

Указания по выполнению лабораторной работы:

Установите на наборную панель один из вариантов конфигурации проводящего листа (планшет 1, 2, 3 или 4) и подключите питание от генератора постоянных напряжений и мультиметр в режиме вольтметра, как показано на рис. 1.1.

Приготовьте рисунок расположения электродов с координатной сеткой (см. приложение 1).

Включите выключатель сети блока генераторов напряжений (БГН) и убедитесь, что один из электродов имеет потенциал, равный нулю, а другой – потенциал, равный напряжению источника питания.

Выберите такое напряжение питания $U = 10 \dots 15$ В и шаг изменения потенциала ΔU (например 1; 2 или 2,5 В), чтобы на картине поля получилось 7...10 эквипотенциальных линий.

Перемещая зонд от точки нулевого потенциала по оси симметрии к другому электроду, найдите точки с потенциалами ΔU , $2\Delta U$, $3\Delta U$... Найденные точки отмечайте на подготовленном рисунке с координатной сеткой.

Перемещая зонд из точки с потенциалом ΔU вокруг электрода (слегка приближаясь или удаляясь от него), находите точки равного потенциала и отмечайте их на рисунке. Точки равного потенциала соедините плавной кривой. Аналогично постройте другие эквипотенциальные линии.

Примечание: В каждом варианте проводящего листа имеются одна или две оси симметрии, поэтому можно ограничиться исследованием половины или четверти проводящей области листа.

Пользуясь известными правилами графического построения картины поля, по эквипотенциальным линиям электростатического поля постройте силовые линии напряжённости поля.

Вычислите напряженность электрического поля в двух - трёх точках проводящего листа и покажите направление вектора напряженности в этих точках на рисунке ($E \equiv \Delta U / \Delta l$).

Установите на наборную панель один из вариантов конфигурации проводящего листа (планшет 1, 3, 4 или 5) и подключите питание от генератора постоянных напряжений и мультиметр в режиме вольтметра, как показано на рис. 1.1.

Приготовьте рисунок расположения электродов с координатной сеткой (см. приложение 1).

Включите выключатель «Сеть» блока генераторов напряжений (БГН) и убедитесь, что один из электродов имеет потенциал, равный нулю, а другой – потенциал, равный напряжению источника питания.

Выберите такое напряжение питания $U = 3 \dots 15$ В и шаг изменения потенциала ΔU (например 1; 2 или 2,5 В), чтобы на картине поля получилось 7...10 эквипотенциальных линий.

Перемещая зонд от точки нулевого потенциала по оси симметрии к другому электроду, найдите точки с потенциалами ΔU , $2\Delta U$, $3\Delta U$... Найденные точки отмечайте на подготовленном рисунке с координатной сеткой.

Перемещая зонд из точки с потенциалом ΔU вокруг электрода (слегка приближаясь или удаляясь от него), находите точки равного потенциала и отмечайте их на рисунке. Точки равного потенциала соедините плавной кривой. Аналогично постройте другие эквипотенциальные линии.

Примечание: В каждом варианте проводящего листа имеются одна или две оси симметрии, поэтому можно ограничиться исследованием половины или четверти проводящей области листа.

Считая снятые эквипотенциальные линии электрического поля магнитными силовыми линиями, постройте линии равного магнитного потенциала, пользуясь известными правилами графического построения картины поля. Примите конкретное значение тока в шинах или МДС катушек и укажите для каждой эквипотенциальной линии значение магнитного потенциала.

Вычислите магнитную индукцию $B = \mu_0 \frac{\Delta U_m}{\Delta l}$ в двух – трёх точках поля и покажите направление вектора магнитной индукции в этих точках на рисунке

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН	
6. ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ как результатов;	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

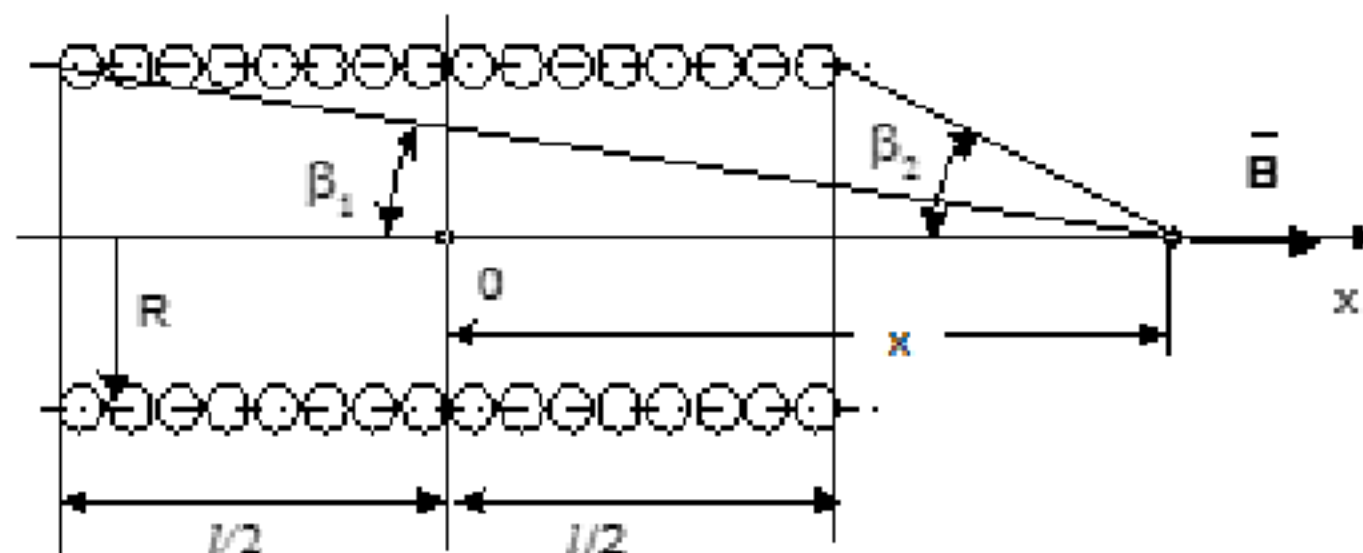
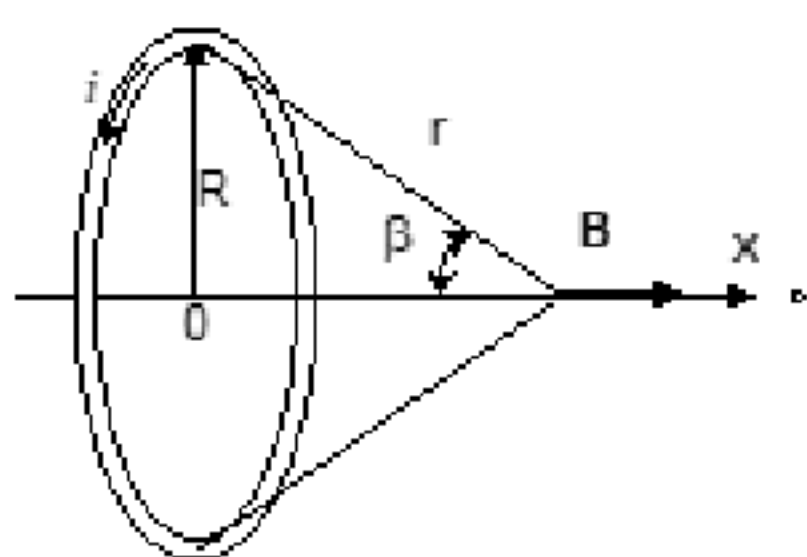
Лабораторная работа №18. Исследование постоянного магнитного поля на оси катушек с помощью датчика Холла

Цель работы: Измерение и расчет индуктивности вдоль оси цилиндрической и кольцевых катушек.

Основы теории:

На основе закона Био-Савара-Лапласа можно получить формулу для определения напряжённости магнитного поля на оси кругового витка радиуса R , по которому протекает ток i , (рис.2.1):

$$H = \frac{iR^2}{2r^3} = \frac{i}{2R} \sin^3 \beta = \frac{i}{2} \frac{R^2}{(\sqrt{R^2 + x^2})^3}$$



Пользуясь этим выражением в [1] выведена также формула для определения напряжённости поля на оси однослойной цилиндрической катушки, имеющей радиус витка R и длину l (рис. 2.2):

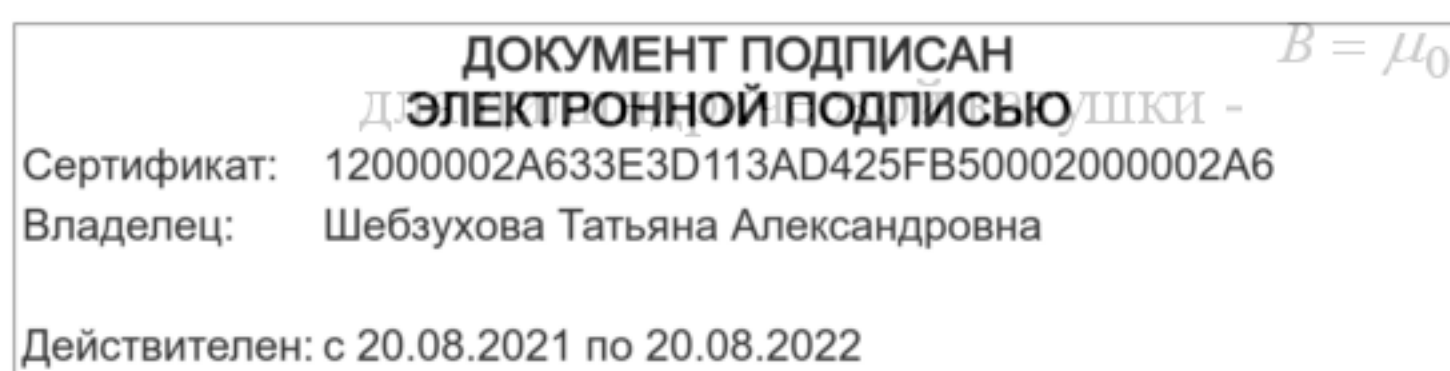
$$H = \frac{i}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2)$$

Эти формулы с некоторой погрешностью пригодны и для вычисления напряжённости на оси реальных многослойных катушек, если их толщина мала по сравнению с радиусом.

С учётом того, что магнитная индукция $B = \mu_0 H$ и число витков катушки равно w , получим:

для кольцевой катушки -
$$B = \frac{\mu_0 w i R^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 w i}{2R} \sin^3 \beta = \frac{\mu_0 w i}{2} \frac{R^2}{(\sqrt{R^2 + x^2})^3};$$

$$B = \mu_0 \frac{iw}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2)$$



В наборе миниблоков этого комплекта имеется миниблок с цилиндрической катушкой и миниблок с двумя одинаковыми соосными кольцевыми катушками, одна из которых может перемещаться относительно другой. Параметры катушек указаны на этикетках миниблоков.

Для измерения магнитной индукции используется датчик Холла с усилителем (миниблок «Тесламетр»). Для измерения магнитной индукции необходимо подвести к «Тесламетру» питание +15 В, к его выходу подключить вольтметр (предел измерения 200 мВ), ручкой остановки нуля добиться напряжения на выходе, близкого к нулю, и ввести зонд с датчиком Холла внутрь катушки на нужное расстояние от её края. Показание вольтметра на выходе усилителя пропорционально магнитной индукции.

Чувствительность системы «датчик – усилитель» указана на этикетке миниблока. Если требуется изменить или уточнить чувствительность, то необходимо открыть крышку миниблока, ввести зонд в магнитное поле с известной магнитной индукцией и подстроечным резистором установить необходимое напряжение на выходе усилителя. **Непосредственно перед последней операцией обязательно проверить установку нуля!**

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

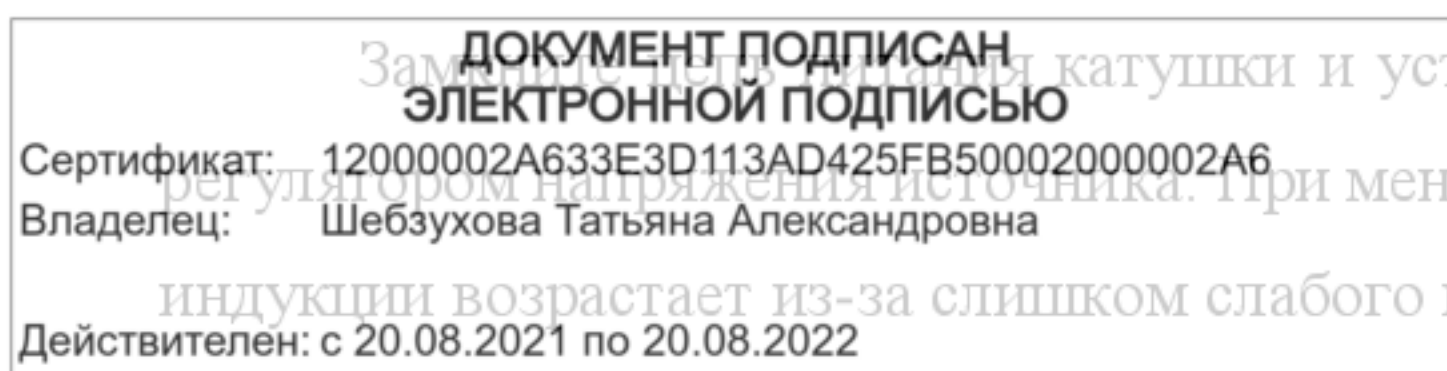
Установите исследуемую катушку на наборную панель, как показано на рис. 2.3 и подведите к ней питание от регулируемого источника постоянного напряжения 0...15 В блока генераторов напряжений (БГН) через амперметр.

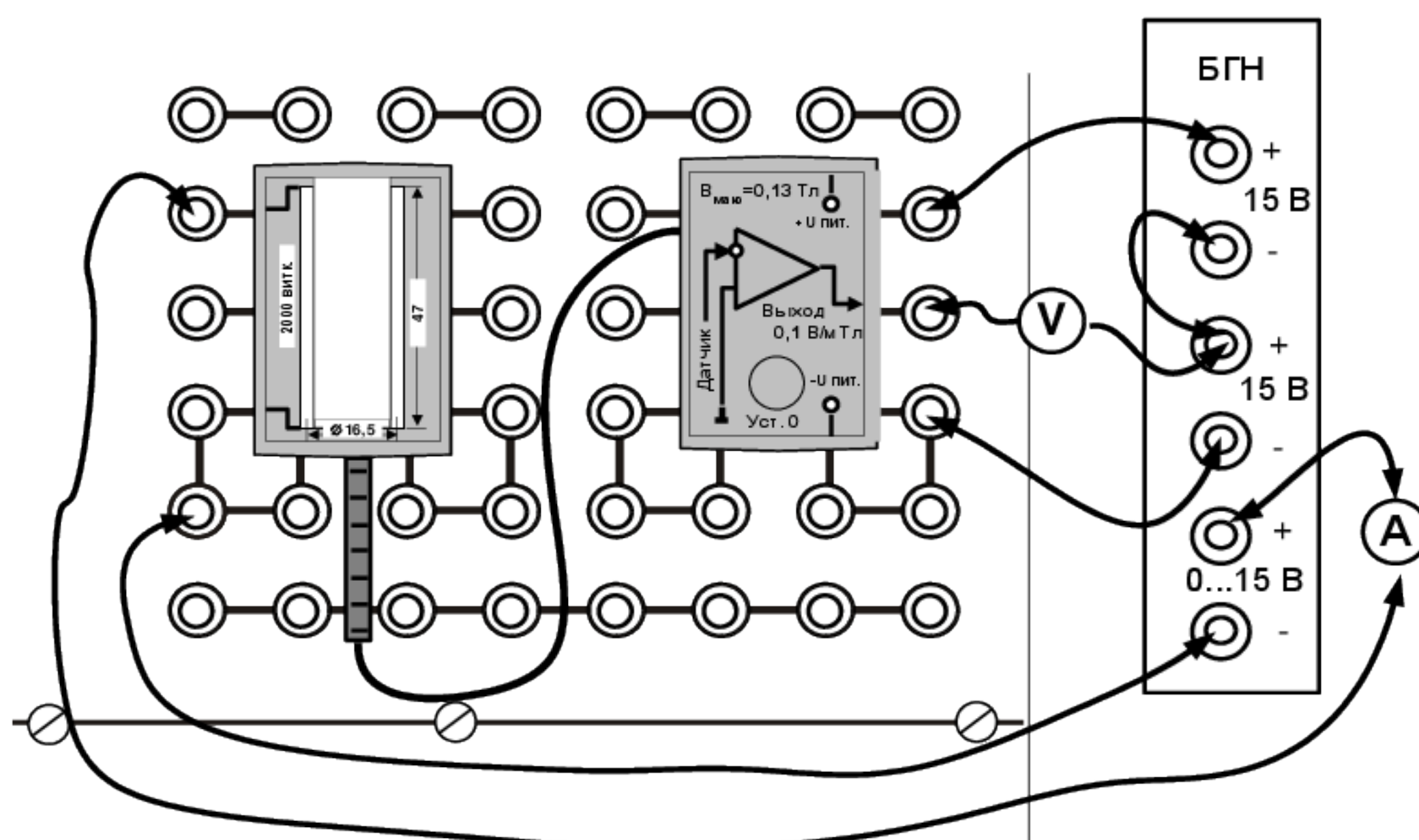
Установите на наборную панель миниблок для измерения магнитной индукции («Тесламетр») и подключите к нему питание +15 В, соединив два нерегулируемых источника постоянного напряжения БГН последовательно (рис. 2.3).

Разомкните цепь питания катушки (выньте из гнезда наборной панели штырёк провода от амперметра) и включите БГН.

При нулевом токе в катушке установите как можно точнее нулевое показание вольтметра на выходе тесламетра ручкой установки нуля (обычно удаётся получить $U_{\text{вых}} < 20 \text{ мВ}$).

Замкнув цепь питания катушки и установите максимально допустимый ток 0,2 А регулятором напряжения источника. При меньшем токе погрешность измерения магнитной индукции возрастает из-за слишком слабого магнитного поля.





