МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ
Проректор
_____ Т.Ю. Ткачева
«_2_» _11_ 2026

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания к выполнению практических занятий
для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика
и электротехника

Курск 2026

УДК 621.311
М 54
Составители: И.В. Ворначева, Д.В. Куделина, В.О. Поданов, В.А. Чаплыгин

Рецензент:
Кандидат технических наук, доцент кафедры
«Электроэнергетика и электротехника» *О.М. Ларин*

Теоретические основы электротехники: методические указания к практическим занятиям/ Юго-Зап. гос. ун-т; сост. И.В. Ворначева, Д.В. Куделина, В.О. Поданов, В.А. Чаплыгин. – Курск, 2026. – 46 с.: ил. 26. – Библиогр.: с. 46

Содержат сведения и теоретический материал, необходимый для выполнения практических занятий.

Предназначены для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 2.11.26 . Формат 60х84 1/16.
Усл.печ.л. 2,7. .Уч.–изд.л. 2,4 Тираж 100 экз. Заказ. 444
Бесплатно.
Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №1

ЗАКОНЫ ОМА И КИРХГОФА. ОБОБЩЕННЫЙ ЗАКОН ОМА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛОВ

Цель работы: *ознакомление с расчетом электрических цепей по обобщенным законам Ома и Кирхгофа.*

Краткие методические указания

Электрической цепью называется совокупность устройств, служащих для протекания электрического тока. Основными элементами электрической цепи являются: источники энергии, приёмники и провода их соединяющие.

Закон Ома.

Закон Ома для участка цепи: ток в проводнике I равен отношению падения напряжения U на участке цепи к её электрическому сопротивлению R

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

Обобщенный закон Ома для замкнутой электрической цепи(рис.1)

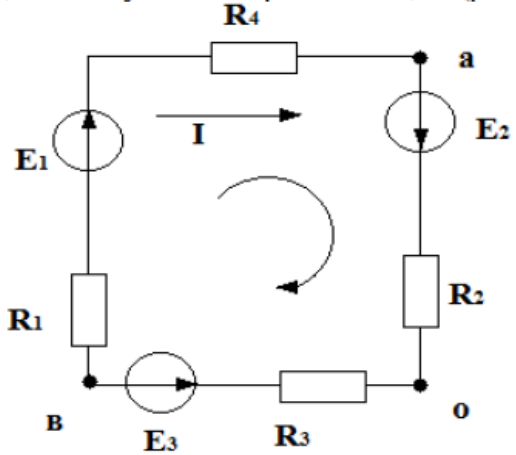


Рис.1. Одноконтурная цепь постоянного тока.

$$I = \frac{E_1 + E_2 - E_3}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4}$$

Закон Ома для участка цепи, содержащего ЭДС.

Выбираем участок *а - о - в*(рис. 1). Закон Ома для этого участка записывается в следующем виде:

$$I = \frac{U_{ab} + E_2 - E_3}{R_1 + R_2}$$

Со знаком плюс берут те ЭДС, которые совпадают с направлением тока и со знаком минус - ЭДС с противоположным направлением.

Законы Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа, алгебраическая всех токов, втекающих в узел равна нулю. Токи, втекающие в узел условно принимаются положительными, а вытекающие из него отрицательными или наоборот (рис. .2).

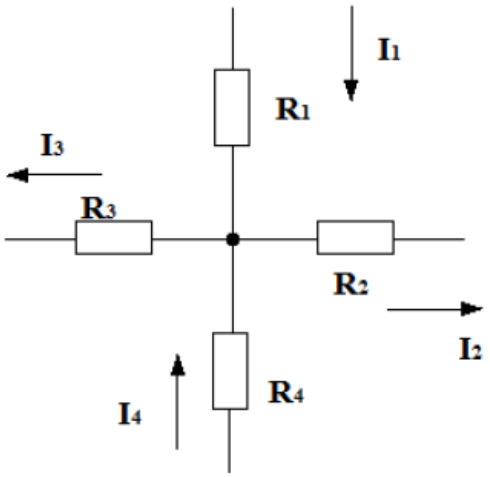


Рис.2. Иллюстрация к первому закону Кирхгофа

По первому закону Кирхгофа:

$I_1+I_4-I_2-I_3=0$.

Число уравнений $К_1$ составленных по первому закону Кирхгофа для электрической схемы на единицу меньше числа её узлов У:

$К_1=У-1$.

Второй закон Кирхгофа: Алгебраическая сумма напряжений на элементах, входящих в замкнутый контур, равна алгебраической сумме ЭДС, включенных в этот контур:

По первому закону Кирхгофа:

$I_1+I_4-I_2-I_3=0$.

Число уравнений $К_1$ составленных по первому закону Кирхгофа для электрической схемы на единицу меньше числа её узлов У:

$К_1=У-1$.

Второй закон Кирхгофа: Алгебраическая сумма напряжений на элементах, входящих в замкнутый контур, равна алгебраической сумме ЭДС, включенных в этот контур:

$$\sum_{k=1}^{n} I_k R_k = \sum_{k=1}^{n} E_k$$

При применении Второго закона Кирхгофа необходимо учитывать направление ЭДС и выбранное направление токов. Направление обхода контура выбираем произвольно. ЭДС, направление которых совпадают с выбранным направлением обхода независимо от направления протекающего через них токов, принимаются положительными, а ЭДС обратного направления принимаются отрицательными. Падение напряжения IR на тех участках, в которых направление тока совпадают с направлением обхода, берутся со знаком плюс, и со знаком минус - на участках, в которых положительное направление тока противоположно направлению .

Порядок выполнения работы

1.Ознакомиться с методикой использования обобщенного закона Ома.

2.Ознакомиться с методикой расчета электрических цепей с помощью законов Кирхгофа.

3.Изучить формулы для расчета.

Контрольные вопросы

1.Обобщенный закон Ома применяют для участка цепи или для замкнутого контура.

2.Зависимость знака ЭДС источника от направления тока.

3.Что представляет собой режим холостого хода и короткого замыкания.

4.Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа. Чем отличается второй закон Кирхгофа от закона Ома для полной цепи.

5.Сколько уравнений составляется для цепи, содержащей источники напряжения и тока, по первому и второму законам Кирхгофа.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №2

МЕТОД КОНТУРНЫХ ТОКОВ. МЕТОД КОНТУРНЫХ ТОКОВ С ИСТОЧНИКОМ ТОКА. БАЛАНС МОЩНОСТЕЙ

Цель работы: *Ознакомление с методом контурных токов, методом контурных токов с источником тока и балансом мощностей.*

Краткие методические указания

Метод контурных токов.

По данному методу в замкнутых контурах определяются расчетные (а не реальные) контурные токи. Реальные контурные токи в смежных ветвях находятся как алгебраическая сумма контурных токов. В несмежных ветвях реальные токи будут равняться контурным. По методу контурных токов надо составить такое количество уравнений, какое необходимо составить для дайной электрический схемы но второму закону Кирхгофа.

Рассмотрим электрическую схему (рис. 3) с двумя независимыми контурами I и II.

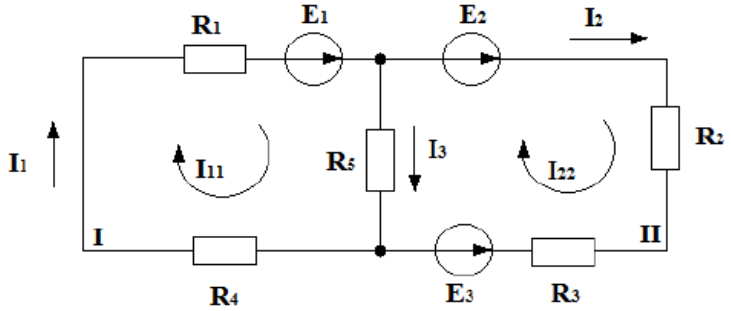


Рис. .3. Электрическая схема к расчету методов контурных токов.

Для схемы на рис.3 запишем систему уравнений методу контурных токов в виде

$$I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} = E_{11},$$
$$I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} = E_{22},$$

где собственные сопротивления контуров

$$R_{11} = R_1 + R_4 + R_5, \qquad R_{22} = R_2 + R_3 + R_5.$$

Они равны сумме сопротивлений, входящих в контуры и всегда положительны.

Взаимные сопротивления

$R_{12} = R_{21} = (-R_5)$.

Взаимные сопротивления, если контурные токи по смежным сопротивлениям протекают в одну сторону положительные, если - в разные стороны, то отрицательные.

Контурные ЭДС равны алгебраической сумме ЭДС, входящих в контур.

$$E_{11} = E_1, \quad E_{22} = E_2 - E_3$$

Со знаком плюс входят те ЭДС направления, которых совпадают с направлением обхода контура и со знаком минус, если - не совпадают.

После определения контурных токов находят действительные токи в ветвях.

$$I_1 = I_{11}, \qquad I_2 = I_{22}$$

В смежных ветвях действительный ток равен алгебраической сумме токов.

$$I_3 = I_{11} - I_{22}$$

При «n»независимых контуров, число уравнений также равно «n»

$$I_{11}R_{11} + I_{22}R_{12} + I_{33}R_{13} + \cdots + I_{nn}R_{1n} = E_{11}$$
$$I_{11}R_{21} + I_{22}R_{22} + I_{33}R_{23} + \cdots + I_{nn}R_{2n} = E_{22}$$
$$I_{11}R_{31} + I_{22}R_{32} + I_{33}R_{33} + \cdots + I_{nn}R_{3n} = E_{33}$$
$$I_{11}R_{n1} + I_{22}R_{n2} + I_{33}R_{n3} + \cdots + I_{nn}R_{nn} = E_{nn}$$

R_{nn} ,R_{mn} – соответственно собственные и взаимные сопротивления контуров.

E_{nn} - контурные ЭДС

Энергетический баланс в электрических цепях постоянного тока.

При протекании тока по сопротивлению в нём выделяется тепло. На основании закона сохранения энергии количество тепла, выделяющегося в единицу времени должно равняться энергии, доставляемой за тоже время источником питания.

Если в цепи направление тока совпадает с направлением Э.Д.С., то источник отдаёт в цепь мощность P=EI и P входит с плюсом в уравнение энергетического баланса.

Если в цепи направление тока противоположно направлению Э.Д.С., то источник Э.Д.С. не поставляет энергию, а потребляет её (зарядка аккумулятора) и P=EI войдёт в уравнение энергетического баланса со знаком минус.

Уравнение энергетического баланса при питании только от источников Э.Д.С. имеет вид

$\sum I^2R = \sum EI.$

Если в схеме есть источник тока J и ток от источника подтекает к узлу a и вытекает из узла b тогда баланс мощностей имеет вид

$\sum I^2R = \sum EI + \sum U_{ab}J.$

Порядок выполнения работы

1.Для заданных преподавателем электрических цепей с источниками ЭДС определить токи в ветвях

2.Для заданных преподавателем электрических цепей с источниками ЭДС и тока

определить токи в ветвях

3.Сформулировать правила перехода от контурных токов к действительным

4.Составить баланс мощности для заданных схем.

Контрольные вопросы

1.В чем заключается отличие метода контурных токов от метода расчета с использованием законов Кирхгофа для аналогичных цепей.

2.Написать выражение баланса мощности для цепи постоянного тока с источниками ЭДС и тока.

3.В каких режимах работают источники ЭДС если их направления и направление тока совпадают и если противоположны.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №3

СВЁРТЫВАНИЕ ПАССИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ. МЕТОД УЗЛОВЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ И МЕТОД ДВУХ УЗЛОВ

Цель работы: *Ознакомление со способами упрощения пассивных электрических цепей.*

Краткие методические указания

Метод двух узлов.

