гармоники кратные трем образуют систему нулевой последовательности, поэтому ток в нулевом проводе равен утроенной сумме токов высших гармоник нулевой последовательности:

$$I_N = 3 \sqrt{I_{03}^2 + I_{09}^2 + I_{015}^2 + \dots}$$

Ток в нулевом проводе даже при симметричной нагрузке может быть не равен 0! При отсутствии нулевого провода токи в фазах не содержат гармоник кратным трем, но

между нулевыми точками генератора и симметричного приемника будет значительное напряжение, содержащее гармоники кратные трем. Если включить вольтметр в открытый треугольник, то он измерит гармоники ЭДС кратные трем:

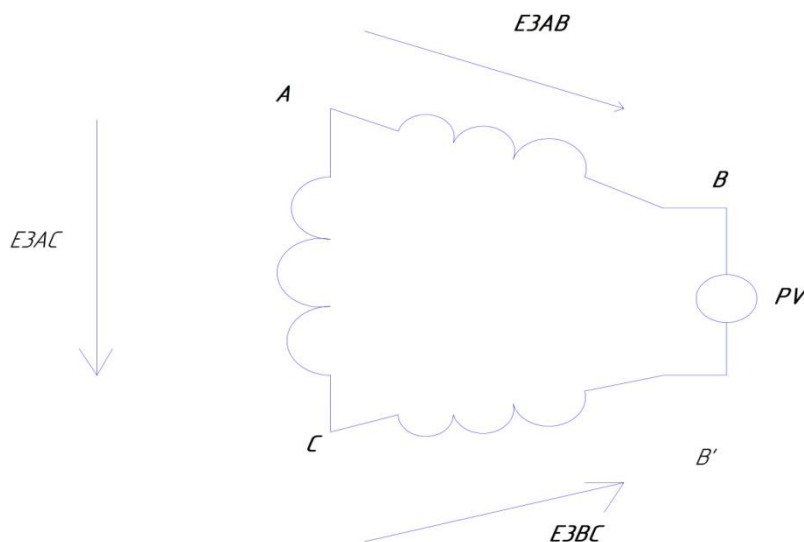


Рис. 26.5 схема открытого треугольника

открытый треугольник с ЭДС содержащий высшие гармоники, применяется как утроитель частоты. Если фазы соединены в замкнутый треугольник, то ЭДС гармоник

кратных трем, вызывают ток, который циркулирует в треугольнике даже в режиме холостого хода генератора.

Вопросы для самоконтроля

1. Чему равна активная мощность в цепи несинусоидального тока?
2. Чему равна реактивная мощность в цепи несинусоидального тока?
3. Какие коэффициенты используются для оценки несинусоидальности периодической кривой?
4. Чем характерны резонансы в несинусоидальных цепях?

Список литературы.

Основная

1. Основы теории цепей. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. М.:Энергия, 2007г, ISBN 5-283-00523-2

Дополнительная

1. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г
2. Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г

Библиографический список

1. Зевеке Г.В. Основы теории цепей [Текст] : учебник для вузов / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов –Изд.5-е перераб.-М.:Энергия, 2007.-528 с.- 50000 экз.- ISBN 5-283-00523-2
2. Теоретические основы электротехники. Нейман Л.Р., Демирчан К.С. Л.: Энергия, 2007г3.
- Теоретические основы электротехники. Бессонов Л.А М.: Высшая школа, 2006г
4. Основы теории электрических цепей Татур Т.А. М.: Высшая школа, 2008г