Перемещая зонд с датчиком Холла вдоль оси катушки с шагом 5 мм, запишите координаты и соответствующие им значения магнитной индукции в табл. 2.1. Координату $x = 0$ удобно принять в центре катушки. Значение магнитной индукции $B \text{ [мТл]} = 10U_{\text{вых}} \text{ [В]}$. В ходе эксперимента время от времени отключайте питание катушки и корректируйте установку нуля тесламетра.

Постройте график изменения магнитной индукции вдоль оси катушки $B(x)$. Предварительно выберите удобные масштабы и нанесите шкалы по осям.

Вычислите магнитную индукцию в некоторых характерных точках (в точке симметрии, на краю катушки и т. п.) по формуле для однослойной цилиндрической катушки, приведённой в разделе «Общие сведения».

Нанесите расчётные точки на экспериментальном графике, либо сделайте расчёт всего графика на компьютере, используя, например, программу MathCAD. Тогда удобнее экспериментальные точки нанести на расчётном графике. MathCAD- программа с результатами расчёта и эксперимента приведена в приложении 2.

Таблица

$x, \text{ мм}$	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
$U, \text{ В}$											
$B, \text{ мТл}$											

Порядок выполнения работы: установите миниблок «Кольцевые катушки» на наборную панель (рис. 2.4). Если Вы исследуете поле двух катушек, то соедините катушки между собой согласно или встречно и установите поводком заданное расстояние между катуш-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Установите на наборную панель миниблок для измерения магнитной индукции («Тесламетр») и подведите к нему питание +15 В, соединив два нерегулируемых источника постоянного напряжения БГН последовательно.

Разомкните цепь питания катушек (выньте из гнезда наборной панели штырёк провода от амперметра) и включите блок генераторов.

При разомкнутой цепи питания катушек установите как можно точнее нулевое показание вольтметра на выходе тесламетра ручкой установки нуля (обычно удаётся получить $U_{\text{вых}} < 20 \text{ мВ}$).

Замкните цепь питания катушек и установите максимально допустимый ток 0,2 А регулятором напряжения источника. При меньшем токе погрешность измерения магнитной индукции возрастает из-за слишком слабого магнитного поля.

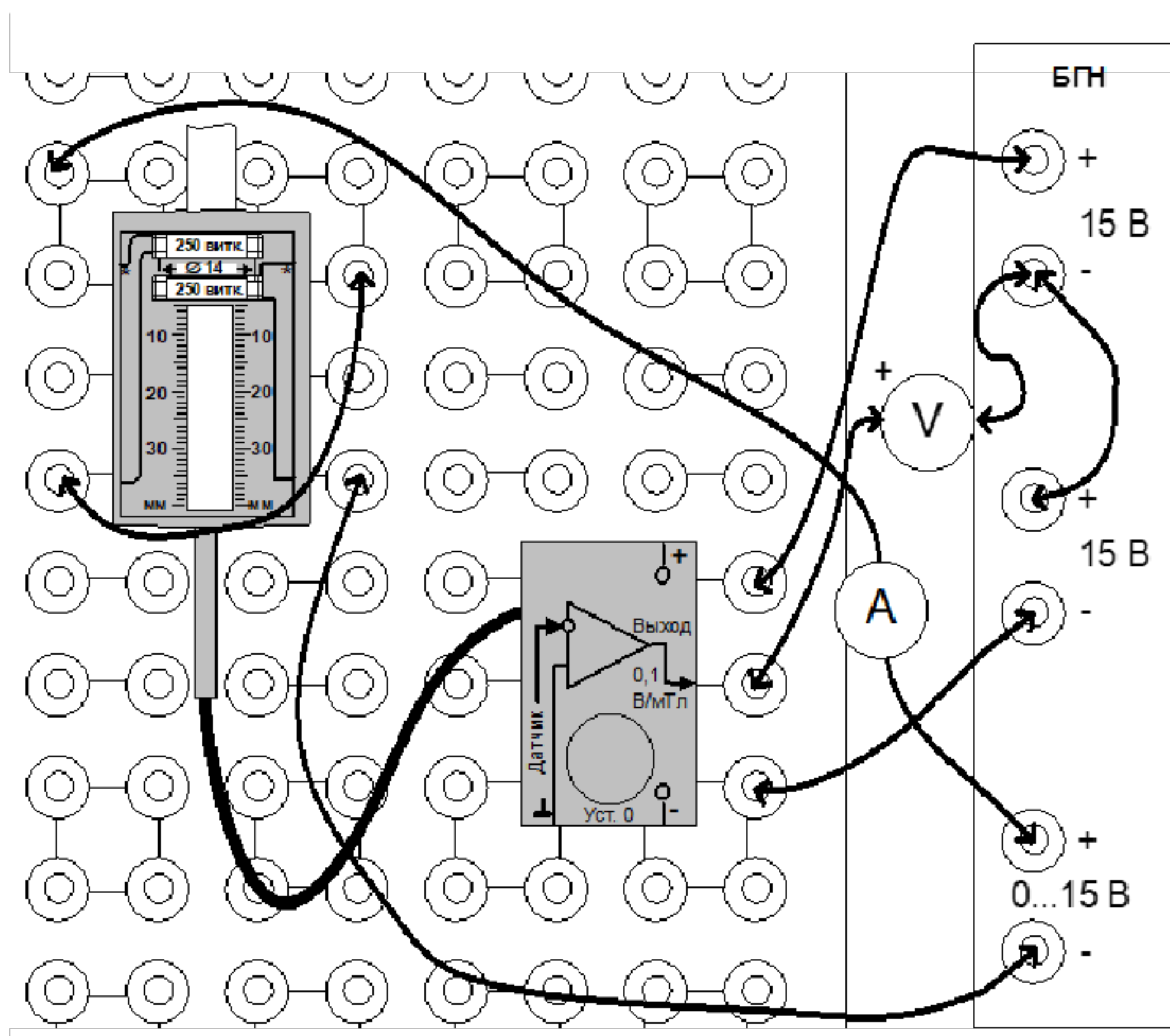
Перемещая зонд с датчиком Холла вдоль оси катушек с шагом 2,5 мм, запишите координаты и соответствующие им значения магнитной индукции в табл. 2.3.1. Координату $x = 0$ удобно принять в центре неподвижной кольцевой катушки. Значение магнитной индукции $B [\text{мТл}] = 10U_{\text{вых}} [\text{В}]$. В ходе эксперимента время от времени отключайте питание катушки и корректируйте установку нуля тесламетра.

Постройте график изменения магнитной индукции вдоль оси катушек $B(x)$. Предварительно выберите удобные масштабы и нанесите шкалы по осям.

Вычислите магнитную индукцию в некоторых характерных точках (в точке симметрии, в центре одной из катушек и т. п.) по формуле для тонкой кольцевой катушки, приведённой в разделе «Краткие сведения из теории».

Нанесите расчётные точки на экспериментальном графике либо сделайте расчёт всего графика на компьютере, используя, например, программу MathCAD. Тогда удобнее экспериментальные точки нанести на расчётном графике. MathCAD- программа с результатами расчёта и эксперимента приведена в приложении 3.

x, мм	-10	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
U, В											
B, мТл											



Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

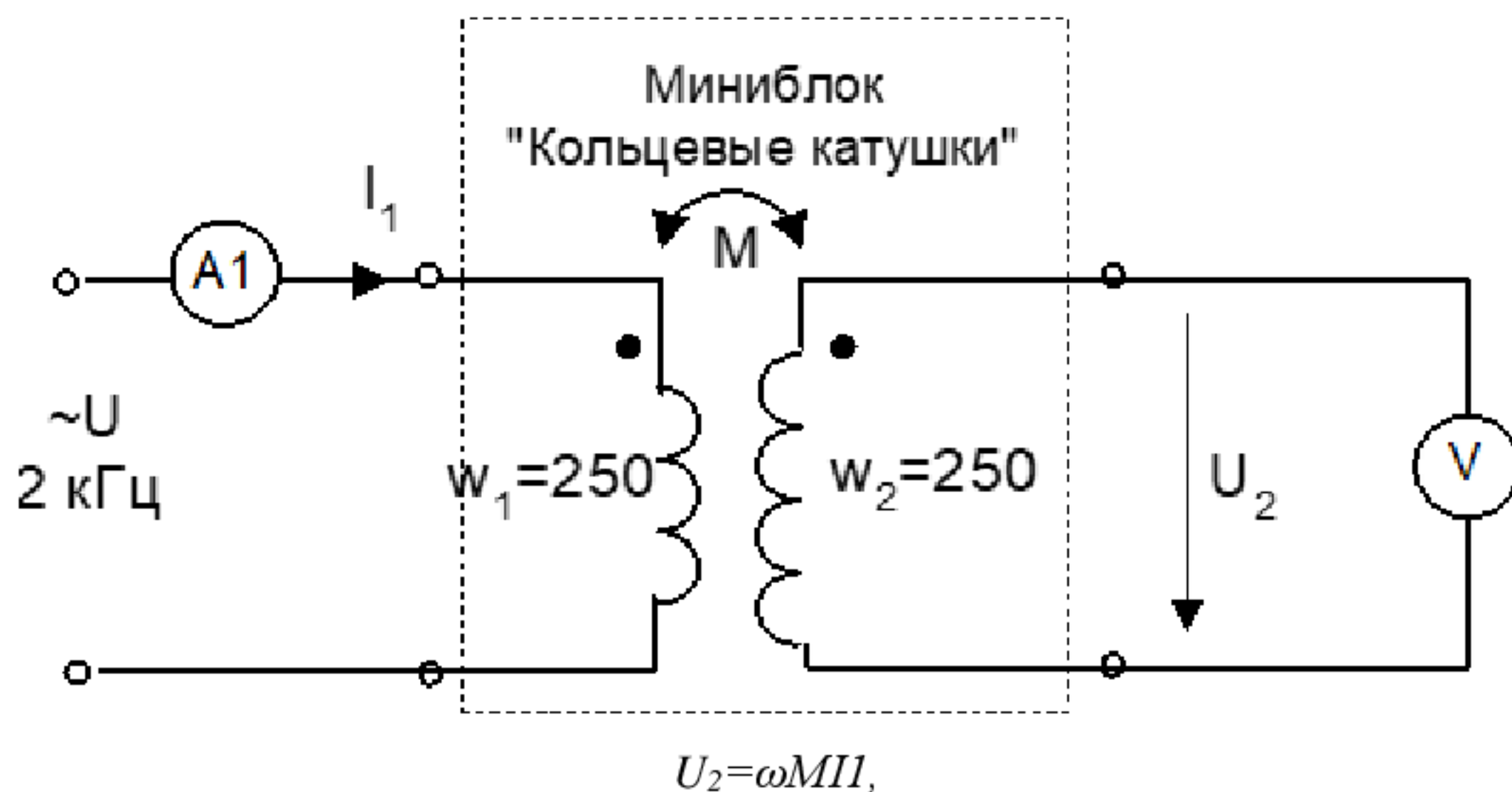
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа №19. Исследование взаимной индуктивности кольцевых катушек

Цель работы: Определение опытным и расчётным путем зависимости взаимной индуктивности двух соосных одинаковых катушек от расстояния между ними.

Основы теории:

Опытным путём взаимная индуктивность двух катушек определяется из опыта, принципиальная схема которого изображена на рис. 3.1. Напряжение, индуцируемое во второй катушке изменением тока в первой:



где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота переменного тока

Отсюда:

$$M = U_2 / \omega I_1.$$

Расчетным путем взаимную индуктивность 2х катушек, изображенных на рисунке 3.2 определяем по формуле

$$M = k \cdot l = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 8,497 \omega^2 k d,$$

где: k – коэффициент связности катушек

l – индуктивность одной из катушек;

ω – число витков одной из катушек

d – средний диаметр катушек

значения коэффициента связи k в зависимости от отношения b/a или обратного от-

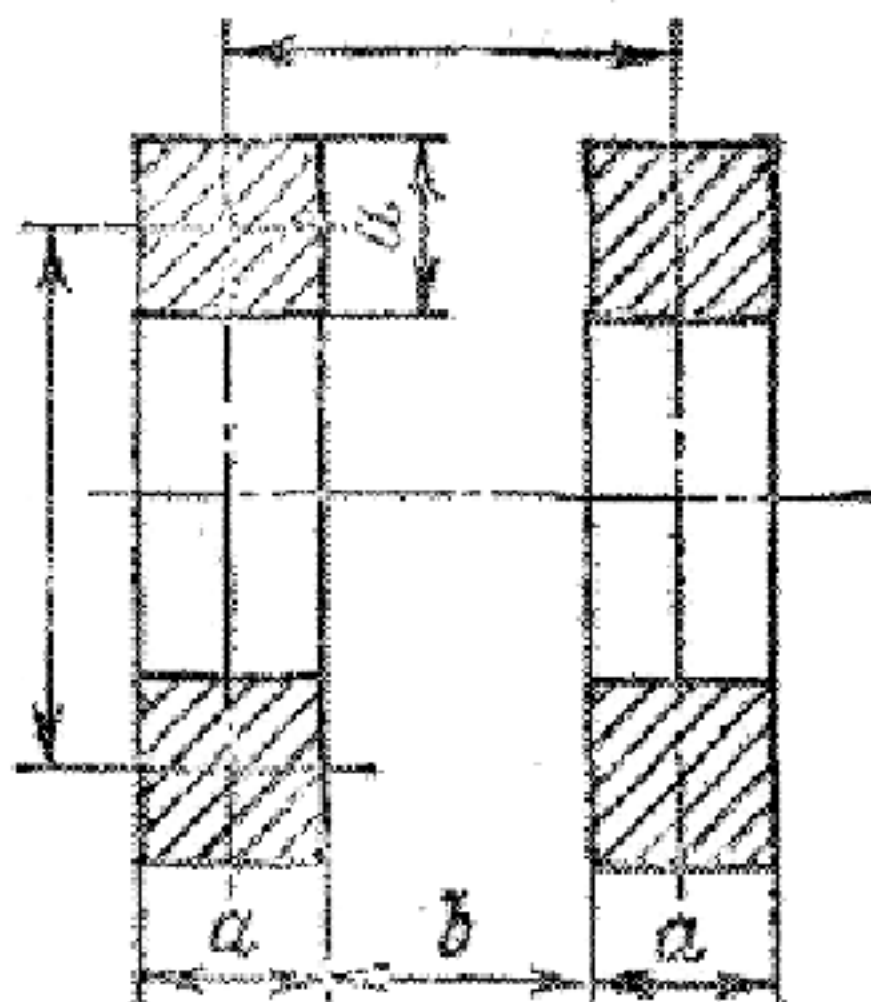
ношения a/b даны в таблице Приложение 4.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022



Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Установите на наборную панель миниблок «Кольцевые катушки» и сделайте все необходимые соединения согласно принципиальной схеме опыта (рис. 3.1)

Установите на генераторе напряжений специальной формы БГН синусоидальное напряжение частотой $2 \dots 3$ кГц и задайте регулятором амплитуды ток в катушке $150 \dots 200$ мА. Запишите эти значения и определите круговую частоту:

$I = \dots \text{А}$, $f = \dots \text{Гц}$, $\omega = \dots \text{рад/с}$.

Изменяя расстояние между катушками b от минимально возможного 5 мм до 25 мм с шагом 5 мм, запишите в табл. 3.1 значения напряжения взаимной индукции

Опытные данные				
$b, \text{мм}$	$U_2, \text{В}$	$M, \text{мГн}$	k	M
5				
10				
15				
20				
25				

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

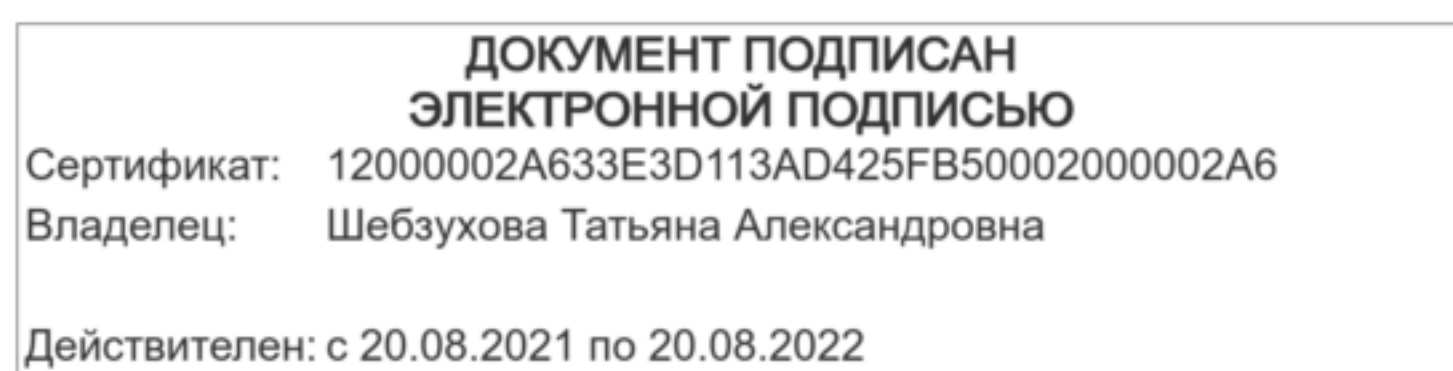
В разделе «Краткие сведения из теории», вычислите опытные значения взаимной индукции и постройте график $M = f(b)$.

По расчётным формулам, приведённым также в разделе «Краткие сведения из теории», рассчитайте зависимость $M(b)$, занесите результаты в табл. 3.1 и постройте расчётный график (для сравнения с опытным).

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.