Если схема имеет только два узла (рис. 4), то для определения токов используют метод двух узлов (частный случай метода узловых потенциалов)

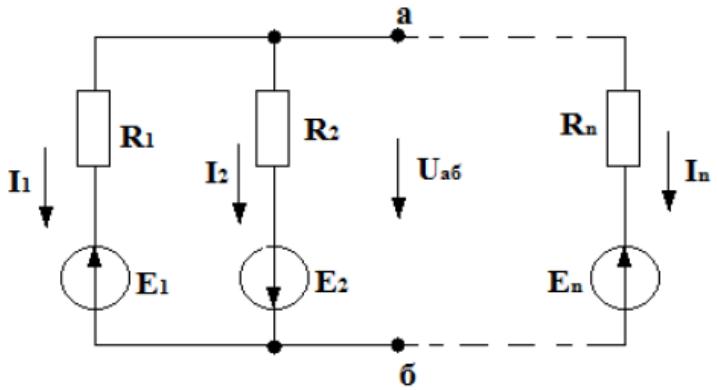


Рис. 4. Электрическая схема, имеющая два узла.

Напряжения между узлами «а» и «б»

$$U_{ab} = \frac{E_1\frac{1}{R_1} - E_2\frac{1}{R_2} + \cdots + E_n\frac{1}{R_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \cdots + \frac{1}{R_n}} = \frac{\sum_{k=1}^{n} E_k\frac{1}{R_k}}{\sum_{k=1}^{n}\frac{1}{R_k}}.$$

Узловой ток$E_k\frac{1}{R_k}$ берётся с плюсом, если ЭДС E_k направлена в узел «а», и со знаком минус, если ЭДС направлен из узла «а».

Ток в «к» ветви по обобщенному закону Ома для участка цепи, содержащего ЭДС

$$I_k = \frac{U_{ab} \pm E_k}{R_k}$$

Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду и соединение звездой в эквивалентный треугольник.

В ряде случаев для упрощения расчёта электрических схем целесообразно заменить соединение сопротивление звездой (рис.5 а) на треугольник (рис.5 б) и наоборот.

Такая замена должна быть эквивалентной, т.е. в этом случае потенциалы узлов φ1, φ2, φ3 или тоже что и токи, $\boldsymbol{I_1, I_2, I_3}$ в остальной части схемы после преобразования должны оставаться неизменными. Это возможно в том случае, если при заданных сопротивлениях звезды R_1, R_2, R_3, сопротивления сторон эквивалентного треугольника пересчитываются по формулам:

$$\boldsymbol{R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 R_2}{R_3}}, \qquad \boldsymbol{R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 R_3}{R_1}}, \qquad \boldsymbol{R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 R_1}{R_2}}.$$

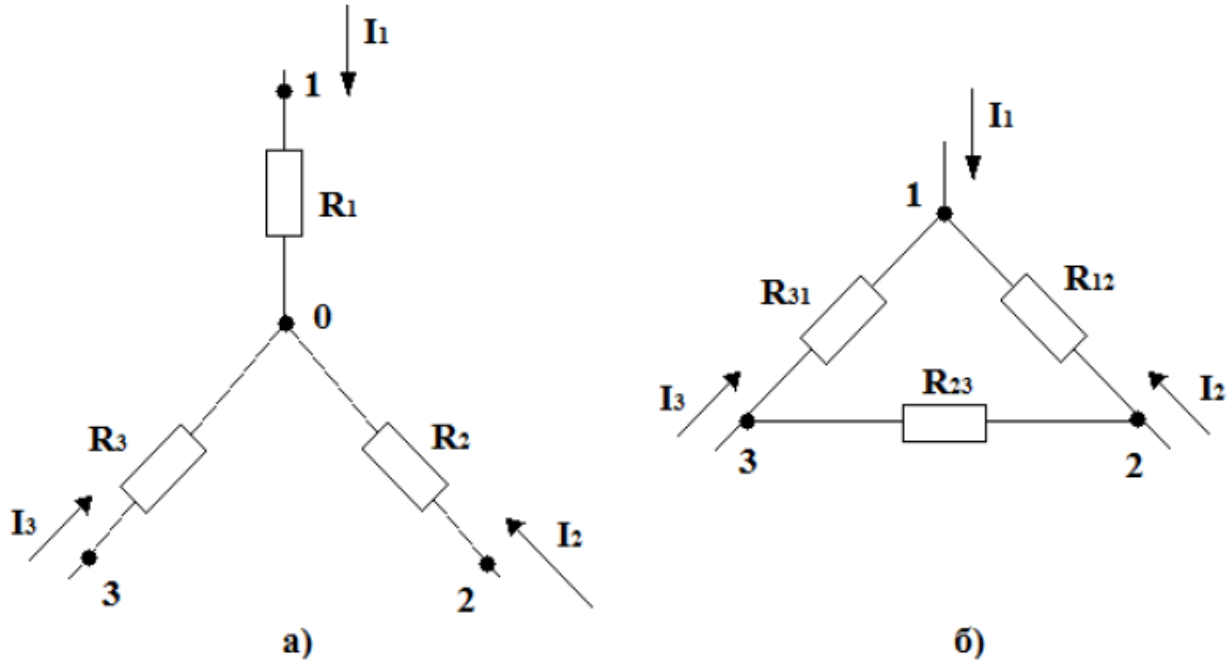


Рис .5

При заданных сопротивлениях сторон треугольника R_{12}, R_{23}, R_{31} сопротивления лучей эквивалентной звезды должны быть вычислены по формулам:

$$R_1 = \frac{R_{12}R_{31}}{m}, \qquad R_2 = \frac{R_{23}R_{12}}{m}, \qquad R_3 = \frac{R_{23}R_{31}}{m}, \qquad m = R_{12} + R_{23} + R_{31}.$$

Порядок выполнения работы

1. По заданным преподавателем схемам определить сопротивление цепи относительно различных узлов.

2.По заданным преподавателем схемам определить напряжение между двумя узлами.

3.По найденному напряжению определить токи в ветвях.

Контрольные вопросы

1.Какие ветви называют пассивными.

2.Сколько узлов должно быть в схеме, чтобы определять напряжение методом двух узлов

3.По какому закону определяют токи в ветвях.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №4

МЕТОД ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА

Цель работы: *Ознакомление с методом расчета тока в одной ветви.*

Краткие методические указания

Метод эквивалентного генератора.

Метод эквивалентного генератора обычно используется при определении тока только в одной какой-либо ветви. Для этого выделяют ветвь, в которой необходимо найти ток, и рассматривают всю остальную цепь по отношению к выделенной ветви в виде активного двухполюсника.

Определим ток I5 в цепи (рис. 6) методом эквивалентного генератора.

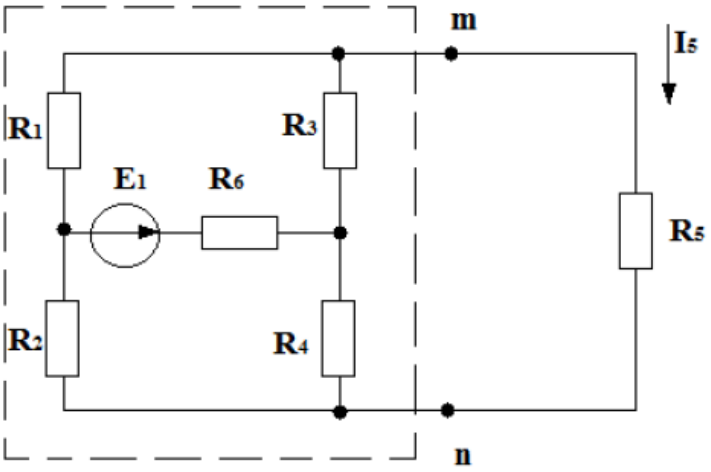


Рис.6. Электрическая цепь к расчету тока методом эквивалентного генератора.

Выделяем ветвь с сопротивлением R_5.

$$I_5 = \frac{U_{mnxx}}{R_{вн} + R_5}$$

гдеU_{mnxx} - напряжение между точками «m» и «n» двухполюсника при разомкнутой ветви с сопротивлением R_5.

$R_{вн}$- внутреннее сопротивление пассивного двухполюсника по отношению к зажимам «m» и «n».

Активный двухполюсник можно рассматривать по отношению к ветви с сопротивлением R_5 как эквивалентный генератор с ЭДС, равной *Umxx* и внутренним сопротивлениями *Rвн*. Внутреннее сопротивление активногодвухполюсника(эквивалентного генератора) можно определить либо расчетным путём, либо экспериментально - по опыту короткого замыкания $I_{кз}$:

$$R_{вн} = \frac{U_{mnxx}}{I_{кз}}$$

Расчетным путём *Rвн* можно определить также следующим образом: устраняют из схемы активного двухполюсника все источники (ветви с источниками тока разрываются, а источники ЭДС в ветвях закорачиваются) и определяют сопротивление пассивного двухполюсника относительно точек m, n.

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем схемы электрической цепи определить токи в различных ветвях.

2.Научиться применять оптимальные методы расчета для определения напряжения холостого хода и внутреннего сопротивления.

Контрольные вопросы

1.Когда используется расчет цепи методом эквивалентного генератора.

2.Как определяют напряжение холостого хода.

3.Этапы определения внутреннего сопротивления.

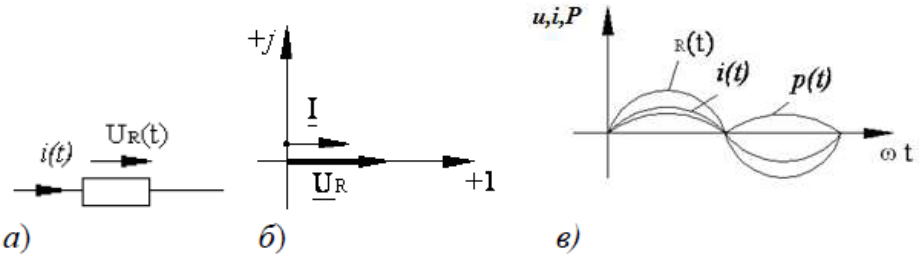
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

РАСЧЕТ ПРОСТЕЙШИХ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА МЕТОДОМ СВЕРТЫВАНИЯ

Цель работы: *Ознакомление с расчетом электрических схем методом свёртывания, анализ полученных результатов.*

Краткие методические указания

Резистор в цепи синусоидального тока.



а) *б)* *в)*

Рис. 7. Векторная и волновая диаграмма цепи с резистором.

На (рис.7*а*) изображен резистор сопротивления R, по которому течет ток $i(t)=I_m \sin\omega t$.

По закону Ома напряжение на резисторе:

$$u_R(t)= i(t)\cdot R=RI_m \sin\omega t \text{ или } u_R(t)= U_m \sin\omega t, \text{ где } U_m= RI_m$$

Мгновенная мощность.

$$p=U_m I_m \sin^2\omega t=\frac{U_m I_m}{2}(1-\cos 2\omega t).$$

Мгновенная мощность имеет постоянную составляющую $\frac{U_m I_m}{2}$ и переменную $\frac{U_m I_m}{2}\cos 2\omega t$, изменяющуюся с частотой 2ω.