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Лекция №1 Линейные электрические цепи постоянного тока.....	4
1.1 Электрическая цепь.....	4
1.2 Закон Джоуля – Ленца.....	5
1.3 Линейные и нелинейные элементы.....	5
1.4 Конфигурация схемы электрической цепи.....	5
1.5 Законы Кирхгофа.....	6
Вопросы для самопроверки.....	7
Список литературы.....	7
Лекция 2 Представление реальных источников электрической энергии двумя схемами замещения. Распределение потенциала вдоль участка цепи; закон Ома.....	8
2.1 Последовательная схема замещения	8
2.2 Параллельная схема замещения.....	8
2.3 Распределение потенциала вдоль неразветвленного участка электрической цепи.....	9
2.4 Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС – обобщенный закон Ома.....	10
2.5 Расчет цепей постоянного тока непосредственным применением законов Кирхгофа.....	10
Вопросы для самопроверки.....	11
Список литературы.....	11
Лекция 3 Метод контурных токов.....	12
3.1 Расчет цепей постоянного тока методом контурных токов.....	12
3.2 Методика расчета.....	13
Вопросы для самопроверки.....	14
Список литературы.....	14
Лекция 4 Расчет цепей постоянного тока методом узловых потенциалов. Баланс мощностей. Теорема о компенсации.....	15
4.1 Метод узловых потенциалов.....	15
4.2 Методика расчета.....	16
4.3 Метод двух узлов (частный случай метода узловых потенциалов).....	17
4.4 Уравнение баланса мощностей.....	17
4.5 Теорема о компенсации.....	17
Вопросы для самопроверки.....	18
Список литературы.....	18
Лекция 5 Переменный синусоидальный ток. Способы изображения синусоидального тока.....	19
5.1 Переменный синусоидальный электрический ток.....	19
5.2 Способы изображения синусоидального тока (напряжения).....	19
5.3 Действующее значение синусоидального тока.....	21
Вопросы для самоконтроля.....	22
Список литературы.....	22
Лекция 6. Изображение синусоидальных величин с помощью	

	комплексных чисел. Комплексная амплитуда.....	23
6.1	Изображение синусоидально изменяющейся величины с помощью вращающегося вектора.....	23
6.2	Изображение синусоидально изменяющейся величины на комплексной плоскости.....	23
6.3	Нахождение мгновенных значений токов (напряжений) по комплексной амплитуде.....	24
6.4	Элементы цепи переменного тока.....	24
	Вопросы для самопроверки.....	24
	Список литературы.....	24
	Лекция 7 Свойства элементов цепи переменного синусоидального тока...	25
7.1	Активное сопротивление в цепи переменного синусоидального тока.....	25
7.2	Индуктивный элемент в цепи переменного синусоидального тока.....	25
7.3	Емкостный элемент в цепи переменного синусоидального тока.....	26
	Вопросы для самопроверки.....	27
	Список литературы.....	27
	Лекция 8 Схемы замещения пассивного двухполюсника.....	28
8.1	Последовательная схема замещения.....	28
8.2	Параллельная схема замещения.....	28
8.3	Мгновенная мощность в цепи переменного синусоидального тока.....	29
8.4	Активная мощность.....	30
8.5	Реактивная мощность.....	31
8.6	Полная мощность.....	31
8.7	Полная комплексная мощность.....	32
	Вопросы для самопроверки.....	32
	Список литературы.....	33
	Лекция 9 Трехфазные цепи.....	34
9.1	Понятие «трехфазная цепь».....	34
9.2	Получение трехфазной симметричной синусоидальной системы ЭДС.....	34
9.3	Формы представления трехфазной симметричной синусоидальной системы ЭДС.....	35
9.4	Схема соединения фаз генератора.....	37
	Вопросы для самопроверки.....	38
	Список литературы.....	38
	Лекция 10 Симметричные и несимметричные трехфазные цепи...	39
10.1	Симметричная цепь.....	39
10.2	Расчет трехфазной несимметричной цепи при соединении в звезду при $Z_N = 0$	40
10.3	Расчет несимметричной цепи трехфазной сети при $Z_N \neq 0$	40
	Вопросы для самопроверки.....	41
	Список литературы.....	41
	Лекция 11 Расчет трехфазных цепей при соединении в треугольник.....	42
11.1	Расчет симметричного треугольника.....	42
11.2	Расчет несимметричного треугольника.....	42
11.3	Мощность в трехфазных цепях.....	43
	Вопросы для самопроверки.....	44
	Список литературы.....	44
	Лекция 12 Метод симметричных составляющих.....	45
12.1	Общие положения о методе симметричных составляющих.....	45