Лабораторная работа №20. Измерение магнитодвижущих сил и разности магнитных потенциалов

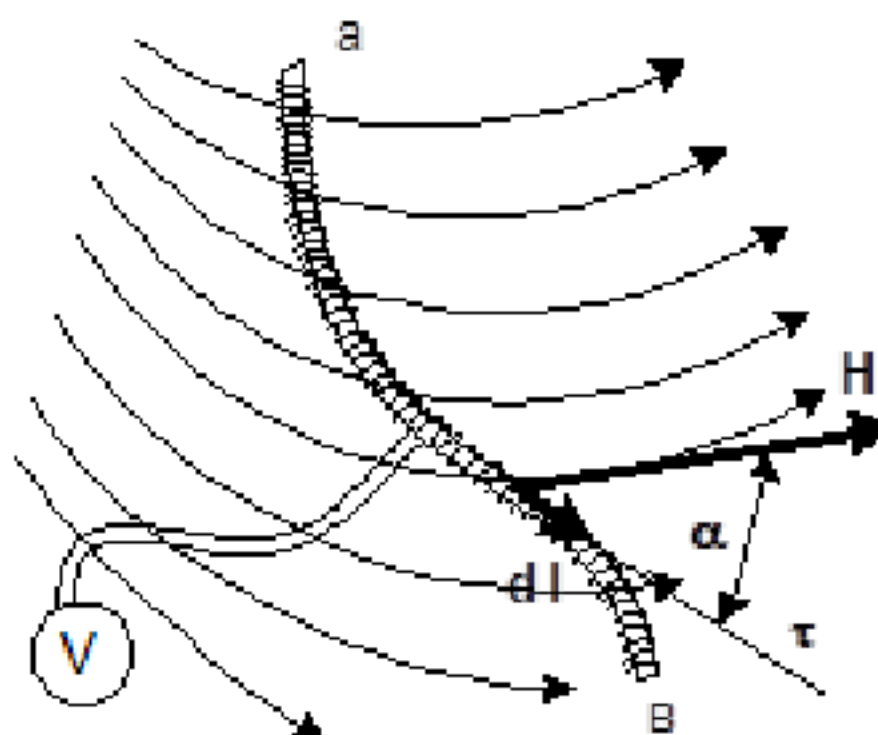
Цель работы: Проверка закона полного тока

Основы теории:

Разностью магнитных потенциалов или магнитным напряжением вдоль некоторого пути «а-в» в магнитном поле (рис. 4.1) называется величина

$$F_{ab} = \int_a^b \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b H \cdot dl \cdot \cos \alpha$$

В области вне электрических токов, магнитное напряжение не зависит от пути интегрирования, а определяется положением конечных точек этого пути.



Магнитное напряжение вдоль замкнутого контура согласно закону полного тока равно полному току $i\omega$, охватываемому этим контуром:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i\omega$$

Замкнутый контур может быть разбит на участки, тогда для него: $F = i\omega$ или, если участки однородные, то $Hl = i\omega$.

Как для измерения магнитодвижущих сил в замкнутом контуре, так и для измерения магнитных напряжений вдоль любого отрезка применяют гибкую ленту из изолирующего материала, равномерно обмотанную изолированным проводом по всей длине, коротко - магнитный пояс или пояс Роговского (рис. 4.1). Поперечное сечение пояса (S) одинаково по всей длине и достаточно мало. Тогда, магнитный поток, сцеплённый с одним витком пояса:

$$\Phi = S\mu_0 H_0 \cos \alpha$$

где α – угол между направлением магнитной силовой линии и продольной осью пояса в данной точке.

На единицу длины пояса приходится w_0 витков, поэтому полное потокосцепление пояса:

$$\Psi = \int_a^B \Phi w_0 dl = \int_a^B S \mu_0 H w_0 \cos \alpha dl = \mu_0 S w_0 F_{ав}.$$

Отсюда:

$$F_{ав} = \frac{1}{\mu_0 S w_0} \Psi = K \cdot \Psi.$$

Постоянная пояса K зависит только от его сечения и числа витков на единицу длины.

Потокосцепление Ψ можно измерить тем или иным способом. В случае постоянного магнитного поля обычно измеряют заряд, протекающий через обмотку пояса при включении или выключении тока, создающего поле. Этот заряд пропорционален установившемуся значению потокосцепления. При синусоидальном токе измеряют непосредственно напряжение индуктируемое переменным магнитным потоком в обмотке пояса. Действующее значение этого напряжения:

$$U = 4,44 f U_m, \text{ откуда } U_m = U / 4,44 f,$$

где U_m – амплитуда потокосцепления.

Отсюда имеем формулу для вычисления амплитуды магнитного напряжения:

$$F_m = \frac{K}{4,44 f} U = K' U, \text{ где } K' = \frac{K}{4,44 f} = \frac{1}{4,44 \mu_0 S w_0 f}.$$

При известной постоянной K или K' , магнитный пояс можно использовать для измерения магнитных напряжений на участках магнитной цепи, магнитодвижущих сил, больших токов без разрыва цепи, определения числа витков катушек.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Порядок выполнения работы: рассчитайте постоянную пояса при частоте синусо-

идального тока $i = I_m \sin \omega t$ (значения w_0 и S указаны на поясе):

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН	
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

$$K' = \frac{1}{4,44 \mu_0 S w_0 f}, \text{ А/В.}$$

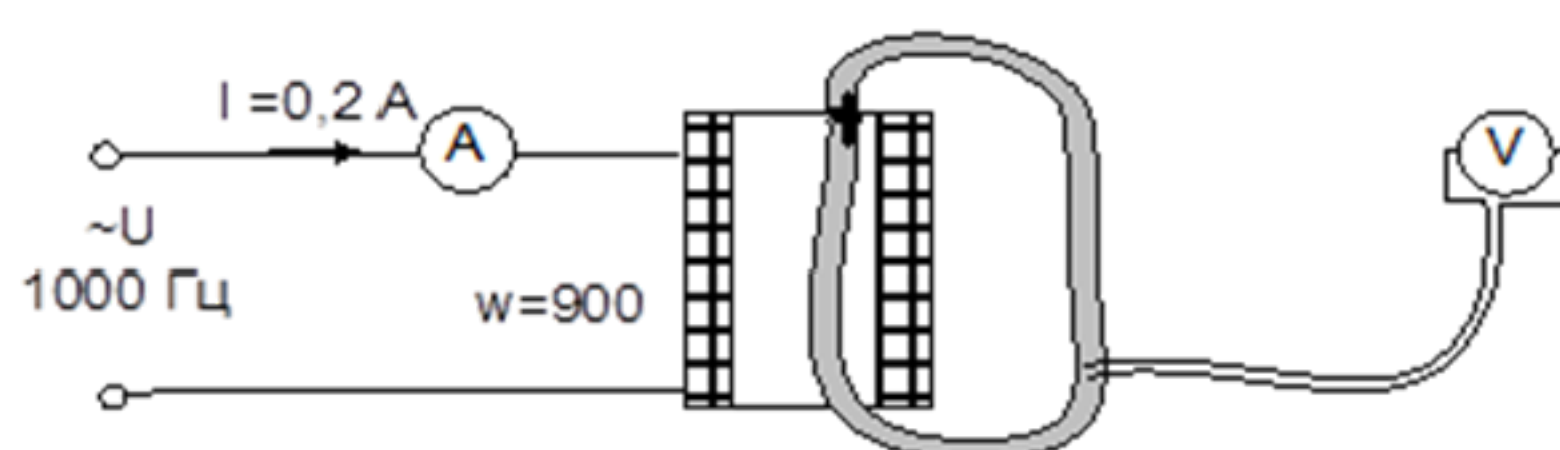
Установите катушку $w = 900$ витков на наборную панель, соберите цепь по схеме рис. 4.2, подайте напряжение частотой 1000 Гц, установите максимально возможный ток в катушке и определите постоянную пояса из закона полного тока:

$$K' = \frac{\sqrt{2}Iw}{U}, \text{ A/B.}$$

Сравните полученную величину с расчётным значением.

Замените катушку на такую же с другим числом витков (например, 300 витков), измерьте магнитное напряжение по замкнутому контуру и определите число витков:

$$w = \frac{K'U}{\sqrt{2}I}.$$



Сравните полученную величину с паспортным значением, указанным на катушке.

Соедините две любые катушки последовательно согласно, установите в них ток 0,2 А, охватите обе катушки магнитным поясом, измерьте сумму магнитных напряжений вдоль замкнутого контура и проверьте выполнение закона полного тока. Результат проверки:

В общем виде:

В цифровом выражении:

$$K'U = \sqrt{2}I(w_1 + w_2).$$

Повторите опыт при встречном включении катушек и также сделайте проверку.

$w = \dots\dots\dots \text{ВИТКОВ}, I = \dots\dots\dots \text{A}, Iw = \dots\dots\dots \text{A/}$

$F_1 = K' U_1 = \dots\dots\dots \text{A}; F_2 = K' U_2 = \dots\dots\dots \text{A};$

$F_3 = K' U_3 = \dots\dots\dots \text{A}; F_4 = K' U_4 = \dots\dots\dots \text{A};$

$F_3 + F_4 = \dots\dots\dots \text{A};$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

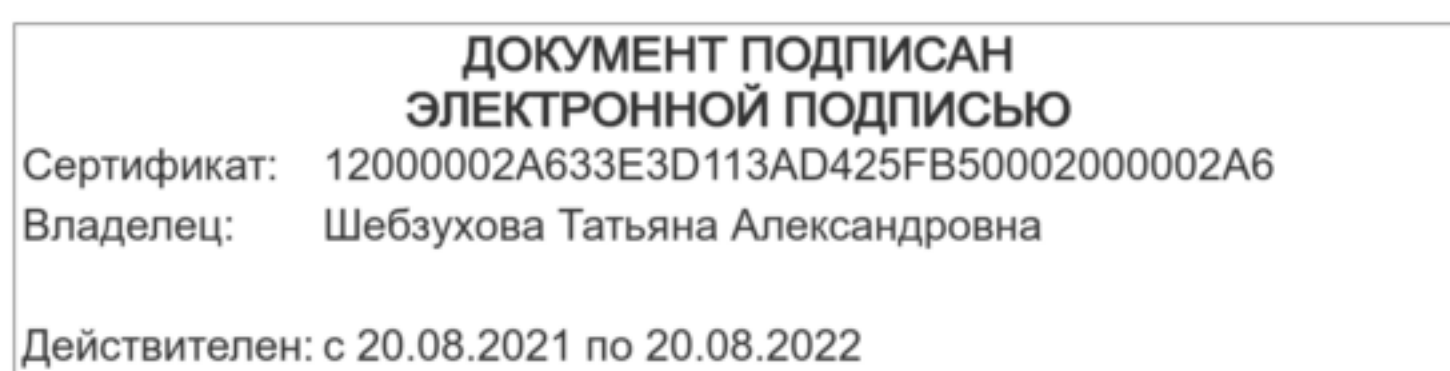
Оставив в цепи одну катушку 900 витков, выясните изменение магнитных напряжений сил на отдельных участках замкнутого контура при внесении в катушку ферромагнитного сердечника (рис. 4.3). Ток во всех опытах поддерживайте неизменным. Скопируйте рис. 4.3 в отчёт, укажите на нём результаты измерений и сделайте расчёты для проверки закона полного тока закону полного тока.

Объясните полученные результаты (увеличение или уменьшение магнитных напряжений на отдельных участках при внесении сердечника, есть ли изменение магнитодвижущей силы по замкнутому контуру и почему?)

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.



Лабораторная работа №21. Исследование поляризационной кривой сегнето-электрика

Цель работы: Экспериментальное получение на экране осциллографа кулон-вольт-вой характеристики нелинейного конденсатора и расчет поляризационной характеристики диэлектрика

Основы теории:

Поляризация диэлектриков - это смещение зарядов внутри его атомов и молекул под действием внешнего электрического поля, а вектор поляризованности P равен количеству заряда, прошедшего в результате поляризации через единицу поверхности, перпендикулярной к направлению смещения.

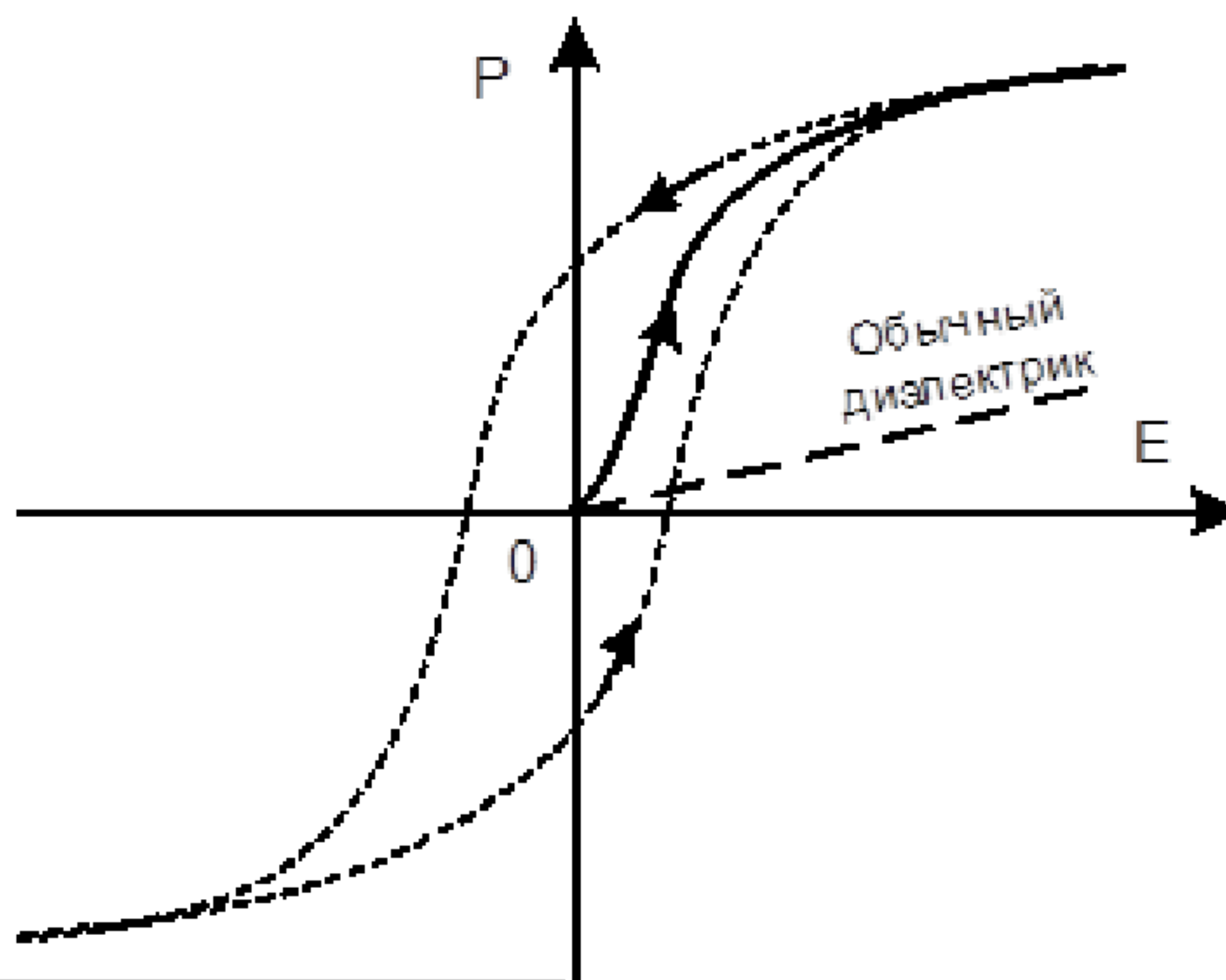
В обычных диэлектриках вектор поляризованности P и вектор электрическое смещения (вектор электростатической индукции) D пропорциональны напряжённости электрического поля E :

$$D = \varepsilon_0 E + \xi E = (\varepsilon_0 + \xi) E = \varepsilon_a E,$$

где: ε_0 – диэлектрическая проницаемость пустоты;

ξ - абсолютная диэлектрическая восприимчивость;

$\varepsilon_a = \varepsilon_0 + \xi$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
С ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Щербатых Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

группа диэлектриков, у которых в некотором интервале температур возникает спонтанная (спонтанная) поляризованность. В отсутствие

внешнего поля векторы спонтанной поляризованности отдельных ячеек вещества (доменов) направлены хаотично и суммарная поляризованность равна нулю. При наложении внешнего поля наряду с обычной поляризацией происходит ориентация поляризованных доменов вдоль линий внешнего поля и суммарная поляризованность возрастает очень быстро. Зависимость $P(E)$, в отличие от обычных диэлектриков, становится нелинейной (рис. 5.1). При некотором значении напряжённости поля этот процесс завершается и при дальнейшем увеличении поля поляризованность возрастает как в обычном диэлектрике. Это область насыщения сегнетоэлектрика. При уменьшении поля и дальнейшем изменении его направления кривая зависимости $P(E)$ не совпадает с первоначальной и идёт несколько выше, а при циклическом изменении напряженности образует замкнутую кривую, которая называется петлёй гистерезиса сегнетоэлектрика. Ширина петли и, следовательно, потери на поляризацию у различных сегнетоэлектриков существенно отличаются. Сегнетомягкие материалы, имеющие очень узкую петлю используются для изготовления малогабаритных конденсаторов большой ёмкости.

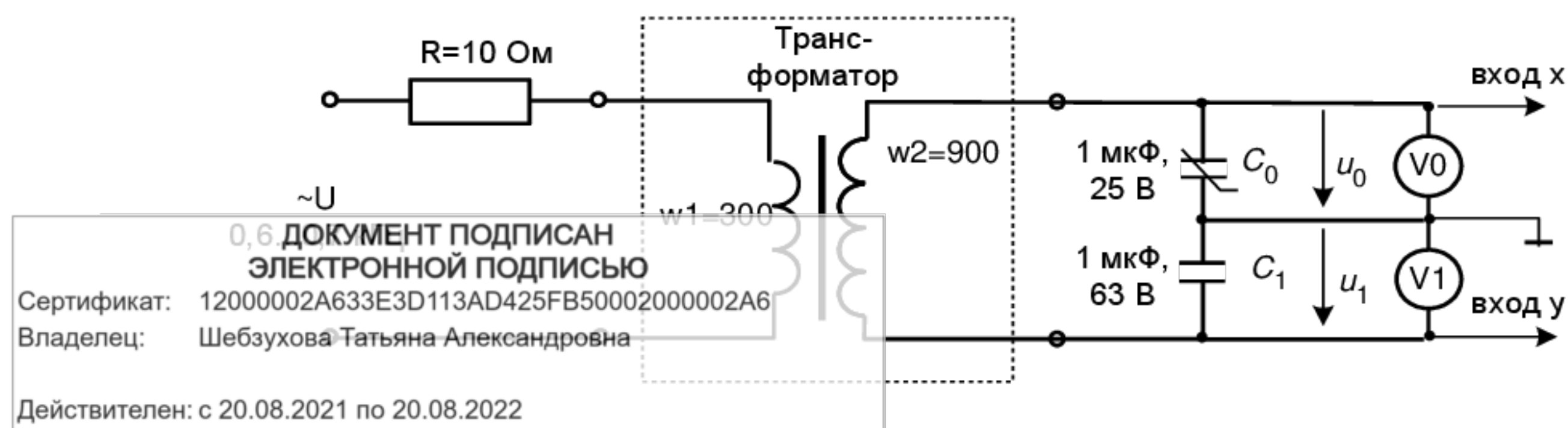
Если у обычных диэлектриков абсолютная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_a = (1 \dots 4) \varepsilon_0$, то у сегнетоэлектриков она может достигать $10^4 \varepsilon_0$.