Активная мощность P(Вт) равняется среднему значению мгновенной мощности P за период.

$$P = UI\cos\varphi,$$

где действующее значение соответственно напряжения и тока равны

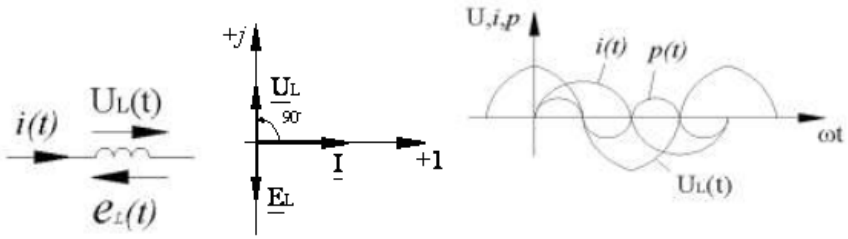
$$U=\frac{U_m}{\sqrt{2}}, \qquad I=\frac{I_m}{\sqrt{2}}.$$

φ - угол сдвига фаз между током и напряжением.

На рис.7*в* даны кривые мгновенных значений тока i, напряжение u и мгновенной мощности p. Из рис.7*в* видно, что в цепи синусоидального тока с резистором, ток i и напряжение на резисторе u_R совпадают по фазе.

Индуктивная катушка в цепи синусоидального тока.

Любая обмотка (катушка) обладает некоторой индуктивностью L и активным сопротивлением R. Рассмотрим одну индуктивность L(без активного сопротивления) – рис.8*а*.



а) *б*) *в*)

Рис.8. Векторная и волновая диаграмма цепи с индуктивностью.

Если через L течет ток $i=I_m \sin\omega t$, то в катушке наводиться ЭДС самоиндукции:

$$\ell_L = -L\frac{di}{dt} = -\omega L I_m \sin\left(\omega t - 90^\circ\right).$$

Напряжение на индуктивности $u_L = -\ell_L = L\frac{di}{dt}$.

$$u_L = -\omega L I_m \sin\left(\omega t + 90^\circ\right) = U_m \sin\left(\omega t + 90^\circ\right),$$

где $U_m=X_L I_m$, $X_L=\omega L$[Ом] - индуктивное сопротивление.

Напряжение на индуктивности опережает ток на 90° (рис.8*в*)

Мгновенная мощность (рис.8*в*)

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

Таким образом, за полным период T, как видно из графика, средняя (активная) мощность в индуктивности равна нулю, т.е. никаких превращений электрической энергий в тепловую или механическую не будет. Чтобы оценить с количественной стороны меру скорости такого обмена энергий между источником и индуктивностью, вводят понятие реактивной мощности Q *(Вар)*

$$Q = UI\sin\varphi.$$

Реактивная мощность для цепи с индуктивностью определяется также по формуле

$$Q = I^2 X_L = U^2 b_L.$$

Конденсатор в цепи синусоидального тока.

Если приложенное к конденсатору ёмкостью C напряжение не меняется во времени, то заряд $+q = Cu$ на одной его обкладке и заряд $- q = -Cu$ на другой неизменны и ток через конденсатор не проходит ($i = \frac{dq}{dt} = 0$).

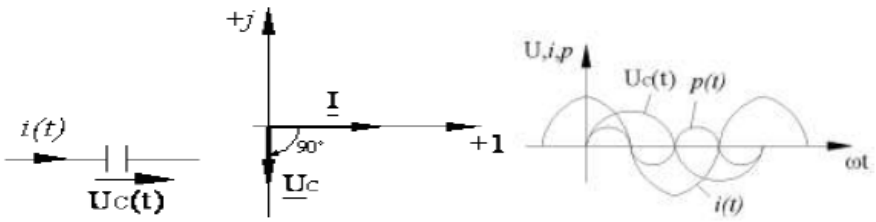
Если же напряжение на конденсаторе меняется во времени, например по синусоидальному закону: $u_c(t)=U_m \sin\omega t$, то по синусоидальному закону будет меняться и заряд q конденсатора:

$q=cu=C\ U_m\ \sin\omega t$ и конденсатор будет периодически перезаряжаться. Периодическая перезарядка конденсатора сопровождается протеканием через него зарядного тока

$$i = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}(CU_m \sin \omega t) = \omega C U_m \sin(\omega t + 90^\circ) = I_m \sin(\omega t + 90^\circ),$$

где $I_m = \frac{1}{X_C} \cdot U_m$, $X_C = \frac{1}{\omega C}$ [Ом] - емкостное сопротивление.

т.е. ток через конденсатор опережает по фазе напряжение на конденсаторе на 90° (рис. 1.9*а*).



а) *б*) *в*)

Рис.9. Векторная и волновая диаграмма цепи с емкостью.

Мгновенная мощность (рис.9*в*)

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

Как и для цепи с индуктивным, так и с емкостным сопротивлением, активная(средняя) мощность равна нулю, а реактивная мощность определяется по формуле:

$$Q = UI\sin\varphi = I^2 X_c = U^2 bc.$$

Векторная диаграмма цепи с емкостью показана на (рис.9.*б*)

Порядок выполнения работы

1.Для заданных преподавателем схем произвести их свертывание.

2.Определить активную мощность, потребляемую цепью.

3.Определить индуктивное, емкостное, реактивное сопротивление цепи.

4.Определить реактивную мощность цепи.

Контрольные вопросы

1.Угол сдвига фаз между током и напряжением в активном сопротивлении.

2.Как мощность потребляют активные сопротивления.

3. Угол сдвига фаз между током и напряжением в индуктивном сопротивлении.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

АНАЛИЗ ЦЕПЕЙ СО ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИЕЙ

Цель работы: *Ознакомление с методами расчета электрических схем со взаимной индукцией, анализ полученных результатов.*

Краткие методические указания

При наличии двух или более индуктивных катушек с общим магнитным потоком напряжение в любой из таких катушек зависит от изменения не только тока, проходящего через катушку, но и от токов, проходящих через другие катушки. Наведение ЭДС в одной электрической цепи при изменении в ней потокосцепления, вызванного изменением тока i в другой цепи, называют явлением взаимной индукции. Рассмотрим особенности составления уравнений для линейных цепей с взаимной индуктивностью. Пусть через катушку 1 (рис.10,а) с индуктивностью L_1 проходит ток i_1.

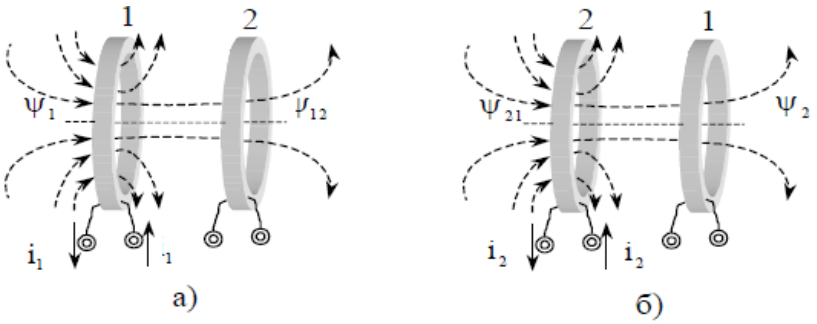


Рис.10. Цепи с взаимной индуктивностью

Пусть через катушку 2 (рис.10,а) с индуктивностью L2 проходит ток i2

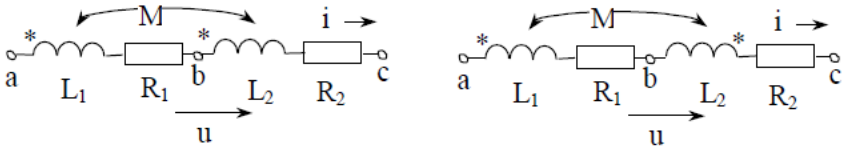
Отношение между напряжениями и токами на внешних зажимах индуктивностей:

$$\begin{cases} U_1 = L_1 \dfrac{di_1}{dt} \pm M \dfrac{di_2}{dt}, \\ U_2 = L_2 \dfrac{di_2}{dt} \pm M \dfrac{di_1}{dt}. \end{cases}$$

Знак + в системе уравнений соответствует согласному включению катушек, знак – встречному включению. При согласном включении токи направлены в одноимённые зажимы катушек (обозначены точкой или звёздочкой) при этом потоки самоиндукции и взаимоиндукции складываются, при встречном включении токи направлены в разноимённые зажимы катушек при этом потоки самоиндукции и взаимоиндукции вычитаются. M – взаимоиндуктивность катушек. Степень индуктивной связи двух элементов цепи характеризуют коэффициентом связи k, под которым понимают отношение:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}.$$

Предположим, что два приемника энергии, обладающие сопротивлениями R_1 и R_2 , индуктивностями L_1 и L_2 и взаимной индуктивностью M, соединены последовательно.



а) б)

Рис.11. Согласное и встречное включение последовательных индуктивно связанных катушек

При согласном включении (рис.11а) напряжение

$$\underline{U} = R_1\underline{I} + j\omega L_1\underline{I} + j\omega M\underline{I} + R_2\underline{I} + j\omega L_2\underline{I} + j\omega M\underline{I} = \underline{I}\underline{Z}_{согл.},$$

$$\underline{Z}_{согл.} = [(R_1 + R_2) + j(\omega L_1 + \omega L_2 + 2\omega M)],$$

где $\underline{Z}_{согл.}$ - полное сопротивление цепи при согласованном включении катушек.

При встречном включении (рис.18,б) напряжение

$$\underline{U} = R_1\underline{I} + j\omega L_1\underline{I} - j\omega M\underline{I} + R_2\underline{I} + j\omega L_2\underline{I} - j\omega M\underline{I} = \underline{I}\underline{Z}_{встр.},$$

$$\underline{Z}_{встр.} = [(R_1 + R_2) + j(\omega L_1 + \omega L_2 - 2\omega M)],$$

где $\underline{Z}_{встр.}$ - полное сопротивление цепи при встречном включении катушек.

Сравнивая уравнения видим, что полное сопротивление $\underline{Z}_{согл} > \underline{Z}_{встр.}$

Предположим, что два приемника энергии, обладающие сопротивлениями R_1 и R_2, индуктивностями L_1 и L_2 и взаимной индуктивностью M, соединены параллельно, причем одноименные зажимы присоединены к одному и тому же узлу

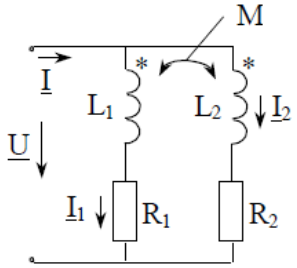


Рис.12. Схема параллельного согласного включения двух катушек

При выбранных положительных направлениях токов и напряжения:

$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2$;

$\underline{U} = \underline{Z}_1\underline{I}_2 + \underline{Z}_M\underline{I}_2$;

$\underline{U} = \underline{Z}_M\underline{I}_1 + \underline{Z}_2\underline{I}_2$,

где $\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1$; $\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2$; $\underline{Z}_M = j\omega M$.

В этих уравнениях комплексные напряжения $\underline{Z}_M\underline{I}_1$ и $\underline{Z}_M\underline{I}_2$ взяты со знаком плюс, так как положительные направления этих напряжений (выбранные сверху вниз) и тех токов, от которых эти напряжения зависят, ориентированы относительно одноименных зажимов одинаково.