12.2	Расчетные выражения для нахождения симметричных составляющих.....	47
	Вопросы для самопроверки.....	48
	Список литературы.....	48
	Лекция 13 Симметричные составляющие.....	49
13.1	Фильтры симметричных составляющих.....	49
13.2	Свойства трехфазных цепей в отношении симметричных составляющих.....	50
13.3	Сопротивления симметричным составляющим.....	50
	Вопросы для самопроверки.....	51
	Список литературы.....	52
	Лекция 14 Расчет несимметричных трехфазных цепей методом симметричных составляющих.....	53
14.1	Сущность метода.....	53
14.2	Методика расчета при симметричной нагрузке и несимметричном источнике.....	53
14.3	Методика расчета трехфазной цепи при несимметричной нагрузке и симметричном источнике.....	55
	Вопросы для самопроверки.....	58
	Список литературы.....	58
	Лекция 15 Вращающееся магнитное поле. Принцип действия АД и СД.....	59
15.1	Магнитное поле катушки.....	59
15.2	Представление пульсирующего магнитного поля двумя ..вращающимися полями.....	59
15.3	Получение вращающегося магнитного поля.....	60
15.4	Принцип действия асинхронного двигателя.....	60
15.5	Принцип действия синхронного двигателя.....	61
	Вопросы для самоконтроля.....	62
	Список литературы.....	62
	Лекция 16 Переходные процессы в линейных электрических цепях.....	63
16.1	Причины возникновения переходных процессов.....	63
16.2	Законы коммутации.....	63
16.3	Переходный процесс при включении С на постоянное напряжение.....	65
	Вопросы для самоконтроля.....	66
	Список литературы.....	66
	Лекция 17 Классический метод расчета переходных процессов.....	67
17.1	Методика расчета.....	67
	Вопросы для самоконтроля.....	69
	Список литературы.....	69
	Лекция 18 Аperiodический и колебательный разряд конденсатора.....	70
18.1	Общие положения.....	70
18.2	Аperiodический разряд конденсатора.....	71
18.3	Колебательный разряд конденсатора.....	72
	Вопросы для самопроверки.....	73
	Список литературы.....	73
	Лекция 19 Включение R, L цепи на синусоидальное напряжение.....	74
19.1	Включение R, L цепи на синусоидальное напряжение.....	74

	Вопросы для самопроверки.....	75
	Список литературы.....	75
	Лекция 20 Нелинейные электрические цепи.....	76
20.1	Общие положения.....	76
20.2	Графический метод расчета нелинейных цепей постоянного тока..	77
	Вопросы для самопроверки.....	80
	Список литературы.....	80
	Лекция 21 Аналитический метод расчета нелинейных цепей постоянного тока.....	82
21.1	Статическое сопротивление.....	82
21.2	Дифференциальное сопротивление.....	82
21.3	Замена Н.Э. линейным сопротивлением и ЭДС.....	83
21.4	Нелинейные электрические цепи переменного тока.....	84
	Вопросы для самоконтроля.....	84
	Список литературы.....	84
	Лекция 22 Магнитные цепи при постоянном магнитном потоке....	85
22.1	Магнитная цепь.....	85
22.2	Закон полного тока.....	85
22.3	Закон Ома для магнитной цепи.....	86
22.4	Законы Кирхгофа для магнитной цепи.....	86
22.5	Свойства ферромагнитных материалов.....	87
	Вопросы для самоконтроля.....	88
	Список литературы.....	88
	Лекция 23 Расчет магнитной цепи.....	89
23.1	Решение прямой задачи при расчете неразветвленной магнитной цепи.....	89
23.2	Решение обратной задачи при расчете неразветвленной магнитной цепи.....	89
	Вопросы для самопроверки.....	90
	Список литературы.....	90
	Лекция 24 Линейные цепи с периодическими несинусоидальными токами.....	91
24.1	Причины возникновения периодических несинусоидальных токов(напряжений).....	91
24.2	Аналитическое представление периодической несинусоидальной функции.....	91
24.3	Частотные спектры несинусоидальной периодической функции.....	91
24.4	Методика расчета линейных цепей с несинусоидальными токами (U, ЭДС).....	92
	Вопросы для самоконтроля.....	94
	Список литературы.....	94
	Лекция 25 Мощности в цепях несинусоидального тока.....	95
25.1	Активная мощность.....	95
25.2	Реактивная мощность.....	95
25.3	Полная мощность.....	95
25.4	Расчет цепей несинусоидального тока с помощью эквивалентных синусоид.....	95
25.5	Коэффициенты, характеризующие форму несинусоидальных периодических кривых.....	96
25.6	Резонансные явления в цепях несинусоидального периодического тока.....	97
25.7	Трехфазные цепи с несинусоидальными напряжениями.....	98

Вопросы для самоконтроля.....	100
Список литературы.....	100
Библиографический список.....	100
Содержание.....	101