В данной работе исследуется малогабаритный конденсатор, диэлектриком в котором служит сегнетомягкий материал. Для экспериментального получения зависимости $P(E)$ используется тот факт, что у сегнетоэлектриков $\varepsilon_0 E \ll P$ и, следовательно $D \sim P$, т.е. зависимость $P(E)$ практически совпадает с $D(E)$. Последняя же подобна кулон-вольтовой характеристике $q(U)$, так как в конденсаторе, площадь пластин которого S и расстояние между ними d : $q = DS$ и $U = Ed$. Кулон-вольтовая характеристика конденсатора может быть получена на экране виртуального или электронного осциллографа.

Синусоидальное напряжение подаётся через повышающий трансформатор на цепь, состоящую из последовательно соединённых линейного конденсатора C_1 и нелинейного конденсатора с изоляцией из сегнетоэлектрика C_0 . Заряды на этих конденсаторах одинаковы и пропорциональны напряжению U_1 :

$$q = C_1 U_1.$$

Принципиальная схема опытной установки изображена на рис. 5.2



Напряжение U_1 подаётся на вертикальный вход электронного или виртуального осциллографа, а U_0 - на горизонтальный. На экране осциллографа появляется зависимость $q(U)$ для нелинейного конденсатора. По ней можно рассчитать поляризационную характеристику $P(E)$:

$$E = \frac{u_0}{d},$$

где d – толщина диэлектрика.

$$P = D - \varepsilon_0 E \cong \frac{C_1 u_1}{S},$$

где S – площадь обкладок конденсатора.

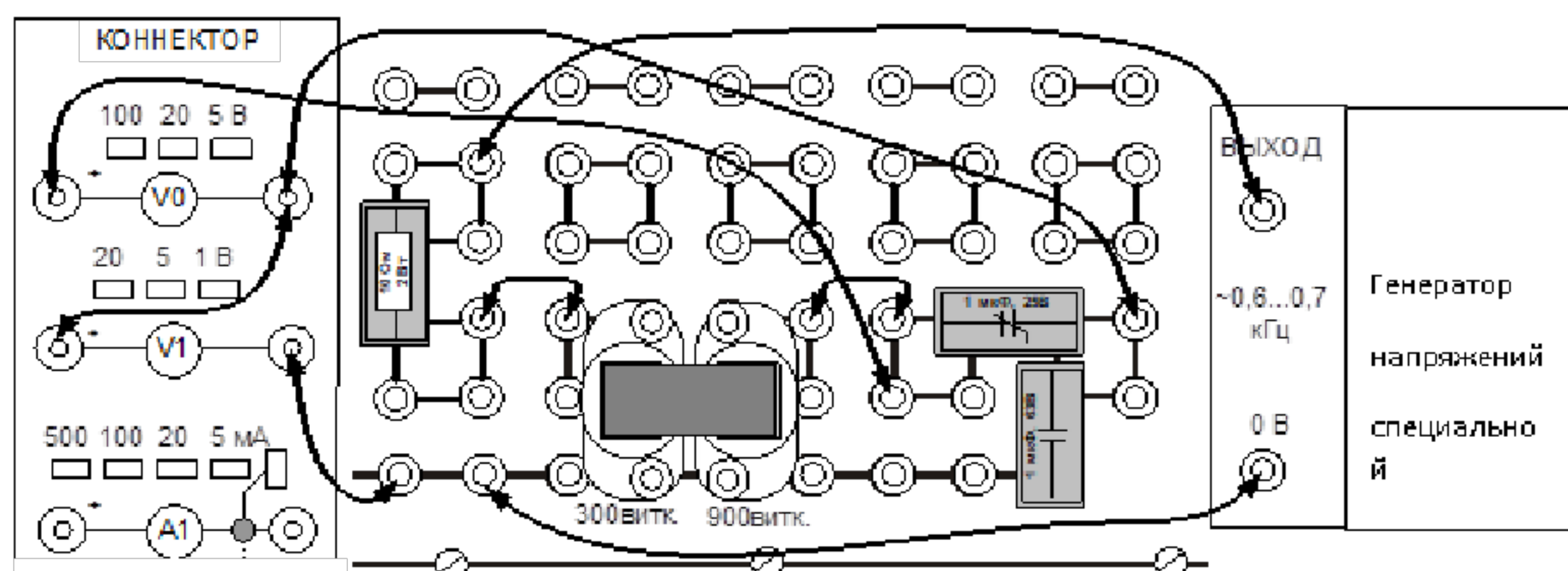
Добавочный резистор $R = 10$ Ом служит для ограничения постоянной составляющей тока, возникающего из-за наличия небольшой постоянной составляющей в выходном напряжении генератора.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите на наборном поле лабораторную установку согласно схеме опыта, изображенной на рис. 5.3 и установите пределы измерения вольтметра V_0 – 100 В, а вольтметра V_1 – 20 В.



Предупреждение: Амплитуда напряжения на нелинейном конденсаторе вследствие

резонансных процессов в нелинейных гармониках может достигать 100В. При использовании виртуальных приборов для уменьшения синфазного сигнала на входе коннектора и сниже-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

ния помех не меняйте местами линейный и нелинейный конденсаторы и соблюдайте полярность подключения коннектора, указанную на схеме. При использовании электронного осциллографа следите за правильным подключением общей точки горизонтального и вертикального входов.

Включите компьютер и откройте блок виртуальных приборов «Приборы I». Активируйте в верхнем окне этого блока прибор V0, а в третьем сверху – V1 и установите род измеряемой величины – «Амплитуда».

Включите виртуальный осциллограф, «подключите» к его первому каналу сигнал V0, а к третьему – сигнал V1. Установите длительность развёртки 200 мкс/дел.

Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 0,6...0,7 кГц максимальной амплитуды.

Убедитесь, что на виртуальном осциллографе появилось изображение примерно одного периода двух сигналов: кривая белого цвета соответствует изменению напряжения на нелинейном конденсаторе U_0 , кривая зелёного цвета – изменению напряжения на линейном конденсаторе U_1 . При необходимости сместите изображение по горизонтали, в центр экрана.

Включите режим X-Y осциллографа и убедитесь, что на экране появилось изображение кулон-вольтной характеристики конденсатора. При этом на вход X нужно подать напряжение U_0 (канал 1), а на вход Y – напряжение U_1 (канал 3). Петля гистерезиса данного типа конденсаторов весьма узкая, на осциллографе она наблюдается как одна линия.

Зафиксируйте масштабы осциллографа нажатием кнопок 1 и 3 на блоках входов. При этом кнопки приобретают красный цвет, и в дальнейшем масштабы автоматически изменяться не будут.

Уменьшите синусоидальное напряжение до нуля и, увеличивая его шаг за шагом до максимально возможного напряжения генератора, записывайте в табл. 5.1 амплитуды напряжений на линейном конденсаторе – U_1 и на нелинейном – U_0 .

Рассчитайте поляризационную характеристику диэлектрика $P=f(E)$ и зависимость $\varepsilon=f(E)$. Выберите масштабы и соответствующие постройте графики.

$U_0, В$	$U_1, В$	$E, В/м$	$P, Кл/м^2$	$\varepsilon = \Delta P / \varepsilon_0 \Delta E$	$E_{\text{н\ddot{o}}}, \hat{A} / \hat{i}$
0					
10					
20					
30					
40					

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

50					
60					
70					

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Лабораторная работа №22. Исследование электромагнитных сил в постоянном магнитном поле

Цель работы: Определение опытным и расчетным путем зависимости электромагнитной силы от тока в катушке.

Основы теории:

В данной работе измеряется сила притяжения двух подковообразных частей разъемного сердечника трансформатора, когда по его обмоткам, включённым последовательно согласно, протекает постоянный ток.

Эта сила может быть определена по плотности энергии магнитного поля в зазоре между сердечниками:

$$F_{\text{расч}} = 2 \left(S \frac{\mu_0 H^2}{2} \right) = S \mu_0 \left(\frac{wI}{2\delta} \right)^2,$$

где: $F_{\text{расч}}$ – расчётная сила в Ньютонах;

множитель 2 учитывает две силы, приложенные к двум концам подвижного сердечника;

$S = 16 \times 13 \cdot 10^{-6} = 208 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ - поперечное сечение сердечника;

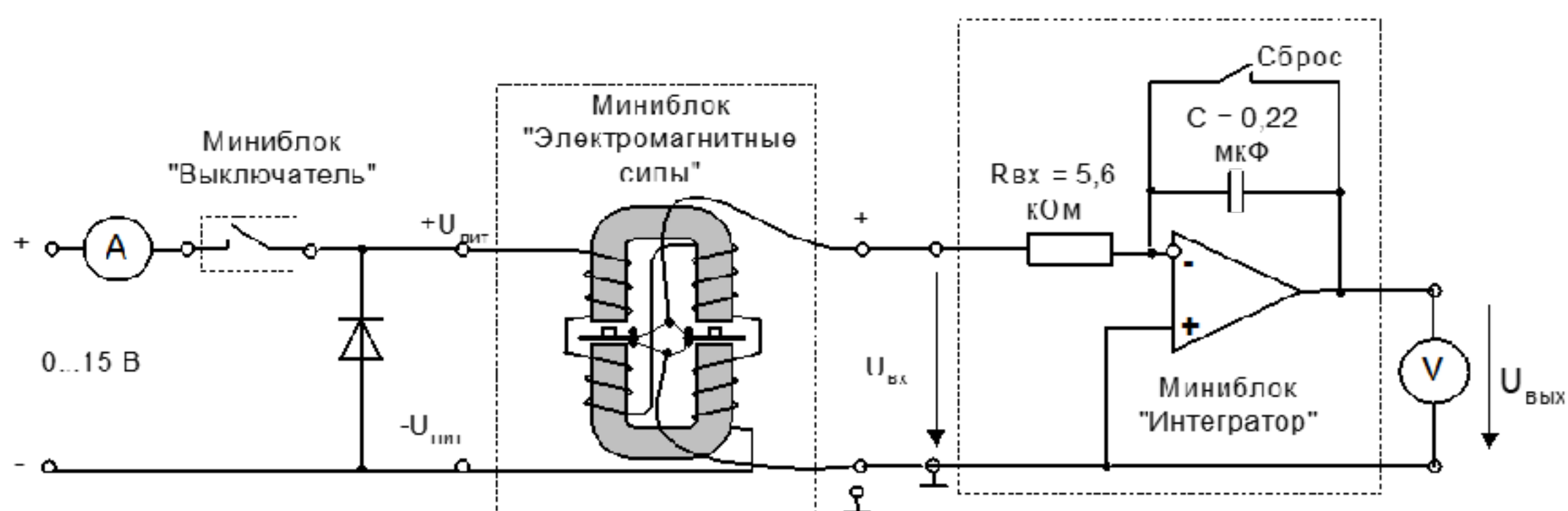
$\mu_0 = 12.56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость воздуха;

H – напряжённость магнитного поля в зазоре;

$w = 1800$ суммарное число витков двух катушек, соединённых последовательно;

I – ток в катушках;

2δ - двойной зазор между подковами сердечника (его величина указана на этикетке миниблока).



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Принципиальная схема установки показана на рис. 7.1. При включении выключателя по катушкам трансформатора начинает протекать постоянный ток, и две половины разъемного сердечника притягиваются друг к другу. При отключении цепи сила притяжения исчезает. Полупроводниковый диод в схеме служит для исключения перенапряжений в схеме при отключении катушки.

Для измерения силы в зазоры между двумя частями сердечника встроены датчики силы. Принцип действия датчика основан на пьезоэлектрическом эффекте. При воздействии силы на его выводах образуются противоположные заряды, пропорциональные силе. Для измерения этого заряда к выходу датчика подключен интегрирующий усилитель. Он интегрирует импульс тока во входной цепи интегратора в процессе изменения силы, воздействующей на датчик. Таким образом, напряжение на выходе интегратора пропорционально заряду на электродах датчика силы. Для установки нулевого напряжения на выходе интегратора служит выключатель «Сброс». После установки нуля переключатель нужно вернуть в исходное положение, и интегратор готов к работе.

Следует иметь в виду, что даже при отсутствии входного сигнала, напряжение на выходе интегратора медленно меняется вследствие дрейфа нуля и интегрирования различных утечек схемы. Поэтому установку нуля необходимо выполнять непосредственно перед каждым измерением, а отсчет выходного напряжения необходимо выполнять в течение двух – трёх секунд сразу после интегрирования.

Для калибровки системы «датчик – интегратор» используется вес самого подвижного сердечника. Он указан на этикетке сердечника.

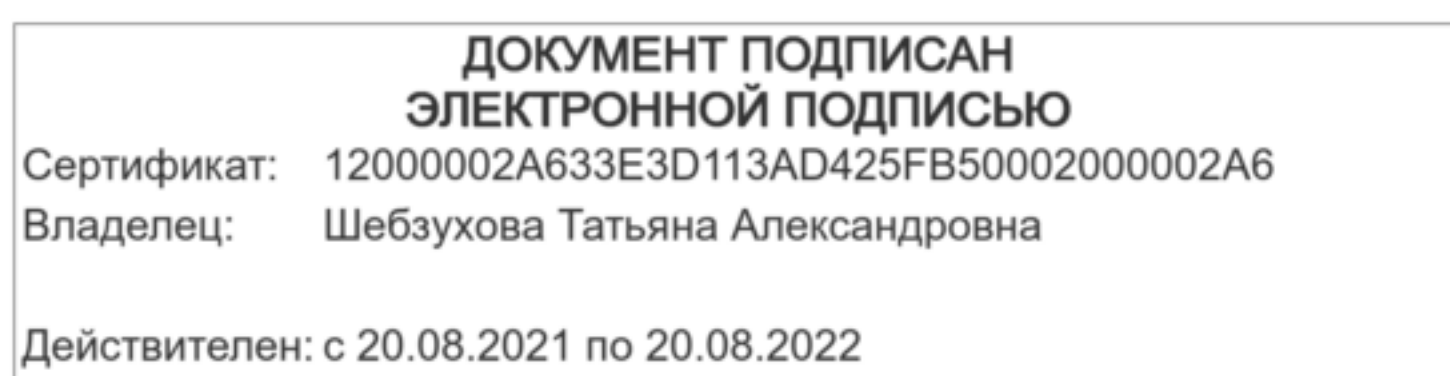
Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите установку как показано на рис. 7.2. Переключатель интегратора установите на «Сброс», выключатель на входе цепи выключите (положение «вверх»).

Включите блок генераторов напряжений (БГН), убедитесь, что на выходе интегратора напряжение близко к нулю (< 10 мВ).



Установите предел измерения вольтметра – 2 В постоянного напряжения, переведите переключатель интегратора в нижнее положение и тотчас же выньте верхнюю половину сердечника из катушек. Сразу после этого сделайте отсчёт напряжения на выходе интегратора.

Переключите интегратор в положение «Сброс», убедитесь, что на его выходе установилось нулевое напряжение, верните переключатель в нижнее положение и тотчас же вставьте сердечник в катушки, не нажимая на него и не бросая с большой высоты. Снова сделайте отсчёт выходного напряжения. Оно не должно сильно отличаться от напряжения в предыдущем опыте, но знак напряжения меняется на противоположный.

Для калибровки системы «датчик – интегратор» проделайте предыдущие два опыта 5 раз, записывая результаты отсчёта напряжения в таблицу 7.1. без учёта знака.

$U_{\text{вых}}$, В при снятии сердечника					
$U_{\text{вых}}$, В при установке сердечника					

Отбросьте сильно отличающиеся значения напряжения, а по остальным вычислите среднее значение и постоянную системы «датчик - интегратор»:

$$U_{\text{ср}} = \dots\dots\dots \text{г/В}, \quad \alpha = 100/U_{\text{п0}} = \dots\dots\dots \text{г/В}.$$

Включите выключатель на входе цепи и установите начальное значение тока в катушке 50 мА, проделайте «Сброс» интегратора, и тотчас выключите ток в катушке. Запомните или запишите показание вольтметра. Проделайте этот опыт несколько раз при включении и выключении тока и запишите в табл. 7.2 среднее или наиболее часто повторяющееся показание вольтметра без учёта знака.

Повторите этот опыт при других значениях тока, указанных в табл. 7.2.

По опытным данным определите силу в граммах по формуле: $F_{\text{эксп}} = \alpha U_{\text{вых}}$ и занесите результаты в табл. 7.2.

Определите расчётную силу по формуле, приведённой в разделе «Краткие сведения из теории», переведите её в граммы и также занесите в табл. 7.2. Постройте графики $F_{\text{расч}}=f(I)$ и $F_{\text{эксп}}=f(I)$, сравните их и сделайте выводы.