Решая уравнения получаем, получаем:

$$\begin{cases} \underline{I}_1 = \dfrac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}\underline{U}; \\ \underline{I}_2 = \dfrac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}\underline{U}; \\ \underline{I} = \dfrac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}\underline{U}; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \underline{I}_1 = \dfrac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}\underline{U}; \\ \underline{I}_2 = \dfrac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}\underline{U}; \\ \underline{I} = \dfrac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M}{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}\underline{U}; \end{cases}$$

откуда следует, что входное комплексное сопротивление рассматриваемой цепи

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M}.$$

При $\underline{Z}_M = 0$, т.е. при отсутствии индуктивной связи между ветвями, это выражение принимает знакомый вид:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_1\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

Рассмотрим двух обмоточный трансформатор (рис. 13). Обмотка трансформатора, к которой подводится питание, называется первичной обмоткой, к которой присоединяется приёмник - вторичной. Напряжения и токи в этих обмотках называют соответственно первичными и вторичными токами и напряжениями. Цепи, в состав которых входят первичная и вторичная обмотки, называют соответственно первичной и вторичной цепями трансформатора.

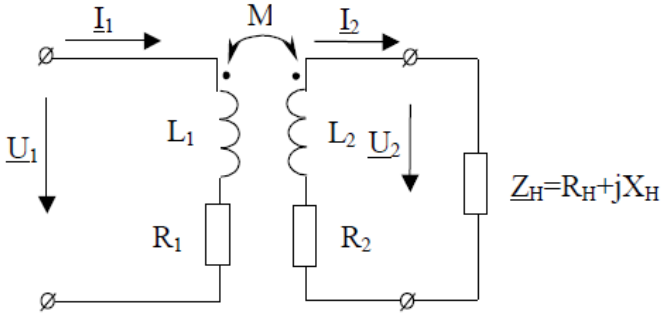


Рис. 13.Схема двухобмоточного трансформатора

Обозначим: $\omega L_1 = X$, $R_2 + R_н = R_{22}$, $\omega L_2 + X_н = X_{22}$, где $R_н$ и $X_н$ - активные и реактивные сопротивления нагрузки.

Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для первичного и вторичного контуров:

$$\begin{cases} R_1\underline{I}_1 + jX_i\underline{I}_1 - j\omega M\underline{I}_2 = \underline{U}_1, \\ R_2\underline{I}_2 + jX_{22}\underline{I}_2 - j\omega M\underline{I}_1 = 0. \end{cases}$$

Решения уравнения относительно тока $\underline{I}_1$ получаем:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{(R_1 + R_{вн}) + j(X_1 + X_{вн})},$$

где $R_{вн} = \dfrac{\omega^2 M}{R_{22}^2 + X_{22}^2}R_{22}$; $\quad X_{вн} = \dfrac{\omega^2 M_2}{R_{22}^2 + X_{22}^2}X_{22}$.

Сопротивления $R_{вн}$ и $X_{вн}$ называют вносимыми активным и реактивным сопротивлениями. Во вносимом активном сопротивлении поглощается энергия, которая передаётся из первичной цепи во вторичную. Вносимое реактивное сопротивление имеет знак, противоположный X_{22}.

Построим для трансформатора векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 14).

Сопротивления $R_{вн}$ и $X_{вн}$ называют вносимыми активным и реактивным сопротивлениями. Во вносимом активном сопротивлении поглощается энергия, которая передаётся из первичной цепи во вторичную. Вносимое реактивное сопротивление имеет знак, противоположный X_{22}.

Построим для трансформатора векторную диаграмму токов и напряжений (рис. 14).

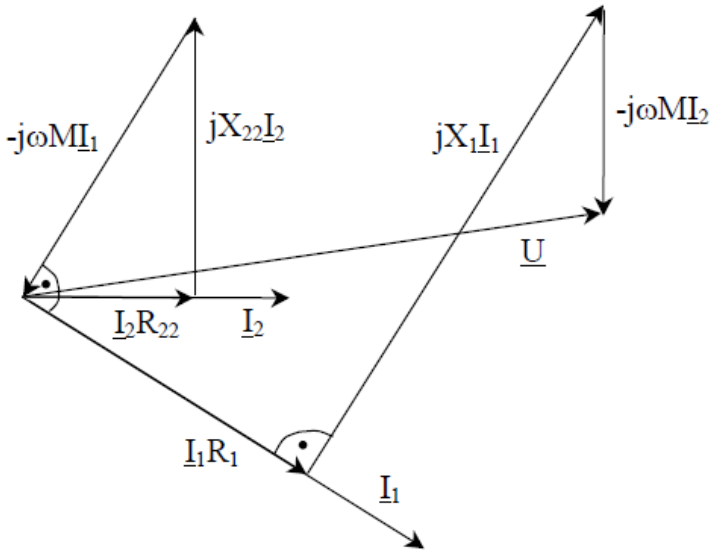


Рис. 14. Векторная диаграмма воздушного трансформатора

Зададимся током $\underline{I}_2$ и отложим в масштабе векторы $\underline{I}_2$, $\underline{I}_2R_{22}$, $jX_{22}\underline{I}_2$ и вектор $-j\omega M\underline{I}_1$ (здесь принято, что $X_H>0$). Вектор $\underline{I}_1$ отложим под углом $\pi/2$ в сторону опережения к вектору $(-j\omega M\underline{I})$.

Затем построим векторы $R_1\underline{I}_1$, $jX_1\underline{I}_1$ и $(-j\omega M\underline{I}_2)$, который отстаёт от вектора тока $\underline{I}_2$ на $\pi/2$.

Если вторичная обмотка трансформатора разомкнута (режим х.х.), то уравнения, описывающие первичную и вторичную обмотки трансформатора следующие:

$$R_1\underline{I}_1 + jX_1 = \underline{U}_1,$$

$$j\omega M\underline{I}_1 = \underline{U}_2,$$

где $\underline{U}_2$ -напряжение на зажимах разомкнутой вторичной обмотки трансформатора.

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем последовательной цепи при согласном включении определить ток и напряжения элементах.

2.Для заданной преподавателем последовательной цепи при встречном включении определить ток и напряжения элементах

3.Для заданной преподавателем параллельной цепи при согласном или встречном включении определить токи и напряжения элементах.

4.При активном характере нагрузки определить ток в первичной обмотке воздушного трансформатора

Контрольные вопросы

1.Определение цепи со взаимной индукцией.

2.Сопротивление цепи при последовательном согласном и встречном включении.

3. Сопротивление цепи при смешанном согласном и встречном включении.

4.Напряжение на вторичной обмотке трансформатора в режиме холостого хода.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7

НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЙ РЕЖИМ В ОДНОФАЗНОЙ СЕТИ

Цель работы: *Ознакомление с расчетом линейных электрических цепей, если источник Э.Д.С. (тока) несинусоидальный, анализ полученных результатов.*

Краткие методические указания

Всякая периодическая функция, удовлетворяющая условиям Дирихле, может быть разложена в тригонометрический ряд:

$$f(t) = A_0 + A_{1m}\sin(\omega t + \psi_1) + A_{2m}\sin(2\omega t + \psi_2) + \ldots = \sum_{k=0}^{\infty} A_{1m}\sin(k\omega t + \psi_k).$$

Первый член ряда A_0 называется постоянной составляющей или нулевой гармоникой, второй член $A_{1m}\sin(\omega t+\psi_1)$ - основной синусоидой или первой гармоникой, а все остальные члены вида $A_{km}\sin(k\omega t+\psi_k)$ при $k>1$ носят название высших гармоник. Основная частота $\omega = \frac{2\pi}{T}$, где T — период несинусоидальной периодической функции

Периодически изменяющаяся несинусоидальная величина f(t), помимо ее гармонических составляющих, характеризуется тремя величинами:

максимальным значением за период $a_{макс}$, средним квадратичным за период или действующим значением:

$$A = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T f^2(\omega t)dt},$$

и средним по модулю значением:

$$A_{ср} = \frac{1}{T}\int_0^T |f(\omega t)|dt$$

В тех случаях, когда за весь период функция ни разу не изменяет знака среднее по модулю значение равно постоянной составляющей A_0.

Действующее значение несинусоидального тока, напряжения равно корню квадратному из суммы квадратов действующих значений гармонических составляющих, например

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \ldots + I_n^2},\ U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + U_2^2 + \ldots}.$$

В технике сильных токов при оценке несинусоидальных периодических кривых, где кривые преимущественно симметричны относительно оси абсцисс, пользуются коэффициентом формы кривой $k_ф$, коэффициентом амплитуды k_a и коэффициентом искажения k_u.

Коэффициент формы определяется, как отношение действующего к среднему по модулю значению:

$$k_Ф = \frac{A}{A_{ср}}.$$

Для синусоиды

$$k_{Ф} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} = 1{,}11 .$$

Коэффициент амплитуды определяется, как отношение максимального к действующему значению:

$$k_{A} = \frac{a_{макс}}{A} .$$

Для синусоиды

$$k_{A} = \sqrt{2} = 1.41$$

Коэффициент искажения определяется, как отношение действующего значения основной гармоники к действующему значению всей кривой:

$$k_{u} = \frac{A_{1}}{A} .$$

Для синусоиды

$$k_{u} = 1 .$$

Измерение несинусоидальных токов и напряжений приборами различных систем может давать различные результаты.

Приборы электродинамической, электромагнитной и тепловой систем реагируют на действующее значение измеряемой величины. Магнитоэлектрические приборы сами по себе реагируют на постоянную составляющую, магнитоэлектрические приборы с выпрямителями (детекторные) реагируют на среднее по модулю значение, а амплитудные электронные вольтметры - на максимальные значения.

Если в линейной цепи действует один или несколько источников несинусоидальных Э.Д.С. или токов, то расчет такой цепи распадается на три этапа:

1. Разложение Э.Д.С. или токов источников на синусоидальные составляющие и получение дискретного или непрерывного спектра частот.
2. Применение принципа наложения и расчет токов и напряжений в цепи для каждой из составляющей в отдельности.
3. Совместное рассмотрение решений, полученных для каждой из составляющих.

При решении каждой из этих задач необходимо учитывать, что для различных частот индуктивные и емкостные сопротивления не одинаковы. Индуктивное сопротивление для k-той гармоники в k раз больше, а емкостное, наоборот, в k раз меньше, чем для первой:

$x_{Lk} = k\omega L = kx_{L1}$;

$$x_{Ck} = \frac{1}{k\omega C} = \frac{x_{C1}}{k} .$$

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

$$P = \frac{1}{T}\int_{0}^{T} uidt .$$

Таким образом

$$P = U_{0}I_{0} + \sum_{k=1}^{n} U_{k}I_{k}\cos\varphi_{k} .$$

Реактивной мощностью считают:

$$Q = \sum_{k=1}^{n} U_{k}I_{k}\sin\varphi_{k} .$$

Полная (кажущаяся) мощность несинусоидального тока

$S = UI > \sqrt{P^2 + Q^2}$

из-за того, что в ее выражение входят произведения

$U_k^2 I_k^2$.

Величина $T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}$ называется мощностью искажения, так как она обусловлена только несинусоидальностью токов и напряжений.

Порядок выполнения работы

1. Для заданной преподавателем последовательной цепи определить показания приборов электромагнитной и магнитоэлектрической системы
2. Для заданной преподавателем смешанной цепи определить показания приборов электромагнитной и магнитоэлектрической системы
3. Для схем п.1и п.2 определить активную, реактивную, полную мощность и мощность искажения.
4. Для схем п.1и п.2 определить коэффициенты, характеризующие форму несинусоидальных периодических кривых.