I , мА	$U_{\text{вых}}$, В	$F_{\text{эксп}}$, г	$F_{\text{расч}}$, г
50			
100			
150			
200			

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

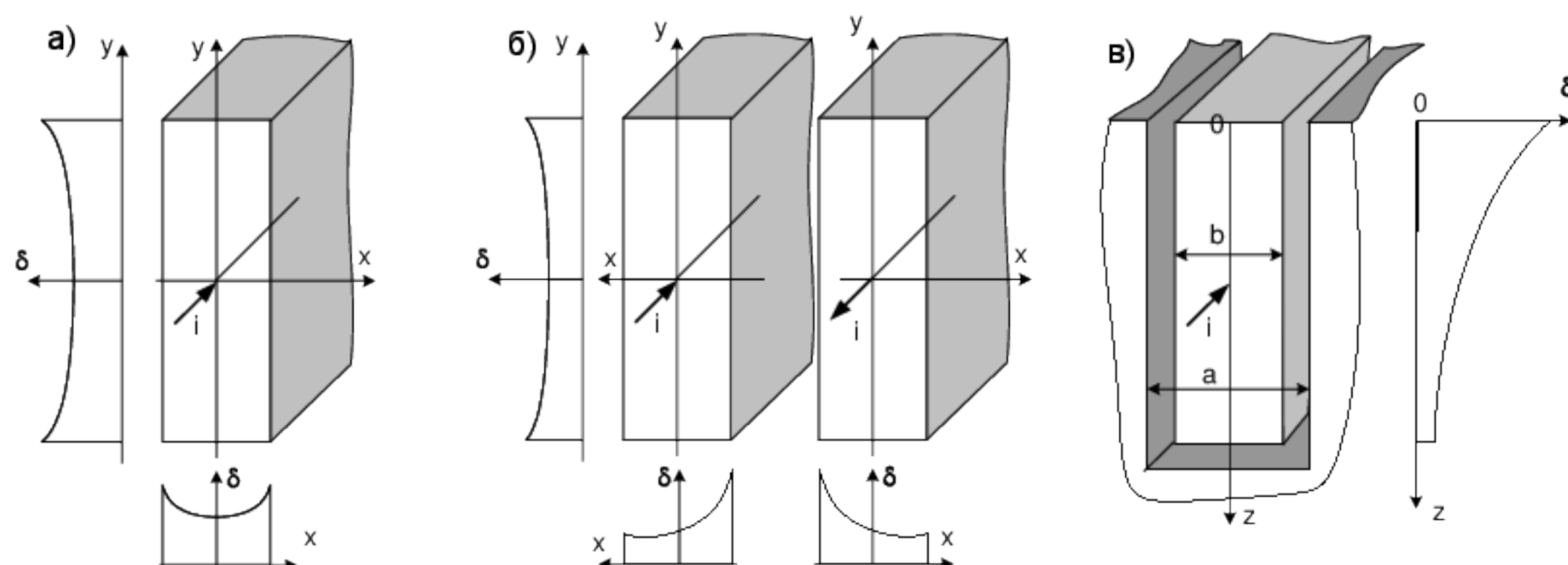
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа №23. Исследование поверхностного эффекта и эффекта близости

Цель работы: Исследование распределения тока в массивных проводниках

Основы теории:

Переменный ток распределяется по сечению массивных проводников (шин) неравномерно вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости. Наибольшая плотность тока наблюдается на поверхности шины и уменьшается к центру поперечного сечения (рис.8.1 а). В двух близко расположенных шинах с противоположным направлением токов, кроме того, происходит вытеснение токов на поверхности шин обращённые друг к другу (рис.8.1б). При одинаковых направлениях токов в двух таких шинах вытеснение токов происходит на внешние поверхности.



В проводнике, уложенном в ферромагнитный паз ротора или статора электрической машины происходит вытеснение тока на открытую поверхность проводника (рис. 8.1в).

Неравномерное распределение тока по сечению проводников приводит к увеличению их активных сопротивлений, что необходимо учитывать при проектировании электрических машин и токопроводов.

Наиболее простым для математического описания является проводник, уложенный в ферромагнитный паз. При достаточной высоте паза можно пренебречь отражённой электромагнитной волной от его дна. Тогда распределение действующего значения плотности тока по высоте паза (вдоль оси z) может быть описано следующей формулой [1]:

$$\underline{\delta}(z) = \delta(0)e^{-kz}e^{j(45^\circ - kz)},$$

где: $k = \sqrt{\frac{b \omega \mu \gamma}{2}}$ - коэффициент затухания и коэффициент фазы;

$$\delta(0) = \frac{\sqrt{2k}}{b} I - \text{действующее значение плотности тока на открытой поверхности про-}$$

водника;

где: I – действующее значение тока в проводнике;

ω – круговая частота переменного тока;

μ и γ – магнитная проницаемость и проводимость проводника;

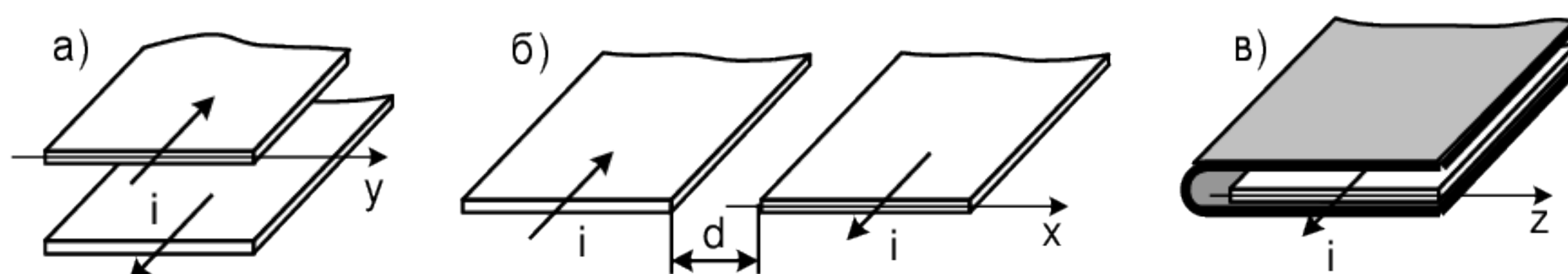
$a = 2$ мм – ширина паза;

$b = 0,35$ мм – толщина проводящей шины.

Согласно этим формулам, плотность тока уменьшается вдоль оси z по экспоненциальному закону (множитель e^{-kz}). Начальная фаза плотности тока на поверхности проводник равна 45° и с увеличением координаты z изменяется по фазе в сторону отставания ($\varphi = 45^\circ - kz$).

Глубина, на которой плотность тока в $e^1=2,718$ раз меньше, чем на поверхности проводника, называется глубиной проникновения электромагнитной волны $h = 1/k$. Глубина проникновения уменьшается с увеличением частоты переменного тока, магнитной проницаемости и проводимости проводника.

В данной работе исследуется распределение тока в ленточных медных проводниках толщиной 0.35 мм и шириной 25 мм при их различном взаимном расположении (рис.8.2).



Первый вариант расположения проводников (см. рис. 8.2а) позволяет экспериментально исследовать распределение тока вдоль ширины (ось y) двух близко расположенных прямоугольных шин, показанных на рис. 8.1б.

Во втором случае (рис. 8.2б) опыт может быть выполнен при двух значениях расстояния между шинами: $d = 63$ мм и $d = 3$ мм.

При большом расстоянии между ленточными проводниками, распределение тока в них аналогично распределению тока в одном из горизонтальных слоёв прямоугольной шины, показанной на рис. 8.1а (вдоль оси x). Эффект близости сказывается здесь незначительно.

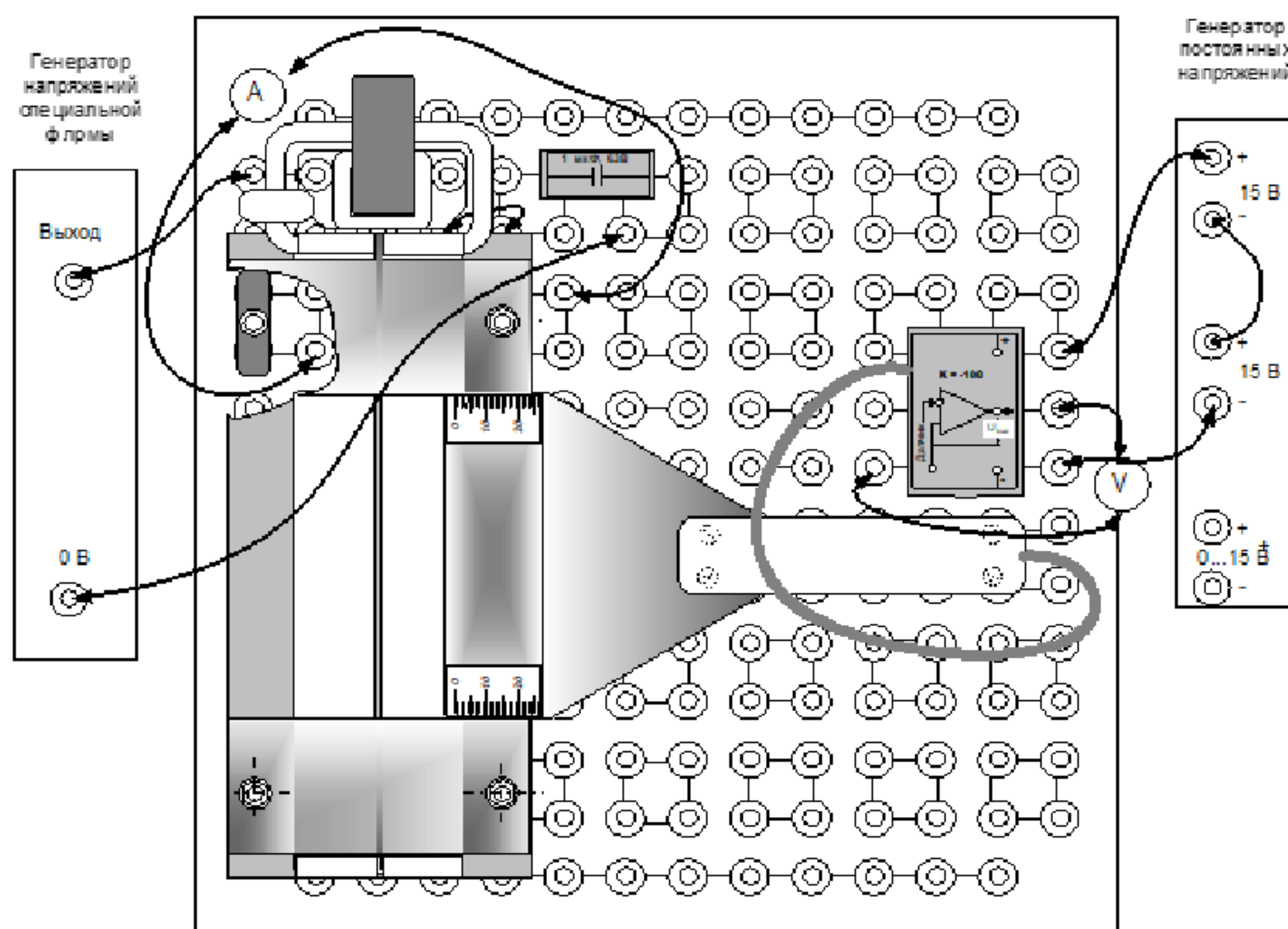
При малом расстоянии между ленточными проводниками их можно рассматривать как один слой близко расположенных шин, показанных на рис. 8.1б. Вдоль горизонтальной оси (оси x) здесь сильно проявляется эффект близости.

В третьем случае (рис. 8.2в.) медная лента охвачена с трёх сторон ферромагнитным экраном и распределение тока в ней примерно такое же, как в проводнике, уложенном в паз электрической машины (рис.8.1.в).

Проводящие ленты для каждого из описанных четырёх вариантов смонтированы на стеклотекстолитовых платах и образуют замкнутые контуры. Электрический ток к ним подводится через понижающий трансформатор, вторичной обмоткой которого является сам контур из проводящих лент и соединительных шин (один виток).

Лабораторная установка с одним из вариантов проводящего контура схематично показана на рис. 8.3.

Для её сборки необходимо сначала установить в левой верхней части наборной панели катушку трансформатора 170 витков вместе с нижней U-образной частью разъёмного сердечника, затем надеть на катушку один из исследуемых проводящих контуров и закрепить его над наборной панелью, пользуясь соединительными вилками со средним выводом, как подставками. Подставки необходимы для увеличения расстояния между исследуемыми проводниками и металлической поверхностью наборной панели. Иначе наводимые в ней вихревые токи существенно изменят распределение тока в исследуемых проводниках.



После этого нужно вставить в катушку вторую половину разъемного сердечника и

скрепить две половинки сердечника резиновым кольцом.

стеклотекстолита, в которую вмонтированы два миниатюрных контакта. Провода от контактов проходят вдоль нити тока в исследуемом проводнике до середины пластинки, затем они поворачивают на 90^0 и проходят вместе сквозь ручку к усилителю напряжения. При прижатии контактов к исследуемой поверхности, соединительные провода датчика оказываются расположенными почти вплотную к этой поверхности. В результате, магнитный поток, сцеплённый с контуром измерительной цепи, оказывается близким к нулю и на вход усилителя подводится активная составляющая напряжения, пропорциональная плотности тока:

$$U = El = \frac{\delta}{\gamma} l$$

где: U – напряжение между контактами датчика,

E – тангенциальная составляющая напряжённости электрического поля,

l – расстояние между контактами датчика, равное 0,1 м.

$\gamma = 55 \frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$ - удельная проводимость медного проводника.

Для измерения тока в исследуемых проводниках используется трансформатор тока с коэффициентом трансформации 100. Он имеет один первичный виток и расположен непосредственно на соединительной шине (рис. 8.3).

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

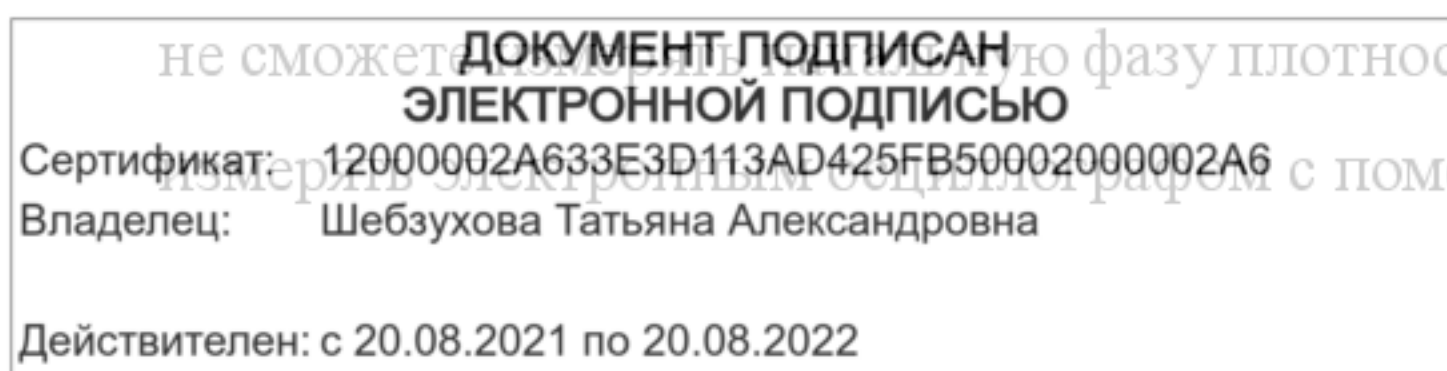
Указания по выполнению лабораторной работы:

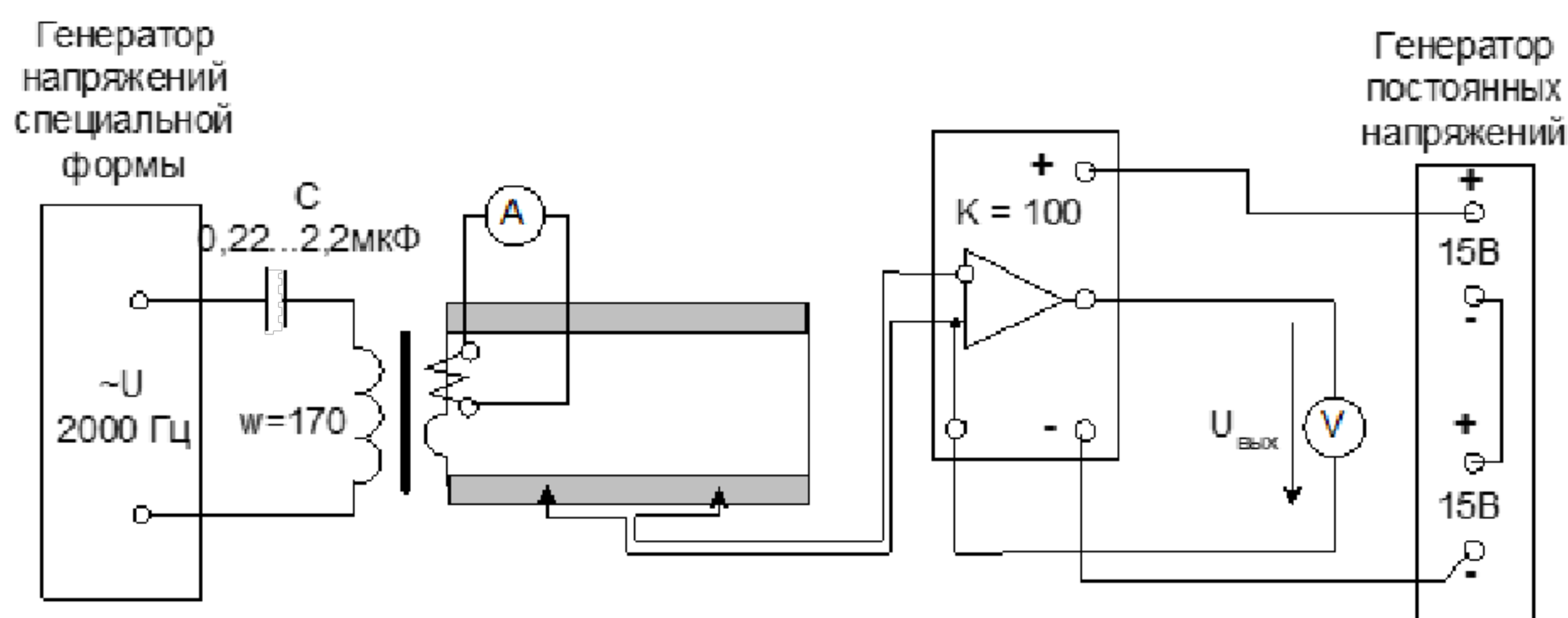
Соберите на наборной панели трансформатор с одним из проводящих контуров и установите на ней миниблок - усилитель датчика плотности тока (рис.8.3). Усилитель расположите в правой части наборной панели как можно дальше от исследуемого контура.

Соберите электрическую цепь согласно принципиальной схеме, изображённой на рис. 8.4. Амперметр и вольтметр, показанные на схеме – виртуальные приборы. Конденсатор служит для компенсации индуктивного сопротивления контура и увеличения тока в нём.

Примечание: Виртуальные приборы можно заменить мультиметрами, но тогда Вы

не сможете измерить фазу плотности тока. Начальную фазу в этом случае можно измерить электронным осциллографом с помощью фигуры Лиссажу.





Включите виртуальные приборы для измерения тока напряжения и сдвига фаз между ними.

Установите на источнике переменного тока синусоидальное напряжение частотой 2000...2500 Гц максимальной амплитуды и подберите ёмкость C , при которой ток в контуре наибольший. Для надёжных измерений он должен быть не меньше 25 А. Не забывайте, что ток в контуре в 100 раз больше, чем во вторичной обмотке трансформатора тока. При необходимости, можно увеличить ток подстройкой частоты приложенного напряжения ближе к резонансной. При этом следите за индикатором перегрузки источника.

Слегка прижимая датчик его контактами к поверхности ленточного проводника и перемещая его по ширине ленты, убедитесь, что изменяются выходное напряжение усилителя и разность фаз. Если прибор показывает разность фаз больше 90° , поменяйте местами зажимы амперметра на коннекторе или зажимы трансформатора тока.

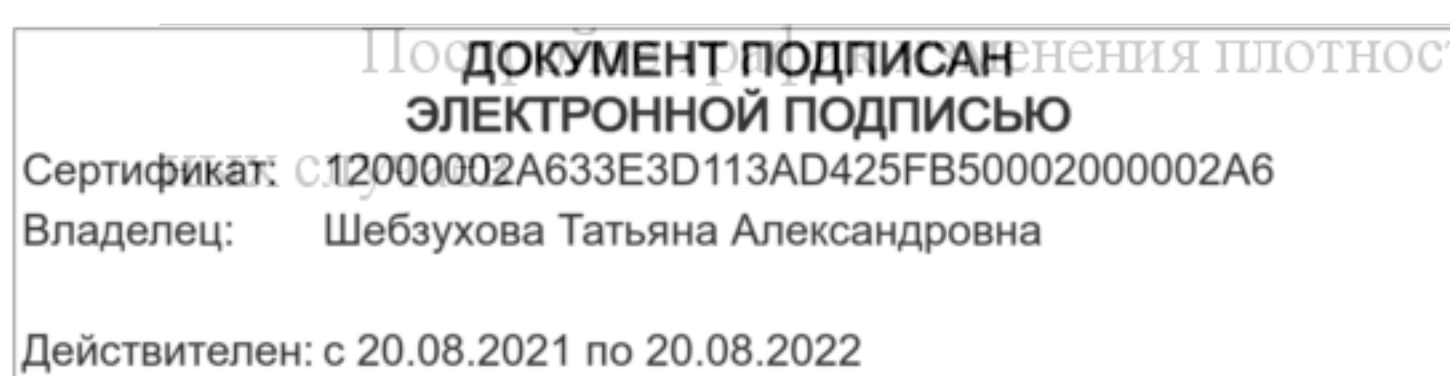
Измерьте выходное напряжение и разность фаз, перемещая датчик от одного края ленты до другого с шагом 5 мм и запишите результаты в табл. 8.1. Координата x в таблице соответствует расстоянию от края ленточного проводника до контактов датчика.

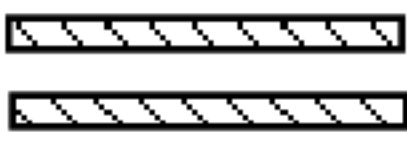
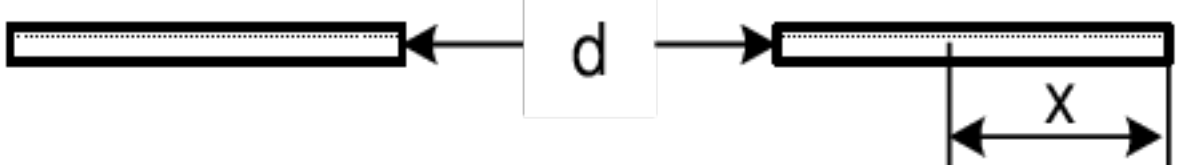
Рассчитайте плотность тока при каждом значении координаты. С учётом коэффициента усиления напряжения усилителя:

$$\delta = \frac{\gamma U_{\text{вых}}}{100l}.$$

Плотность тока получится в А/мм², если в этой формуле γ - в м/(Ом мм²), $U_{\text{вых}}$ - в Вольтах, и $l = 0,1$ м – расстояние между контактами датчика.

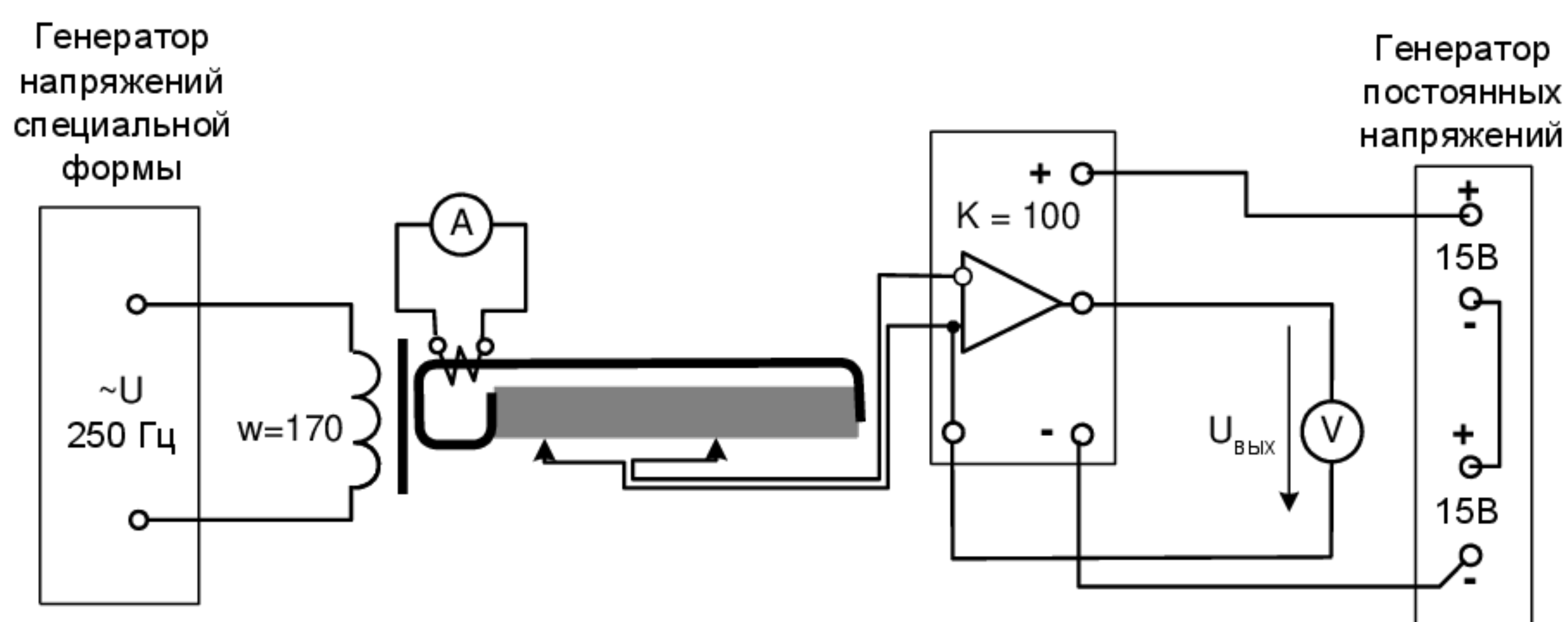
Замените установленный контур на другой, затем на третий и повторите все опыты и расчёты.



Координаты мм									
				d = 63 мм			d = 3 мм		
	$U_{\text{вых}},$ В	$\varphi,$ град.	$\delta,$ А/мм ²	$U_{\text{вых}},$ В	$\varphi,$ град.	$\delta,$ А/мм ²	$U_{\text{вых}},$ В	$\varphi,$ град.	$\delta_{\text{с}},$ А/мм ²
0									
5									
10									
15									
20									
25									

соберите на наборной панели трансформатор с моделью паза электрической машины.

Соберите электрическую цепь согласно схеме, изображённой на рис. 8.5. Усилитель расположите в правой части наборной панели как можно дальше от исследуемого контура. Амперметр и вольтметр, показанные на схеме – виртуальные приборы.



Примечание: Виртуальные приборы можно заменить мультиметрами, но тогда Вы не сможете измерять начальную фазу плотности тока. Начальную фазу в этом случае можно измерять электронным осциллографом с помощью фигуры Лиссажу.

Включите виртуальные приборы для измерения тока, напряжения и сдвига фаз между ними.

Установите на источнике переменного тока синусоидальное напряжение частотой

Слегка прижимая датчик его контактами к поверхности ленточного проводника и вводя его внутрь «паза», убедитесь, что изменяются выходное напряжение усилителя и разность фаз. Если прибор показывает разность фаз больше 90° , поменяйте местами зажимы амперметра на коннекторе или зажимы трансформатора тока.

Измерьте выходное напряжение и разность фаз, перемещая датчик от открытого края «паза» до максимальной глубины с шагом 5 мм и запишите результаты в табл. 8.2. Координата z в таблице соответствует расстоянию от открытой стороны паза до контактов датчика.

Рассчитайте плотность тока при каждом значении координаты. С учётом коэффициента усиления напряжения усилителя:

$$\delta = \frac{\gamma U_{\text{вых}}}{100l}.$$

Плотность тока получится в А/мм², если в этой формуле γ - в м/(Ом мм²), $U_{\text{вых}}$ - в вольтах, и $l = 0,1$ м - расстояние между контактами датчика.

Замените установленный контур на другой контур, затем на третий и повторите все опыты и расчёты.

Постройте график изменения плотности тока и его начальной фазы для исследованных случаев.

Приняв $a = 2$ мм, $b = 0,35$ мм и $\gamma = 55 \frac{i}{\hat{n} \cdot \ddot{n}^2}$, вычислите:

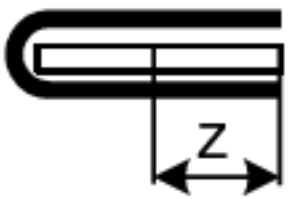
$$k = \sqrt{\frac{b}{a} \frac{\omega \mu \gamma}{2}}, \text{ 1/мм - коэффициент затухания и коэффициент фазы;}$$

$\delta(0) = \frac{\sqrt{2}k}{b} I$, А/мм² - действующее значение плотности тока на открытой поверхности проводника;

Поделайте расчёт изменения плотности тока и его начальной фазы от координаты по формулам:

$$\underline{\delta}(z) = \delta(0)e^{-kz} \quad \text{и} \quad \varphi = 45^\circ - kz \frac{180}{\pi}.$$

Результаты запишите в ту же табл. 8.2, постройте расчётные графики для сравнения с экспериментальными.

	Экспериментальные данные:			Расчётные данные:		
	$f = \dots\dots\dots \text{Гц};$ $I = \dots\dots\dots \text{А}$			$k = \dots\dots\dots 1/\text{мм};$ $\delta = \dots\dots\dots \text{А/мм}^2.$		
z, мм	U _{вых} , В	φ, град.	δ _н , А/мм ²	kz, 1/мм	δ, А/мм ²	φ, град.
0						
5						
10						
15						
20						

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

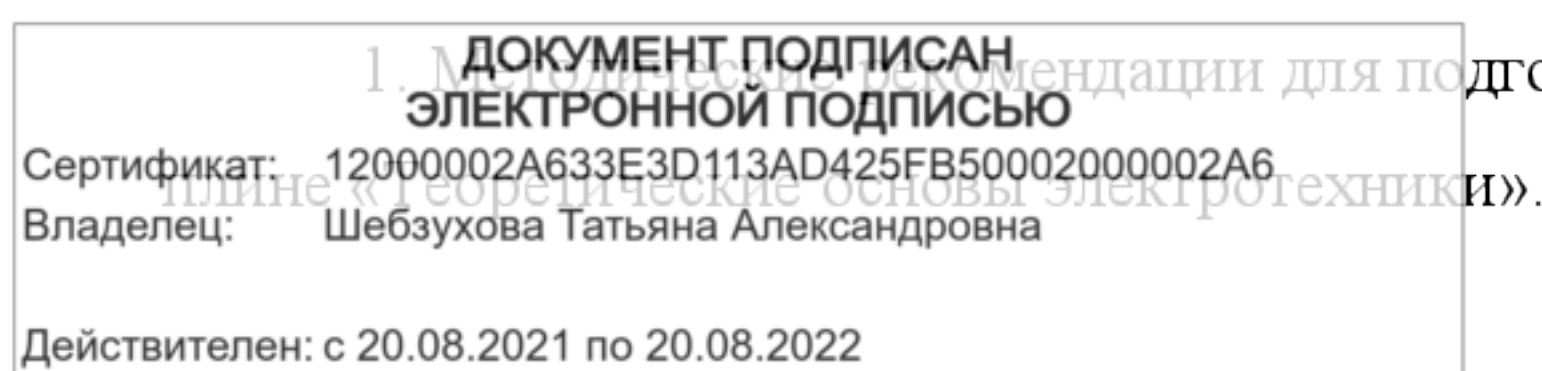
5.1.2 Перечень основной литературы:

1. Теоретические основы электротехники : учебник / И. Я. Лизан, К. Н. Маренич, И. В. Ковалева [и др.]. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. — 628 с. — ISBN 978-5-9729-0663-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/114971.html>
2. Зонов, В. Н. Теоретические основы электротехники. Электрические и магнитные цепи постоянного тока : учебное пособие / В. Н. Зонов, П. В. Зонов, Ю. Б. Ефимова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 80 с. — ISBN 978-5-7782-4090-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98742.html>
3. Петренко, Ю. В. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи с распределенными параметрами : учебное пособие / Ю. В. Петренко. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2019. — 64 с. — ISBN 978-5-7782-3876-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99223.html>

5.1.3 Перечень дополнительной литературы:

1. Горбунова Л.Н. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] / Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева. — Электрон. текстовые данные. — Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2015. — 117 с. — 978-5-9642-0269-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55913.html>
2. Крутов А.В. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 376 с. — 978-985-503-580-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67742.html>

5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине



подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным занятиям по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

3. Методические рекомендации для выполнения расчетно-графической работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

4. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Указание по технике безопасности

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

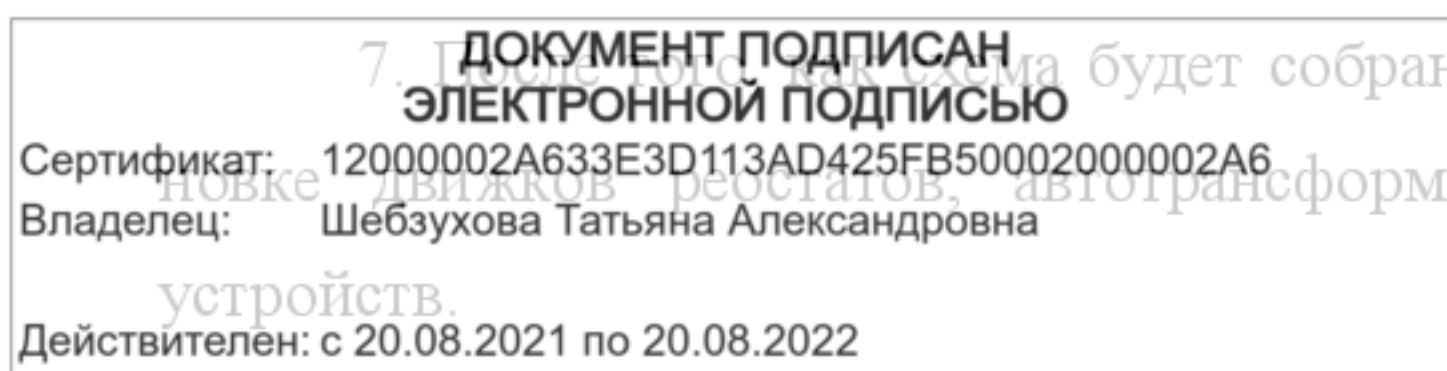
3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.