Контрольные вопросы

1. Как определить действующие значения несинусоидального тока и напряжения.
2. Этапы расчета цепи с несинусоидальным источником.
3. Как определять мощности в цепи несинусоидального тока и напряжения.
4. Условие резонанса напряжения на К-ой гармоники.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №8

РАСЧЕТ СИММЕТРИЧНЫХ И НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ

Цель работы: *Ознакомление с расчетом трехфазных электрических цепей, анализ полученных результатов.*

Краткие методические указания

Трехфазные системы имеют следующие преимущества перед однофазными:

- экономия до 25% цветных металлов на сооружение линий электропередачи.
- возможность применения трехфазных асинхронных двигателей, простых по конструкции и надежных в эксплуатации.
- наличие двух эксплуатационных напряжений при четырехпроводной системе, полученной в случае соединения звездой

В комплексной форме трехфазная система ЭДС фаз А, В, С запишется в виде:

В комплексной форме трёхфазная система ЭДС фаз А,В,С запишется в виде:

$$\underline{E}_A = E_A,$$

$$\underline{E}_B = E_B e^{-j120^0},$$

$$\underline{E}_C = E_C e^{-j240^0} = E_C e^{j120^0}.$$

Трехфазная система в которой Э.Д.С. во всех фазах одинаковы и угол между ними равен 120°, называется симметричной. Для симметричной системы $E_A = E_B = E_C = E_ф$

Векторная диаграмма Э.Д.С. (рис.25.) представляет собой симметричную трехлучевую звезду.

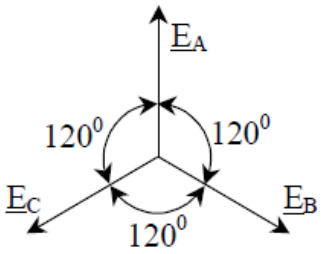


Рис.25. Векторы фазных Э.Д.С. трехфазной системы

При расчете трехфазных цепей используют фазовый оператор $a = e^{j120^0} = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2}$.

Основное свойство фазового оператора:

$$a + a^2 + a^3 = -0.5 + j\frac{\sqrt{3}}{2} - 0.5 - j\frac{\sqrt{3}}{2} + 1 = 0$$

Уравнение можно переписать в виде $(1+a+a^2)=0$.

С использованием фазового оператора система уравнений ЭДС запишется следующем образом:

$$\begin{cases} \underline{E}_A = E_A, \\ \underline{E}_B = a^2 \cdot E_B, \\ \underline{E}_C = a \cdot E_C. \end{cases}$$

Для симметричной системы

$\underline{E}_A+\underline{E}_B+\underline{E}_C=E_A + a^2 E_B + aE_C = E_\phi(1+a^2 + a)=0$.

Очередность, в которой фазовые Э.Д.С. достигают максимального значения, называется порядком чередования фаз. В рассмотренном случае за фазой А следует фаза В, затем - фаза С. Такой порядок чередования фаз называется прямой. Для получения обратного порядка чередования фаз (А, С, В) достаточно изменить направление вращения катушек

Существуют два основных способа соединения обмоток генераторов и приемников в трехфазных цепях: соединение звездой и треугольником (рис.15 и рис.16.)

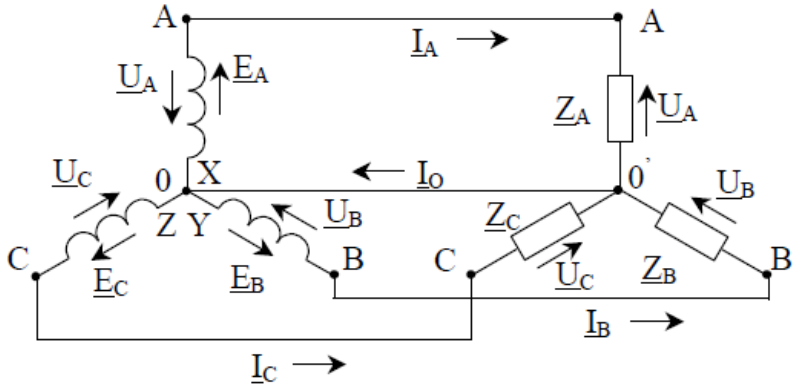


Рис.15 Трехфазная система, соединенная по схеме звезды

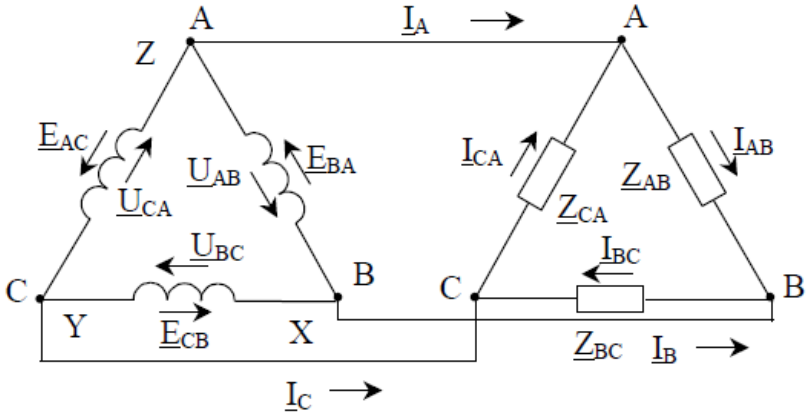


Рис.16 Трехфазная система, соединенная по схеме треугольник

Симметричный режим трехфазной цепи

В большинстве случаев трехфазная нагрузка симметрична или близка к симметричной. При этом условии расчет токов и напряжений трехфазной системы выполняется для одной фазы. Токи и напряжения в остальных фазах будут равны по модулю и сдвинуты по фазе на 120°.

Симметричный режим работы трехфазной цепи, при соединении генератора и нагрузки звездой (рис.15).

Токи в фазах

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{E}_\Phi}{\underline{Z}}; \underline{I}_B = \frac{a^2 \cdot \underline{E}_\Phi}{\underline{Z}}; \underline{I}_C = \frac{a \cdot \underline{E}_\Phi}{\underline{Z}}.$$

неравенством Э.Д.С. и т.д.

При отсутствии нейтрального провода обычно бывают заданы не фазные, а линейные напряжения на зажимах цепи $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$. Обозначим фазные напряжения на выходах нагрузки через $\underline{U}_{AH}$, $\underline{U}_{BH}$, $\underline{U}_{CH}$ и определим токи в фазах $\underline{I}_A=\underline{Y}_A\underline{U}_{AH}$, $\underline{I}_B=\underline{Y}_B\underline{U}_{BH}$, $\underline{I}_C=\underline{Y}_C\underline{U}_{CH}$, где $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ -проводимости фаз нагрузки .

Ток в нейтральном проводе отсутствует.

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = \frac{\underline{E}_\Phi}{\underline{Z}}(1 + a^2 + a) = 0.$$

Линейные напряжения определяются как разности фазных напряжений:

$\underline{U}_{AB}=\underline{U}_A-\underline{U}_B$, $\underline{U}_{BC}=\underline{U}_B-\underline{U}_C$, $\underline{U}_{CA}=\underline{U}_C-\underline{U}_A$

В любом месте трехфазной линии при симметричном режиме модуль

$$U_л = \sqrt{3}U_\Phi.$$

Действительно $U_{AB} = U_\Phi - a^2 U_\Phi = U_\Phi(1 - a^2) = \sqrt{3}U_\Phi e^{j30^0}$.

Симметричный режим работы трехфазной цепи, при соединении генератора и нагрузки треугольником (рис.16.)

При соединении треугольником линейные токи определяются как разности фазных токов:

$\underline{I}_A=\underline{I}_{AB}-\underline{I}_{CA}$, $\underline{I}_B=\underline{I}_{BC}-\underline{I}_{AB}$, $\underline{I}_C=\underline{I}_{CA}-\underline{I}_{BC}$

при соединении треугольником:

$$\mathbf{I}_л = \sqrt{3}\mathbf{I}_\Phi.$$

При расчете токов трехфазной цепи в данном случае, сначала определяют фазные токи:

$$I_\Phi = \frac{U_\Phi}{Z} = \frac{U_л}{Z}.$$

Затем определяют линейные токи:

$$I_A = I_B = I_C = I_л = I_\Phi\sqrt{3}.$$

Активной мощностью трехфазной системы называется сумма активных мощностей ее отдельных фаз $P=P_A+P_B+P_C$. В симметричной системе фазные мощности равны между собой, поэтому $P=3P_\Phi$. Для каждой фазы $P_\Phi=U_\Phi I_\Phi\cos\varphi$, где φ - угол сдвига фаз между фазными напряжением и током

$$P = 3U_\Phi I_\Phi \cos\varphi = \sqrt{3}U_л I_л \cos\varphi$$

Аналогично для реактивной мощности

$$Q = 3U_\Phi I_\Phi \sin\varphi = \sqrt{3}U_л I_л \sin\varphi,$$

для полной мощности $S = \sqrt{3}U_л I_л$

Несимметрия в трехфазной цепи может быть вызвана различными причинами: несимметричной нагрузкой, коротким замыканием или размыканием фазы,

По найденным фазным напряжениям нагрузки находят фазные токи.

Если на выводах трехфазной нагрузки, соединенной треугольником, заданы линейные напряжения $\underline{U}_{AB}$, $\underline{U}_{BC}$, $\underline{U}_{CA}$ (рис.4.5), то токи в фазах нагрузки равны:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}, \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}, \underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

Если на выводах несимметричной трехфазной нагрузки, соединенной треугольником, заданы фазные напряжения $\underline{U}_A$, $\underline{U}_B$, $\underline{U}_C$ источника, соединенного звездой, то линейные напряжения определяются как разности фазных напряжений. Токи в

линии определяются по уравнениям

$\underline{I}_A=\underline{I}_{AB}-\underline{I}_{CA}$, $\underline{I}_B=\underline{I}_{BC}-\underline{I}_{AB}$, $\underline{I}_C=\underline{I}_{CA}-\underline{I}_{BC}$

активная мощность

$$P = U_{AC} I_A \cos(\hat{U_{AC}} \hat{I_A}) + U_{BC} I_B \cos(\hat{U_{BC}} \hat{I_B})$$

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем симметричной трехфазной нагрузки соединенной звездой определить линейные токи и мощности трехфазной цепи. Построить векторную диаграмму.

2.Для заданной преподавателем симметричной трехфазной нагрузки соединенной треугольником определить линейные, фазные токи и мощности трехфазной цепи. Построить векторную диаграмму.

3.Для заданной преподавателем несимметричной трехфазной нагрузки соединенной звездой определить линейные токи и мощности трехфазной цепи. Построить векторную диаграмму.

4.Для заданной преподавателем несимметричной трехфазной нагрузки соединенной треугольником определить линейные, фазные токи и мощности трехфазной цепи. Построить векторную диаграмму.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается преимущество трехфазного тока перед однофазным?

2.Соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении симметричной нагрузки звездой и треугольником.

3.Расчет несимметричной трехфазной цепи при соединении нагрузки звездой и треугольником.

4. Как определить чередование фаз опытным путем.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №9

РАСЧЕТ НЕСИММЕТРИЧНЫХ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ СИММЕТРИЧНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ

Цель работы: *Ознакомление с расчетом несимметричных трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих.*

Краткие методические указания

Метод симметричных составляющих основан на представлении любой несимметричной системы токов, напряжений, магнитных потоков в виде суммы трех симметричных составляющих. Они отличаются друг от друга порядком следования фаз и называются системами прямой (рис. 17 а), обратной (рис. 17, б) и нулевой последовательности (рис. 17, в).

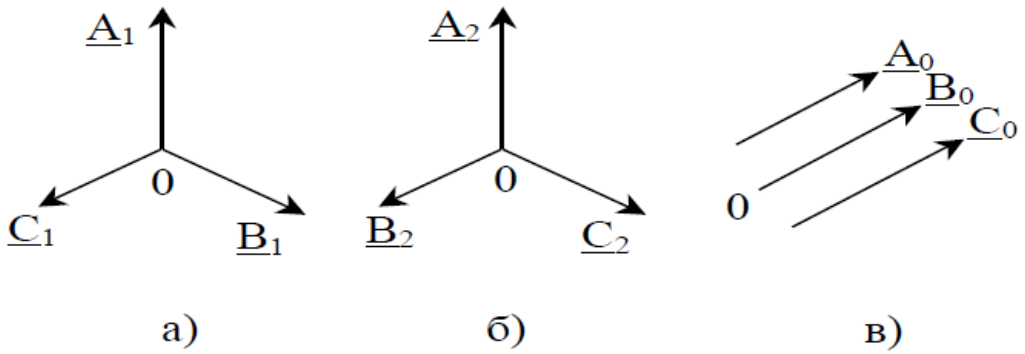


Рис.17. Симметричные составляющие несимметричной трехфазной цепи

Обозначим трехфазную систему величин (токов, напряжений) буквами $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$. Величины, относящиеся к системам прямой, обратной и нулевой последовательности, отметим соответственно индексами 1, 2, и 0.

Система $\underline{A}_1$, $\underline{B}_1$, $\underline{C}_1$, у которой между вслед идущими векторами угол 120° и имеет прямой порядок следования фаз в направлении вращения векторов, называется прямое системой. Система $\underline{A}_2$, $\underline{B}_2$, $\underline{C}_2$, у которой между вслед идущими векторами угол 120° и имеет порядок следования фаз противоположный основному называется обратной системой. Система векторов $\underline{A}_0$, $\underline{B}_0$, $\underline{C}_0$, совпадающих по фазе называется нулевой системой.

Пользуясь фазовым оператором «а» и приняв за основные вектора $\underline{A}_1$, $\underline{A}_2$, $\underline{A}_0$ запишем:

$\underline{B}_1=a^2\underline{A}_1$, $\underline{B}_2=a\underline{A}^2$, $\underline{B}_0=\underline{A}_0$.

$\underline{C}_1=a\underline{A}_1$, $\underline{C}_2=a^2\underline{A}_2$, $\underline{C}_0=\underline{A}_0$.

Пусть задана несимметричная система трех векторов $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$. Для замены несимметричной системы $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$ тремя системами симметричных составляющих необходимо и достаточно, чтобы соблюдались условия:

$$\begin{cases} \underline{A} = \underline{A}_1 + \underline{A}_2 + \underline{A}_0, \\ \underline{B} = \underline{B}_1 + \underline{B}_2 + \underline{B}_0, \\ \underline{C} = \underline{C}_1 + \underline{C}_2 + \underline{C}_0. \end{cases}$$

Из системы находим, что:

$$\underline{A}_0 = \frac{1}{3}(\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}).$$

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

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

Расчет несимметричного режима методом симметричных составляющих, как правило, содержит следующие основные этапы:

1) представление несимметричных систем напряжений, токов и ЭДС суммой их симметричных составляющих;

2) замена исходной схемы, работающей в несимметричном режиме, тремя схемами замещения: прямой, обратной и нулевой последовательности, работающими в симметричных режимах, с учетом вида несимметрии;

3) расчет этих симметричных схем замещения для одной фазы и определение симметричных составляющих токов и напряжений;

4) расчет по симметричным составляющим искомых токов и напряжений в исходной схеме.

Большинство электроустановок работает в симметричных режимах. Резкая несимметрия в таких цепях носит аварийный характер и возникает, как правило, в каком-либо одном сечении. Различают два вида несимметрии: поперечную и продольную.

Поперечная несимметрия возникает в тех случаях, когда между фазами и нейтралью (землей) или между отдельными фазами включаются неравные сопротивления. Наиболее распространенные случаи поперечной несимметрии в электроустановках – это несимметрия, обусловленная коротким замыканием одной или двух фаз на землю или фаз между собой. Междуфазные КЗ (двухфазные и трехфазные) возникают в сетях, как с заземленной, так и с изолированной нейтралью. Однофазные КЗ могут происходить только в сетях с заземленной нейтралью.

Продольная несимметрия возникает в том случае, когда в рассечку фаз линии включаются неравные сопротивления. К продольной несимметрии относится обрыв одного или двух проводов.

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем схемы трехфазной цепи с поперечной несимметрией определить токи в линии и напряжение на нагрузке.

2.Для заданной преподавателем схемы трехфазной цепи с продольной-несимметрией определить токи в линии и напряжение на нагрузке.

Контрольные вопросы

1.С какой целью несимметричная система векторов раскладывается на симметричные составляющие.

2.Какой последовательности протекает ток в нулевом проводе.

3. Какой последовательности нет в линейном напряжении.

4.Дополнительные уравнения при КЗ фазы А на землю.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №10

КЛАССИЧЕСКИЙ МЕТОД РАСЧЕТА. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЦЕПЯХ С ОДНИМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

Цель работы: *Ознакомление с классическим методом расчета переходных процессов в цепях с одним накопителем энергии.*

Краткие методические указания

Наступлению установившегося процесса, отличного от первоначального режима работы цепи с реактивными элементами, предшествует, как правило, переходный процесс, при котором напряжение и токи изменяются не периодически. Переход от одного режима работы цепи к другому может быть вызван изменением параметров схемы цепи, называемым в общем случае в электротехнике коммутацией. При переходном процессе должен выполняться первый и второй закон коммутации.

Первый закон (правило) коммутации

Ток через индуктивный элемент L непосредственно до коммутации i_L (0.) равен току через этот же индуктивный элемент непосредственно после коммутации $i_L(0_+)$

$i_L(0_+)= i_L(0_+)$.

Второй закон (правило) коммутации

Обозначим напряжение на конденсаторе непосредственно до коммутации $u_C(O_-)$, а напряжение на нем непосредственно после коммутации $u_C(0_+)$.

В соответствии с невозможностью скачка напряжения на конденсаторе:

$u_C(0_-)=u_C(0_+)$.

Включение в цепь R, L постоянной Э.Д.С.

При включении в цепь R, L постоянной Э.Д.С. E, принужденный ток равен E/R. Поэтому

$$i=\frac{E}{R}+Ae^{\frac{R}{L}t}, \quad u_L=L\frac{di}{dt}=Ee^{\frac{t}{\tau}}$$

Графики изменения токов и напряжения на индуктивности показан на рис.18.

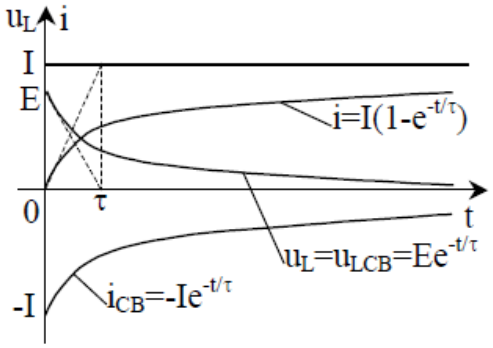


Рис.18. Установившейся свободный и переходный токи и напряжения на индуктивности при включении в цепь R, L постоянной Э.Д.С

Короткое замыкание цепи R, L

Положим, что цепь R, L, присоединенная к источнику постоянного или переменного напряжения, замыкается при t=0 накоротко рис.30,а .Принуждённый ток

$i_{ПР}$=0.Полный ток $i = Ae^{-\frac{R}{L}t}$.

На рис.19, б изображены кривые спада тока в короткозамкнутом контуре и кривая напряжения на индуктивности

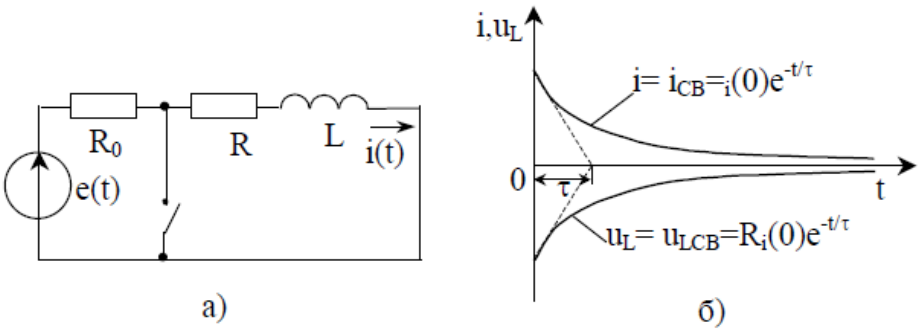


Рис.19. Короткое замыкание цепи R, L

Включение в цепь R, C постоянной Э.Д.С.

Включим постоянную Э.Д.С. E в цепь с сопротивлением R и предварительно заряженной емкостью C

Установившееся напряжение на емкости равно Э.Д.С. источника. Поэтому установившееся напряжение на ёмкости

$$u_c = E - (E - U)e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Ток контуре

$$i = \frac{E - U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}$$

На рис.20,а изображены кривые нарастания u_C и спад iE большеU.

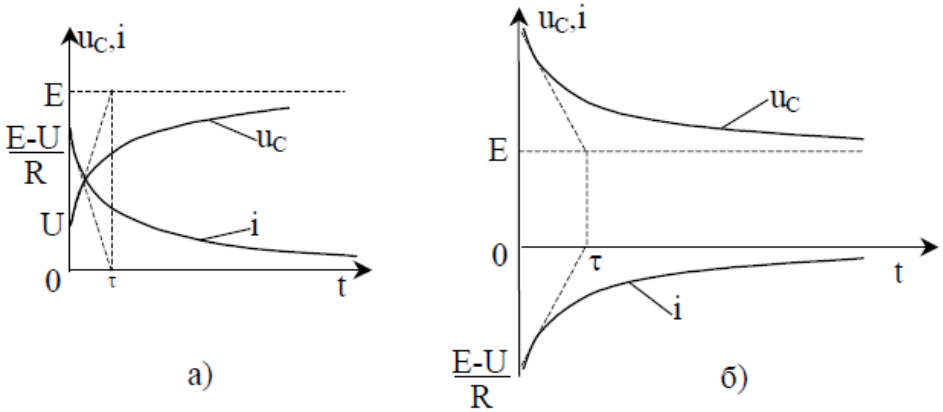


Рис.20. Ток и напряжение при включении в цепь R, C, постоянной Э.Д.С.

Если E<U, то кривые u_C и i имеют вид, показанный на рис. 20,б.

Короткое замыкание цепи R, C.

Предполагается, что емкость C заряжена, т.е. в момент включения на выводах имеется напряжение U.

Напряжение на емкости

$u_c = Ue^{-\frac{t}{\tau}}$.

Ток $i = -Ie^{-\frac{t}{\tau}}$, где $I = \frac{U}{R}$.

На рис. 21 изображены кривые спада u_C и i.

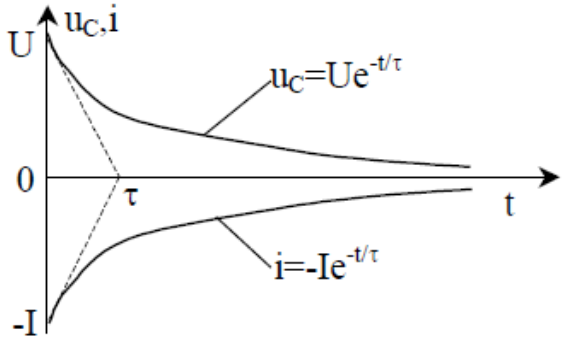


Рис. 21. Ток и напряжение при коротком замыкании цепи R, C

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем схемы с включаемой индуктивностью определить токи и напряжения в ветвях.