8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан, не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

13. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование, или приборы с других рабочих мест
- без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия, подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

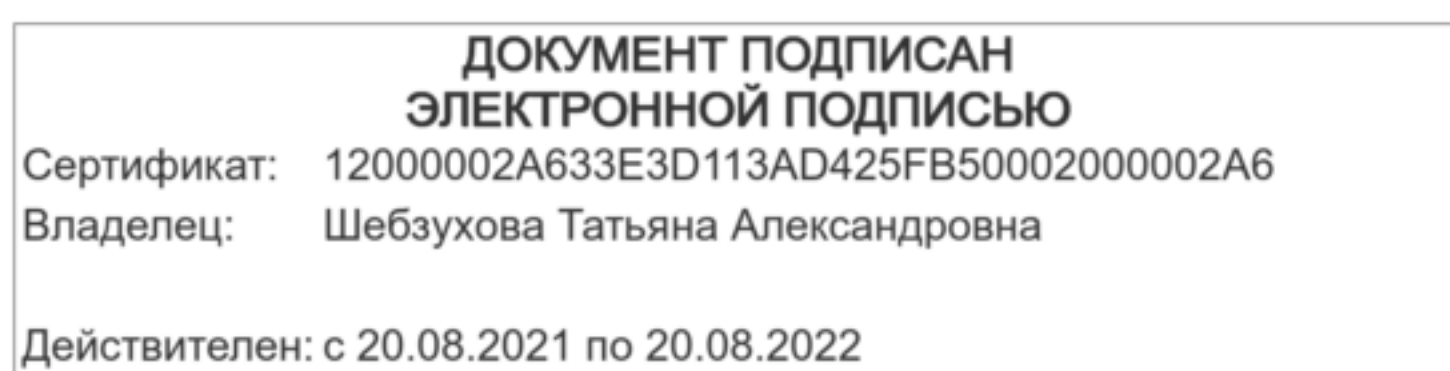
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

№ п/п		Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование практических работ	
4.	Содержание практических работ	
4.1	Практическая работа №1 Расчет электрической цепи с одним источником ЭДС смещанном соединениях резисторов	
4.2	Практическая работа №2 Расчет сложной электрической цепи методом узловых и контурных уравнений.	
4.3.	Практическая работа №3 Расчет сложной электрической цепи методом контурных токов.	
4.4	Практическая работа №4 Расчет сложной электрической цепи методом узловых потенциалов.	
4.5	Практическая работа №5 Применение метода наложения для расчета электрических цепей постоянного тока.	
4.6	Практическая работа №6 Применение метода эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений.	
4.7	Практическая работа №7 Расчет неразветвленных магнитных цепей.	
4.8	Практическая работа №8 Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока.	
4.9	Практическая работа №9 Расчет однофазных цепей синусоидального тока.	
4.10	Практическая работа №10 Расчет симметричных трехфазных цепей.	
4.11	Практическая работа №11 Расчет несимметричных трехфазных цепей.	
4.12	Практическая работа №12 Расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих.	
4.13	Практическая работа №13 Расчет и анализ линейных при периодических не-синусоидальных напряжениях и токах.	
4.14	Практическая работа №14 Расчет и анализ однофазных цепей несинусоидального тока.	

4.15 Практическая работа №15 Расчет и анализ трехфазных цепей несинусоидального тока.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- 4.16 Практическая работа №16 Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами классическим методом.
 - 4.17 Практическая работа №17 Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом.
 - 4.18 Практическая работа №18 Расчет переходных процессов в нелинейных электрических цепях.
 - 4.19 Практическая работа №19 Расчет электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме.
 - 4.20 Практическая работа №20 Расчет переходных процессов в длинных линиях.
 - 4.21 Практическая работа №21 Электростатическое поле.
 - 4.22 Практическая работа №22 Электрическое поле в проводящих средах.
 - 4.23 Практическая работа №23 Магнитное поле.
 - 4.24 Практическая работа №24 Переменное электромагнитное поле.
 - 5 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
 - 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
 - 5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
 - 5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины
- Приложение

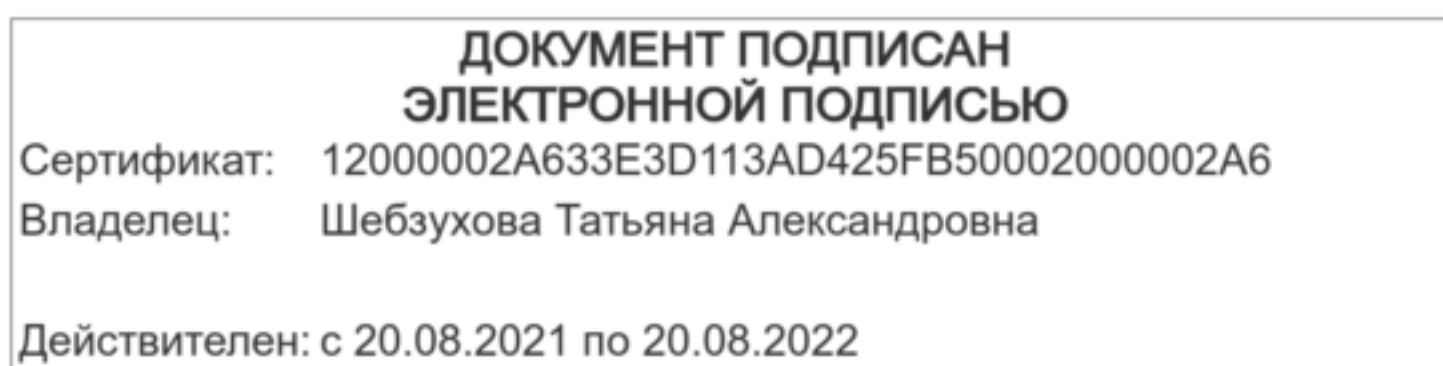


Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины. Практические занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.



1. Цель и задачи изучения дисциплины

Целью дисциплины «Теоретические основы электротехники» является изучение студентами основных закономерностей процессов, протекающих в электротехнических цепях и методов определения электрических величин, характеризующие эти процессы, приобретение теоретических и практических знаний по теоретическим основам электротехники, необходимых для успешного освоения последующих дисциплин специальности.

Задачи дисциплины состоят в освоении студентами:

- принципов составления и записи уравнений, описывающих процессы в цепи в соответствии с законами Кирхгофа, Ома, Фарадея - Максвелла - Ленца;
- основных принципов анализа процессов по линейным схемам замещения цепей: наложения, линейности, компенсации, взаимности;
- основных методов анализа линейных схем (методы контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного источника) и получении начальных сведений о возможности использования ЭВМ при расчетах;
- комплексного метода определения амплитуд и начальных фаз гармонических токов и напряжений в установившихся режимах;
- классического, операторного и интегрального метода анализа переходных процессов по линейным схемам замещения цепей, а также принципов составления уравнений и подготовки информации для расчета переходных процессов на ЭВМ методом переменных состояний;
- методов расчета электромагнитных процессов во взаимосвязанных контурах;
- основ теории четырехполюсников;
- методов построения фильтров и их расчета в электротехнических и электронных схемах;
- основ анализа процессов в цепях с распределенными параметрами;
- основ теории поля;
- методов электрических измерений с использованием измерительных приборов;
- основных процессов, протекающих в электрических цепях с негармоническими токами.

2. Оборудование и материалы

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

3. Наименование практических работ

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
3 семестр			
1	Практическая работа №1. Расчет электрической цепи с одним источником ЭДС смешанном соединениях резисторов Определить эквивалентное сопротивление цепи со смешанным соединением.		
2	Практическая работа №2. Расчет сложной электрической цепи методом узловых и контурных уравнений. Определение токов ветвей с использованием законов Кирхгофа.	1,5	
3	Практическая работа №3. Расчет сложной электрической цепи методом контурных токов. Определение токов ветвей по методу контурных токов.		
4	Практическая работа №4. Расчет сложной электрической цепи методом узловых потенциалов. Определение токов ветвей по методу узловых потенциалов.	1,5	
5	Практическая работа №5. Применение метода наложения для расчета электрических цепей постоянного тока. Научиться с помощью метода наложения рассчитывать сложные электрические цепи с несколькими источниками ЭДС.		
6	Практическая работа №6. Применение метода эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений. Научиться с помощью метода эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений рассчитывать электрические цепи с одним источником питания, применяемые в области электрических измерений.	1,5	
7	Практическая работа №7. Расчет неразветвленных магнитных цепей. Получить практические навыки расчета неразветвленных магнитных цепей.		
8	Практическая работа №8. Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока.		

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	Получить навыки перевода синусоидальных величин в комплексные, научиться строить векторные диаграммы.		
9	Практическая работа №9. Расчет однофазных цепей синусоидального тока. Получить навыки расчета разветвленных однофазных цепей синусоидального тока различными методами как в обычных режимах, так и в режиме резонанса, научиться сопровождать расчеты векторными и топографическими диаграммами.		
Итого за 3 семестр:		4,5	
4 семестр			
10	Практическая работа №10. Расчет симметричных трехфазных цепей. Получить навыки расчета трехфазных цепей синусоидального тока при симметричной нагрузке.		
11	Практическая работа №11. Расчет несимметричных трехфазных цепей. Получить навыки расчета трехфазных цепей синусоидального тока при несимметричной нагрузке.		
12	Практическая работа №12. Расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих. Освоить навыки применения расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих	1,5	
13	Практическая работа №13. Расчет и анализ линейных при периодических несинусоидальных напряжениях и токах. Приобрести практические навыки разложения периодической функции в ряд Фурье.		
14	Практическая работа №14. Расчет и анализ однофазных цепей несинусоидального тока. Освоить расчет и анализ однофазных цепей несинусоидального тока.	1,5	
15	Практическая работа №15. Расчет и анализ трехфазных цепей несинусоидального тока. Освоить навыки расчет трехфазных цепей несинусоидального тока.		
16	Практическая работа №16. Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами классическим методом. Приобрести практические навыки расчета переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами классическим мето-	1,5	

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

17	Практическая работа №17. Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом. Изучить методику расчета переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом.		
18	Практическая работа №18. Расчет переходных процессов в нелинейных электрических цепях. Освоить методику расчета переходных процессов в нелинейных электрических цепях.		
	Итого за 4 семестр:	4,5	
5 семестр			
19	Практическая работа №19. Расчет электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме. Изучить методику расчета электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме.	1,5	
20	Практическая работа №20. Расчет переходных процессов в длинных линиях. Приобрести навыки расчета и анализа переходных процессов в длинных линиях.		
21	Практическая работа №21. Электростатическое поле. Изучить методику и приобрести практические навыки расчета электростатического поля.		
22	Практическая работа №22. Электрическое поле в проводящих средах. Изучить методику и приобрести практические навыки расчета электрического поля в проводящих средах.	1,5	
23	Практическая работа №23. Магнитное поле. Изучить методику и приобрести практические навыки расчета магнитного поля.		
24	Практическая работа №24. Переменное электромагнитное поле. Изучить методику и приобрести практические навыки расчета переменного магнитного поля.		
	Итого за 5 семестр:	3	
	Итого:	12	

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

4. Содержание практических работ

Практическая работа №1. Расчет электрической цепи с одним источником ЭДС смешанном соединении резисторов

Цель: Определить эквивалентное сопротивление цепи со смешанным соединением.

Основы теории:

Электрическая цепь, образованная путем соединения между собой идеализированных элементов, является математической моделью реального электротехнического или электронного устройства. Чем больше элементов содержит такая цепь, тем точнее отображает она характеристики моделируемого устройства. Дадим определения основных понятий, касающихся геометрической конфигурации, или топологии, электрических цепей.

Ветвь – участок цепи с двумя выводами. Ветвью может быть отдельный элемент либо группа элементов, соединенных последовательно или параллельно.

Узел – точка соединения двух или более ветвей. Место соединения двух ветвей удобно рассматривать в качестве узла при машинных расчетах. При ручных расчетах несколько элементов, соединенных последовательно или параллельно, удобно рассматривать как одну ветвь. Поэтому при ручных расчетах узлом считают соединение трех или более ветвей.

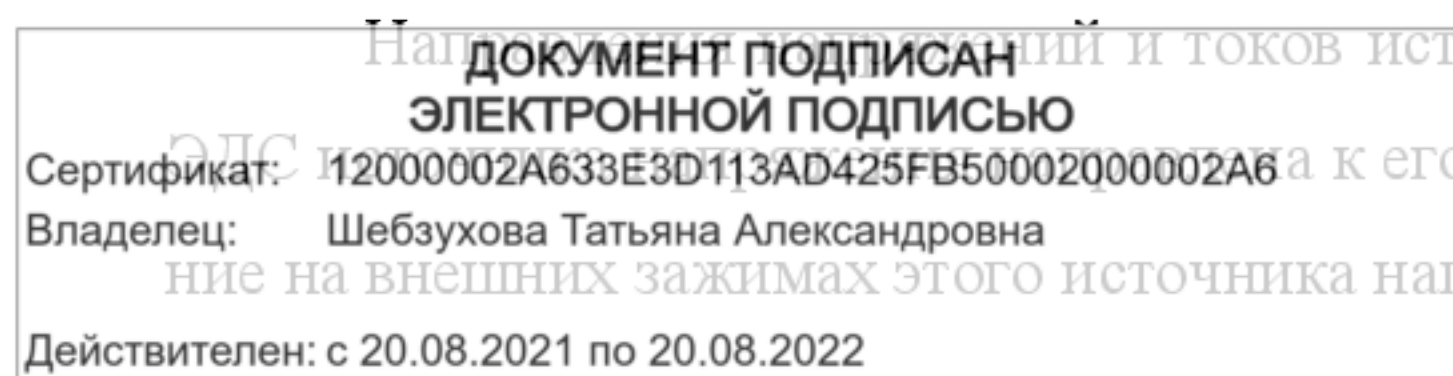
Контур – замкнутый путь, проходящий через ряд ветвей и узлов.

Задача анализа электрической цепи формулируется следующим образом. Заданы схема цепи и характеристики ее элементов, а также напряжения и токи независимых источников. Требуется найти токи и напряжения ветвей.

Уравнения, описывающие поведение электрической цепи, составляют на основе законов Кирхгофа.

Чтобы записать уравнения по законам Кирхгофа, необходимо сначала выбрать положительные направления токов и напряжений ветвей. Положительное направление тока показывают стрелкой на выводе элемента. Положительное направление напряжения показывают стрелкой, расположенной рядом с элементом. Направления токов и напряжений резистивных элементов выбирают согласованными. Сопротивление проводников, соединяющих элементы, очень мало по сравнению с сопротивлениями резисторов, и им пренебрегают.

Направления напряжений и токов источников следует рассмотреть особо. Стрелка положительному выводу. Поэтому напряжение направлено в сторону, противоположную ЭДС.



Задания:

Задание №1

На рисунке 1 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 , к которой подведено напряжение U . Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P , потребляемые цепью, а также токи I_1, I_2, I_3, I_4 , напряжения U_1, U_2, U_3, U_4 и мощности P_1, P_2, P_3, P_4 на каждом из резисторов. Проверить, что $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Данные для своего варианта взять из таблицы 1.

Таблица 1

Известная величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, В$	120	125	150	160	180	200	225	240	270	200
$R_1, Ом$	8	28	6	24	25	16	34	16	10	16
$R_2, Ом$	20	60	110	140	120	25	28	100	40	25
$R_3, Ом$	16	120	100	60	180	35	20	140	20	35
$R_4, Ом$	18	120	15	50	60	40	24	60	30	40

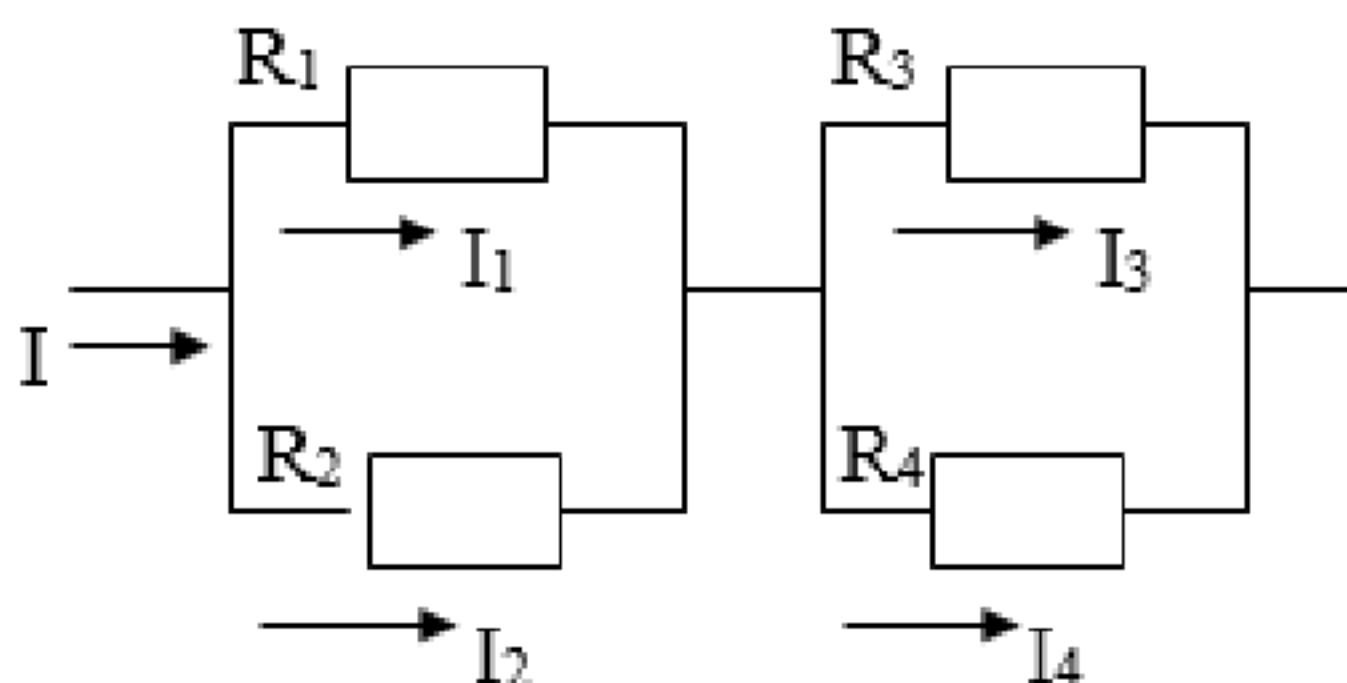


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

На рисунке 2 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 , к которой подведено напряжение U . Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P , потребляемые цепью, а также токи I_1, I_2, I_3, I_4 , напряжения U_1, U_2, U_3, U_4 и мощности P_1, P_2, P_3, P_4 на каждом из резисторов. Проверить, что $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Данные для своего варианта взять из таблицы 2.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Таблица 2

Известная величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, В$	90	130	156	180	210	234	240	260	360	260
$R_1, Ом$	36	100	30	24	300	24	60	400	40	20
$R_2, Ом$	18	25	45	12	60	36	40	100	120	30
$R_3, Ом$	45	10	300	30	60	240	48	40	100	200
$R_4, Ом$	30	15	75	20	30	60	24	60	150	50

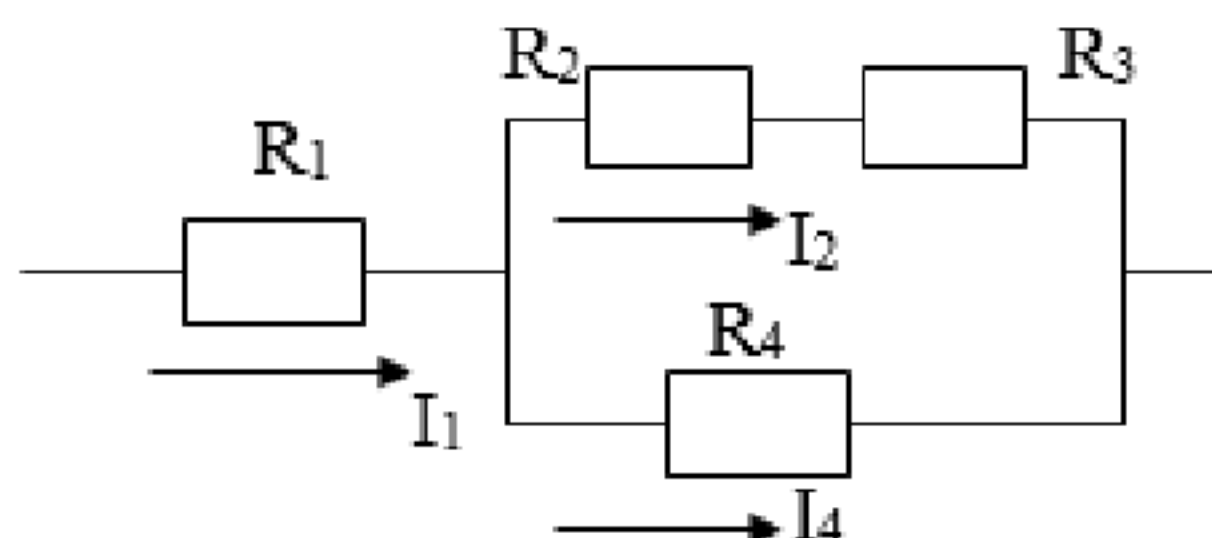


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

На рисунке 3 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 , к которой подведено напряжение U . Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P , потребляемые цепью, а также токи I_1, I_2, I_3, I_4 , напряжения U_1, U_2, U_3, U_4 и мощности P_1, P_2, P_3, P_4 на каждом из резисторов. Проверить, что $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Данные для своего варианта взять из таблицы 3.