2.Для заданной преподавателем схемы с отключаемой индуктивностью определить токи и напряжения в ветвях.

3.Для заданной преподавателем схемы с включаемой емкостью определить токи и напряжения в ветвях.

Контрольные вопросы

1.В каких цепях и кода возникает переходной процесс.

2.Сформулировоть первый и второй законы коммутации.

3.Как определять корни характеристического уравнения.

4.Физический смысл постоянной времени.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №11

РАСЧЕТ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ ОПЕРАТОРНЫМ МЕТОДОМ

Цель работы: *Ознакомление с операторнымм методом расчета переходных процессов в разветвленной цепи.*

Краткие методические указания

Операторный метод основан на использовании понятия об изображении функции времени. В операторном методе каждой функции времени соответствует функция новой переменной, обозначаемой буквой p, и наоборот -функции переменной p отвечает определенная функция времени.

Переход от функции времени к функции p осуществляют с помощью преобразования (прямого) Лапласа.

Изображение постоянной функции f(t)=A,

$$F(p)=\int_0^\infty Ae^{-pt}dt=A\left(-\frac{1}{p}\right)\int_0^\infty d\left(e^{-pt}\right)=-\frac{Ae^{-pt}}{p}\Big|_0^\infty=\frac{A}{p}.$$

Изображение напряжения на индуктивном элементе

$$L\frac{di}{dt}\cong LpI(p),\ \text{если } i(0)=0.$$

Изображение напряжения на конденсаторе

$$u_c\cong\frac{I(p)}{Cp}+\frac{u_c(0)}{p}.$$

Закон Ома в операторной форме. Внутренние Э.Д.С.

На рис. 22 изображена часть сложной разветвленной электрической цепи.

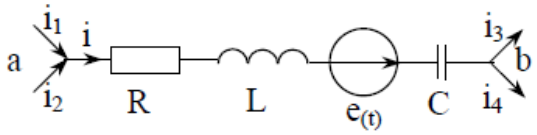


Рис.22. Иллюстрация к закону Ома в операторной форме

Ток $$I(p)=\frac{U_{ab}(p)+Li(0)-\frac{u_C(0)}{p}+E(p)}{Z(p)}.$$

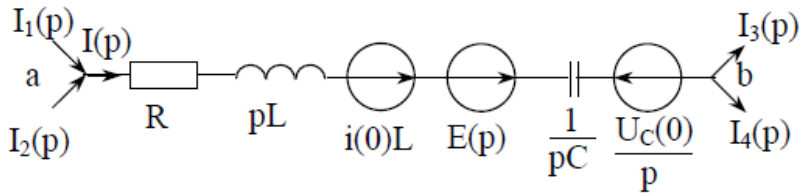


Рис. 23 Операторная схема замещения.

Первый и второй законы Кирхгофа в операторной форме

$\Sigma I(p)=0,\ \Sigma I_k(p)Z_k(p)=\Sigma E_k(p).$

Переход от изображения $I(p)=\frac{N(p)}{M(p)}=\sum_{k=1}^{k=m}\frac{N(p_k)}{M'(p_k)}\cdot\frac{1}{p-p_k}$ к оригиналу

$i(t)=\sum_{k=1}^{k=m}\frac{N(p_k)}{M'(p_k)}e^{p_k t}$.

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем схемы с разветвленной RLC цепью определить токи и напряжения в ветвях при нулевых начальных условиях.
2.Для заданной преподавателем схемы с разветвленной RLC цепью определить токи и напряжения в ветвях при начальных условиях.

Контрольные вопросы

1.На чем основан операторный метод расчета.
2.Преимущества операторного метода расчета перед классическим.
3.Что включает операторная схема замещения.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №12

УСТАНОВИВШИЙСЯ СИНУСОИДАЛЬНЫЙ РЕЖИМ В ЦЕПЯХ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Цель работы: *Ознакомление с процессами в цепях с распределенными параметрами.*

Краткие методические указания

Длинные линии или линии с распределенными параметрами – параллельные и коаксиальные линии, вдоль которых в любой момент времени ток и напряжение в различных точках имеют различные значения. В таких линиях электрическая и магнитная энергия непрерывно распределена по длине линии.

Пусть известны первичные параметры однородной линии, отнесенные к единице ее длины: R_0 - продольное активное сопротивление единицы длины линии; L_0 - индуктивность единицы длины линии; C_0 - емкость единицы длины линии; G_0 - поперечная проводимость единицы длины линии. Поперечная проводимость G_0 не является обратной величиной продольного сопротивления R_0. Разобьем линию на участки длиной dx (рис.24), где x - расстояние, отсчитываемое от начала линии.

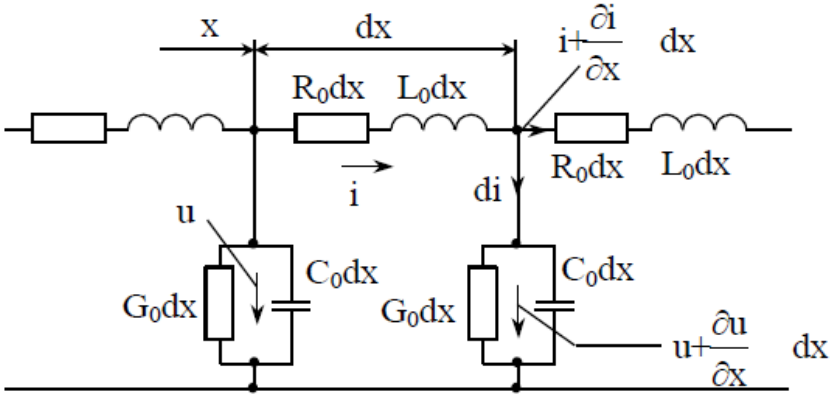


Рис.24. Схема элемента линии, длиной dx

определения комплексов напряжения и тока в любой точке линии через комплексы напряжения и тока в начале линии

$$\underline{U}=\underline{U}_1 ch\gamma x - \underline{I}_1 \underline{Z}_B sh\gamma x, \quad \underline{I} = \underline{I}_1 ch\gamma x - \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_B} sh\gamma x$$

где постоянная распространения $\gamma = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} == \alpha + j\beta$,

волновое сопротивление $\underline{Z}_в = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C0}} = Z_в e^{j\varphi_в}$,

вторичные параметры $\underline{Z}_0=R_0+j\omega L_0$, $\underline{Y}_0=G_0+j\omega C_0$.

определения напряжения и тока в любой точке линии через комплексы напряжения и тока в конце линии

$\underline{U}=\underline{U}_2 ch\gamma y+\underline{I}_2\underline{Z}_в sh\gamma y$, $\underline{I} = \underline{I}_2 ch\gamma y + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_в} sh\gamma y$.

где у расстояние от текущей точки на линии до конца линии .

Падающей электромагнитной волной называют процесс перемещения электромагнитного состояния (электромагнитной волны) от источника энергии к приемнику. Отраженной электромагнитной волной называют процесс перемещения электромагнитного состояния (электромагнитной волны) от приемника к источнику энергии, т.е. в нашем случае в сторону уменьшения координаты х. . Коэффициент отражения

$\underline{K}u = \frac{\underline{C}_1}{\underline{C}_2} = \frac{\underline{U}_2 - \underline{I}_2\underline{Z}_в}{\underline{U}_2 + \underline{I}_2\underline{Z}_в} = \frac{\underline{Z}_н - \underline{Z}_в}{\underline{Z}_н + \underline{Z}_в}$,

При холостом ходе и коротком замыкании $K_u=1$. Коэффициент отражения по току $K_i=-K_u$

Фазовой скоростью $\vartheta_Ф$-это скорость перемещения по линии неизменного фазового состояния. $\vartheta_Ф = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\beta}$.

Под длиной волны λ, понимают расстояние, на которое распространяется волна за один период T=l/f:

$\lambda = \vartheta T = \frac{\vartheta}{f} = \frac{\omega}{f\cdot\beta} = \frac{2\pi}{\beta}$.

Линию, в начале и конце которой передаваемый сигнал имеет одинаковую форму, называют линией без искажений. Такое положение имеет место при условии, что:

$\frac{R_0}{L_0} = \frac{G_0}{C_0}$.

В линиях передачи можно с большой точностью пренебречь сопротивлением R_0 и проводимостью утечки G_0 по сравнению соответственно величинами ωL_0 и ωC_0.- это линии без потерь, в них

$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{L_0 C_0}$,

т.е. коэффициент затухания α=0, а коэффициент фазы $\beta=\omega\sqrt{L_0 C_0}$.

При этом волновое сопротивление $\underline{Z}_в = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$,

$\underline{U}=\underline{U}_2 cos\beta y+j\underline{I}_2\underline{Z}_в sin\beta y$, $\underline{I} = j\frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_в} \sin\beta y + \underline{I}_2 \cos\beta y$.

Порядок выполнения работы

1.По заданным преподавателем первичным параметрам линии с потерями

определить вторичные параметры, $\vartheta_Ф$, λ.

2.По заданным преподавателем первичным параметрам линии без искажения и линии без потерь определить вторичные параметры, $\vartheta_Ф$, λ.

3.Для линии без потерь определить входное сопротивление в режиме хх и КЗ.

Контрольные вопросы

1.Какая линия называется однородной.

2.Может ли быть напряжение в начале линии с потерями ниже чем на ее конце при режиме холостого хода.

3.Влияет ли нагрузка на величину входного сопротивления линии.

4.Каковы первичные и вторичные параметры линии без потерь.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №13

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: *Ознакомление с параметрами нелинейных элементов. Расчет цепи с нелинейными элементами.*

Краткие методические указания

Статическая характеристика элемента цепи выражается некоторой функциональной зависимостью y=f(x).

Статическим параметром элемента цепи называют отношение

$$P = \frac{y}{x}.$$

Дифференциальный параметр равен

$$P_d = \frac{dy}{dx} = f'(x).$$

Для нелинейного элемента характерно то, что его параметры зависят от режима работы, т.е. от величины воздействия x

Изобразим статическую характеристику какого-то Н.Э. (рис.25).

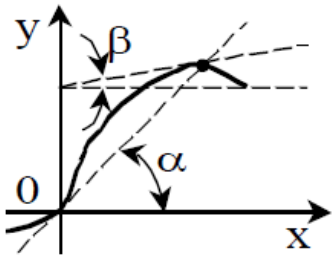


Рис.25. Статическая характеристика Н.Э.

Если $m_x=m_y$, то $P=tg\alpha$.

При $m_x=m_y$, , $S=P_d=tg\beta$.

Нелинейные активные сопротивления:

статическая проводимость $g = \frac{i}{u}$,

статическое сопротивление $r = \frac{u}{i}$; $g = \frac{1}{r}$.

Дифференциальный параметр или крутизна нелинейного сопротивления

$$S = \frac{di}{du} = S(u).$$

Дифференциальное сопротивление

$$r_d = \frac{du}{di} = \frac{1}{S}.$$

статическая проводимость $g = \frac{i}{u}$,

статическое сопротивление $r = \frac{u}{i};\ g = \frac{1}{r}$.

Дифференциальный параметр или крутизна нелинейного сопротивления

$S = \frac{di}{du} = S(u)$.

Дифференциальное сопротивление

$r_d = \frac{du}{di} = \frac{1}{S}$.

Нелинейная индуктивность:

статической магнитной проницаемость $\mu = \frac{B}{H}$.

дифференциальная магнитная проницаемость $\mu_d = \frac{dB}{dH}$.

статическая индуктивность $L = \frac{\Psi}{i}$.

Дифференциальная индуктивность $L_d = \frac{d\Psi}{di}$

Нелинейная емкость:

статическая емкость $C = \frac{q}{u_C}$.

дифференциальная емкость $C_d = \frac{dq}{du_C}$

Из методов расчета к нелинейным цепям применимы следующие: метод двух узлов; замена нескольких параллельно включенных ветвей одной эквивалентной; метод эквивалентного генератора. До проведения расчета нелинейных цепей должны быть известны вольтамперные характеристики нелинейных резисторов (Н.Р.), входящих в схему. Расчет нелинейных цепей постоянного тока производят, как правило, графически.

Последовательное соединение Н.Р

На рис.26, а изображена схема последовательного соединения Н.Р. с заданной в.а.х., линейного сопротивления R и источника ЭДС E.

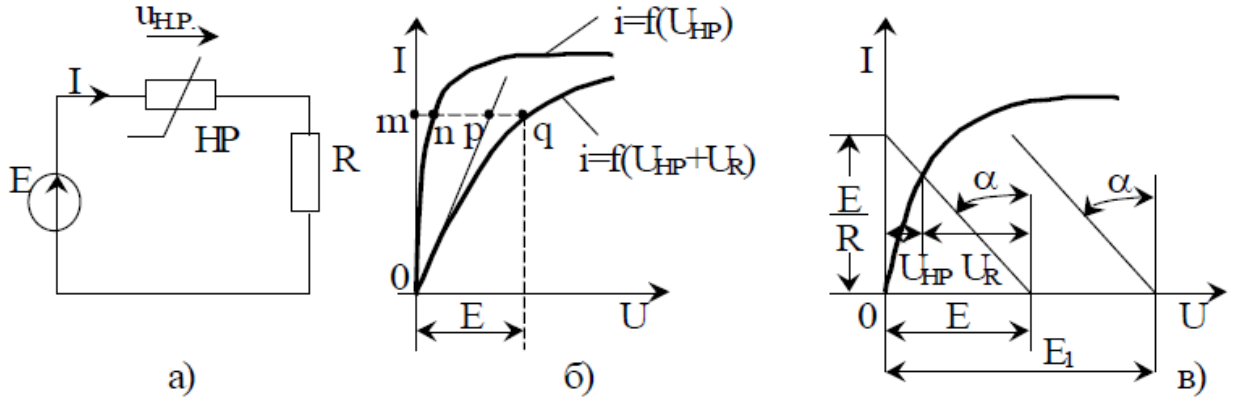
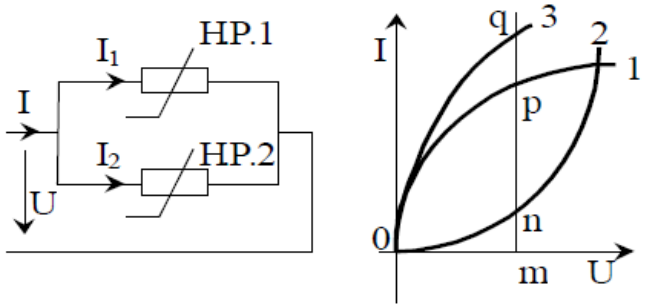


Рис.26. Электрическая схема (а) и два способа расчета (б, в) последовательной нелинейной цепи

Используют два способа расчета. Первый способ иллюстрирует рис.26 б, второй рис.26 в.

Параллельное соединение Н.Р.

Схема параллельного соединения двух Н.Р. изображена на рис.26, а; ее В.А.Х. и иллюстрация способа расчёта– на рис.26, б.



а) б)

Рис.26. Графическое определение токов на двух параллельно соединенных Н.Р.

Порядок выполнения работы

1.По заданным преподавателем статическим характеристикам определить статические и дифференциальные параметры.

2.В заданной последовательной нелинейной цепи определить ток и напряжение на элементах.

3. В заданной параллельной нелинейной цепи определить токи в ветвях.

Контрольные вопросы

1.Как определяется статический и дифференциальный параметр нелинейных

элементов.

2.Нарисовать вольтамперную характеристику в одной из точек в которой статическое и дифференциальное сопротивление одинаково.

3.Объяснить второй способ расчета последовательной цепи.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №14

МАГНИТНЫЕ ЦЕПИ ПРИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТНЫХ ПОТОКАХ

Цель работы: *Ознакомление с расчетом магнитных цепей при постоянных магнитных потоках.*

Краткие методические указания

Совокупность устройств, содержащих ферромагнитные тела и образующих замкнутую систему, по которой замыкается магнитный поток называется магнитной цепью. М.д.с. IW вызывает магнитный поток в магнитной цепи подобно тому, как ЭДС вызывает электрический ток в электрической цепи. Как и ЭДС, м.д.с. есть величина направленная (положительное направление на схеме обозначают стрелкой. Положительное направление м.д.с. совпадает с движением острия правого винта, если винт вращать по направлению тока в обмотке. Падением магнитного напряжения между точками a и b магнитной цепи называют линейный интеграл от напряженности магнитного поля между этими точками.

$$U_{Mab} = H\int_a^b dl = Hl_{ab} \ ,$$

где l_{ab} - длина пути между точками a и b.

Законы Кирхгофа для магнитных цепей:

первый закон Кирхгофа $\sum \Phi = 0$,

второй закон Кирхгофа $\sum_{k=1}^{n} U_{Mk} = \sum I_k W_k$. м.д.с.

Определение м.д.с. в неразветвленной магнитной цепи по заданному потоку. (прямая задача)

Расчет проводим в такой последовательности:

1) разбиваем магнитную цепь на участки постоянного сечения и определяем длины lk(м) и площади поперечного сечения Sk(м2) участков (длины участков берем по средней силовой линии);

2) исходя из постоянства потока вдоль всей цепи, по заданному потоку и сечениям Sk находим магнитные индукции на каждом участке: Bk=Ф/Sk;

3) по кривой намагничивания определяем напряженности поля Hk для ферромагнитных участков магнитной цепи; напряженность поля в воздушном зазоре H=0,8□106 B,

где H - в А/м; B - в Тл;

Определение потока в неразветвленной магнитной цепи по заданной м.д.с. (обратная задача)

Для решения задачи необходимо построить зависимость потока в функции от $\sum H_k l_k$ Ф=f($\sum H_k l_k$).

Для построения такой характеристики необходимо задаться несколькими значениями Ф и найти соответствующие значения $\sum H_k l_k$, решая таким образом,

несколько прямых задач, причем необходимо, чтобы какие-то значения м.д.с. были больше и меньше заданного. С помощью магнитной характеристики по заданной м.д.с. определяется Ф.

Для сокращения вычислений желательно ограничиться возможно меньшим числом точек характеристики, для чего необходимо задаться первым значением Ф, по возможности близким к истинному.

Порядок выполнения работы

1.Для заданной преподавателем разветвленной магнитной цепи с помощью законов Кирхгофа определить потоки в ветвях.

2.Для заданной преподавателем неразветвленной магнитной цепи определить. м.д.с.

3.Для заданной преподавателем разветвленной магнитной цепи определить поток.

Контрольные вопросы

1.Сформулируйте закон полного тока

2.Дайте определение следующим понятиям: м.д.с., магнитная цепь, ветвь-магнитной цепи. Как определить направление м.д.с.

3.Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №15

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ УРАВНЕНИЙ ЛАПЛАСА И ПУАССОНА

Цель работы: *изучение расчета электрического поля с применением уравнений Лапласа и Пуассона.*

Краткие методические указания

При помощи электрического потенциала может быть записано дифференциальное уравнение - уравнение Пуассона, связывающее потенциал с источниками электростатического поля - зарядами.

Для линейных сред из уравнений

$$\operatorname{div}\overline{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \operatorname{div}\overline{E} = \rho,$$

$$-\operatorname{grad}\varphi = \overline{E}.$$

Получим

$$\operatorname{div}\operatorname{grad}\varphi \equiv \nabla^2\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon\varepsilon_0}.$$

Области пространства, в которых отсутствуют объемные заряды, описываются уравнением Лапласа

$$\operatorname{div}\operatorname{grad}\varphi \equiv \nabla^2\varphi = 0.$$

Для того чтобы решать уравнения Пуассона и Лапласа, необходимо знать граничные условия.

Одним из граничных условий является условие для скалярного потенциала. использовалось граничное условие $E_{at}=E_{bt}$, то они являются эквивалентными, то есть их нельзя использовать одновременно как разные граничные условия.

Таким образом, граничными для электростатики являются условия:

$E_{1t}=E_{2t}$, $D_{1n}=D_{2n}=q_s$, $P_{1n}- P_{2n} =-q_{s\ связ}$, $\varphi_a = \varphi_b$.

Порядок выполнения работы

1.По заданным преподавателем данным определить потенциал для области пространства, в которых отсутствуют объемные заряды.

2.По заданным преподавателем данным определить потенциал для области пространства, в которой присутствуют объемные заряды.

Контрольные вопросы

1.Как выбирать систему координат для использования уравнения Лапласа.

2.Как определять постоянные интегрирования.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №16

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ МНОГОСЛОЙНЫХ СТРУКТУР

Цель работы: *ознакомление с изменением векторов электромагнитного поля при переходе из одной среды в другую.*

Краткие методические указания

В большинстве практических задач бывает необходимо определять те или иные векторы электромагнитного поля в материальной среде, параметры которой изменяются при переходе через какую-то поверхность. Поведение векторов на границе раздела двух сред (граничные условия) необходимо знать при решении задач электродинамики, подобно тому как было необходимо знать начальные условия при решении задач о переходных процессах и электрических цепях.

Поэтому прежде чем решать какие-то конкретные задачи электродинамики, необходимо найти связь между векторами на границе раздела, то есть граничные, условия, которые удовлетворяли бы уравнениям Максвелла.

Граничное условие для нормальных составляющих вектора $\overline{D}$ на заряженной поверхности раздела двух сред:

$$D_{1n}-D_{2n} = q_s$$

граничным условием для нормальных составляющих векторов плотностей тока проводимости:

$$J_{1n} = J_{2n}$$

Граничное условие для, нормальных составляющих, векторов магнитного поля:

$$B_{1n} = B_{2n.}$$

Граничные условия для тангенциальных составляющих векторов электрического поля:

$$E_{1t}=E_{2t.}$$

Граничные условия для тангенциальных составляющих векторов магнитного поля:

$$H_{1t}=H_{2t}$$

Порядок выполнения работы

1. При заданных параметрах сред определить вектор E во второй среде.
2. При заданных параметрах сред определить вектор D во второй среде.

Контрольные вопросы

1.Может ли электромагнитное поле существовать без непосредственной связи с электрическими зарядами.

2.Приведите граничные условия для нормальных и тангенциальных составляющих векторов магнитного поля.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. - М.: Высшая школа, 1978.

2. Теоретические основы электротехники. Теория линейных и нелинейных электрических и магнитных цепей : учебное пособие / В. С. Лукманов ; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. – Уфа : РИК УГАТУ, 2019. – 219 с.

3. Коновалов, Б. И. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие / Б. И. Коновалов. – Томск: ТУСУР, 2007. – 151 с.