Таблица 3

Известная величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, В$	60	90	120	150	165	195	200	220	225	240
$R_1, Ом$	3,2	4	8	5,6	2	32	4	20	3	15
$R_2, Ом$	12	60	200	40	30	100	25	300	36	10
$R_3, Ом$	40	24	50	60	15	150	100	75	30	15
$R_4, Ом$	240	60	36	40	30	30	40	45	30	

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

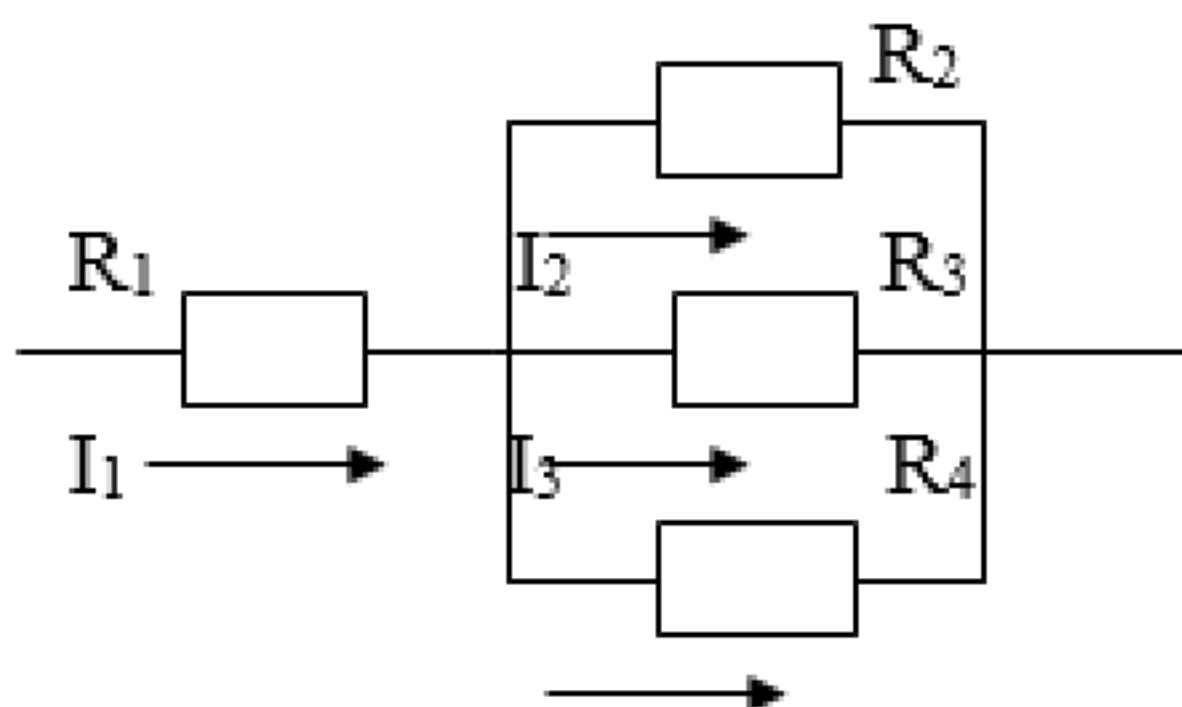


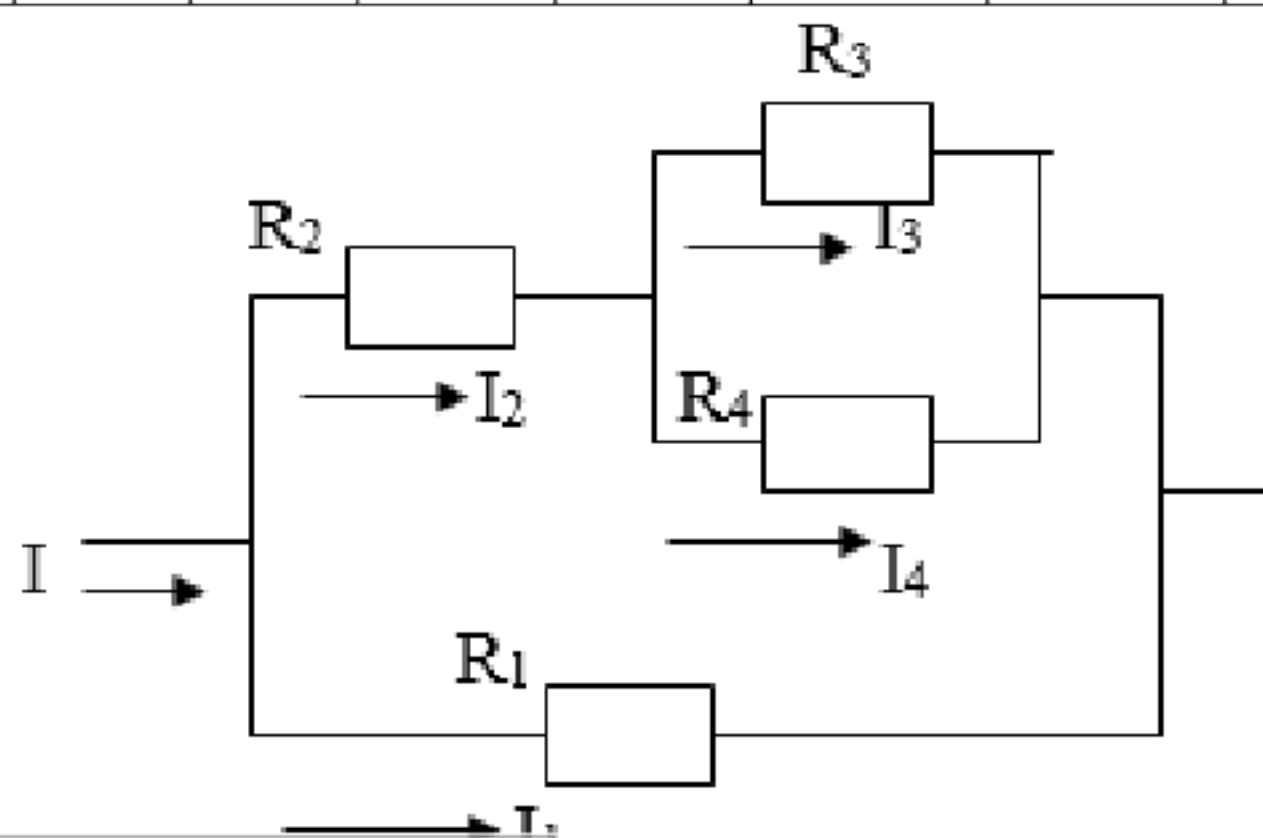
Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

На рисунке 4 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 , к которой подведено напряжение U . Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P , потребляемые цепью, а также токи I_1, I_2, I_3, I_4 , напряжения U_1, U_2, U_3, U_4 и мощности P_1, P_2, P_3, P_4 на каждом из резисторов. Проверить, что $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Данные для своего варианта взять из таблицы 4

Таблица 4

Известная величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, В$	48	75	90	120	180	240	120	180	300	120
$R_1, Ом$	8	10	45	20	15	48	40	20	200	40
$R_2, Ом$	4	12,6	12	24	22	24	48	10	14	20
$R_3, Ом$	10	4	40	10	24	180	30	100	60	50
$R_4, Ом$	40	6	60	15	12	120	20	25	90	200



**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Принципиальная схема к задаче

Задание №5

На рисунке 5 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 , к которой подведено напряжение U . Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P , потребляемые цепью, а также токи I_1, I_2, I_3, I_4 , напряжения U_1, U_2, U_3, U_4 и мощности P_1, P_2, P_3, P_4 на каждом из резисторов. Проверить, что $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Данные для своего варианта взять из таблицы 5

Таблица 5

Известная величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, В$	90	120	156	220	195	200	120	160	180	100
$R_1, Ом$	8	10	20	12	14	8	10	16	12	3
$R_2, Ом$	40	15	45	40	60	150	24	50	24	20
$R_3, Ом$	60	10	30	60	30	100	48	200	12	30
$R_4, Ом$	4	14	40	8	18	12	14	8	10	5

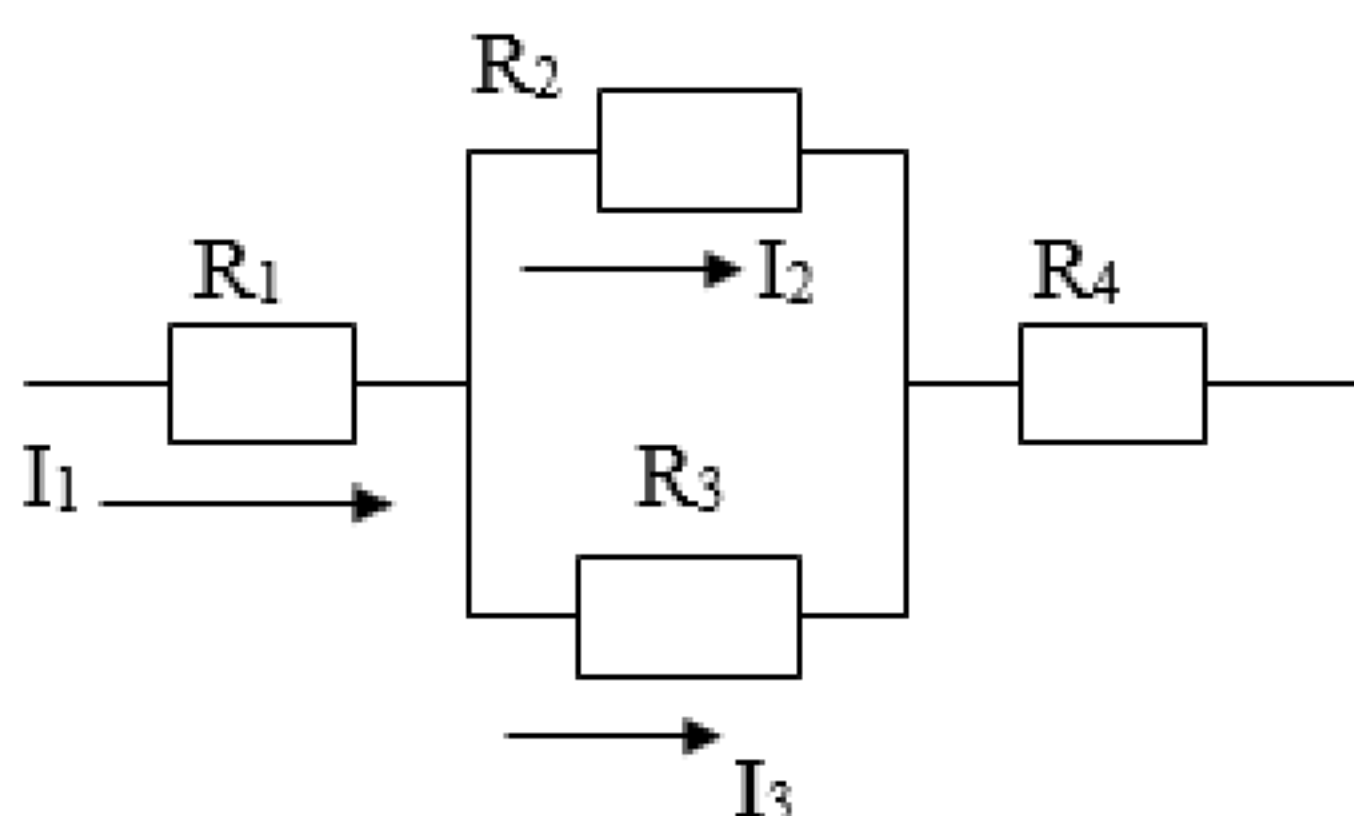


Рисунок 5 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Закон Ома. Определение. Формула.
2. Первый закон Кирхгофа. Формула, определение
3. Что называется последовательным соединением?
4. Что называется параллельным соединением?
5. Формула для определения эквивалентного сопротивления, если два резистора со-

Практическая работа №2. Расчет сложной электрической цепи методом узловых и контурных уравнений

Цель: Определение токов ветвей с использованием законов Кирхгофа.

Основы теории:

Простейшие неразветвленные цепи содержат, соединенных последовательно, один или несколько источников или резистивных элементов. Параметры нагрузки неразветвленной цепи определяются по закону Ома. Для цепи с источниками ЭДС и напряжения закон Ома:

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

где R – полное сопротивление цепи $R = R_{\text{вн}} + R_n$; $R_{\text{вн}}$ – внутреннее сопротивление источников энергии; R_n – сопротивление нагрузки.

U , E – напряжение и ЭДС источников.

Разветвленная цепь имеет много связанных между собой ветвей, может иметь множество источников энергии, а также узлов. Примером разветвленной эл. цепи может явиться сеть освещения жилого дома, корабля и т.д. Для решения задачи определения параметров нагрузки в разветвленной цепи приходится использовать сложные методики, основанные на фундаментальных законах Ома и Кирхгофа.

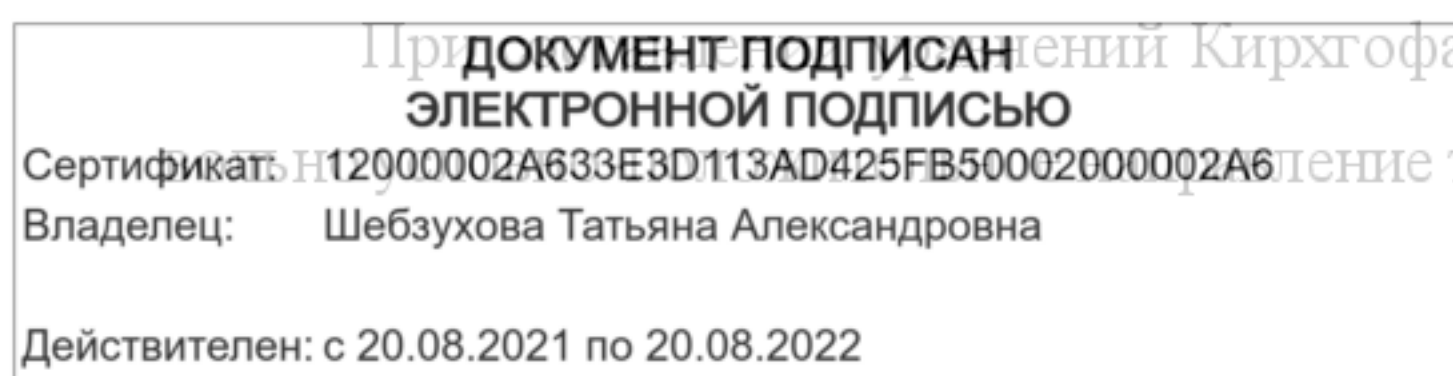
Первый закон Кирхгофа, вытекает из принципа непрерывности тока, справедлив для узлов цепи. Согласно этому закону алгебраическая сумма мгновенных токов в любом узле эл. цепи равна нулю. Т.е. в любом узле цепи сумма токов приходящих равна сумме токов отходящих от узла:

$$\sum_{k=1}^n i_k = 0$$

Число уравнений равно числу узлов минус один. При составлении уравнений обычно принимают токи, идущие к узлу, с плюсом, а от узла – с минусом.

Второй закон Кирхгофа является следствием закона сохранения энергии и формулируется как алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме падений напряжений на всех сопротивлениях контура:

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



При составлении уравнений Кирхгофа предварительно необходимо выбрать произ-

вольные направления токов во всех ветвях схемы. Определить также

независимые контуры. Контуром назовем замкнутую эл. цепь. Задать произвольное направление обхода токов. ЭДС и падение напряжения принимаем с плюсом, если ток или ЭДС совпадают с направлением обхода и минус, если не совпадают. Пример составления уравнений Кирхгофа рассмотрим для электрической цепи, приведённой на рисунке 2.4.

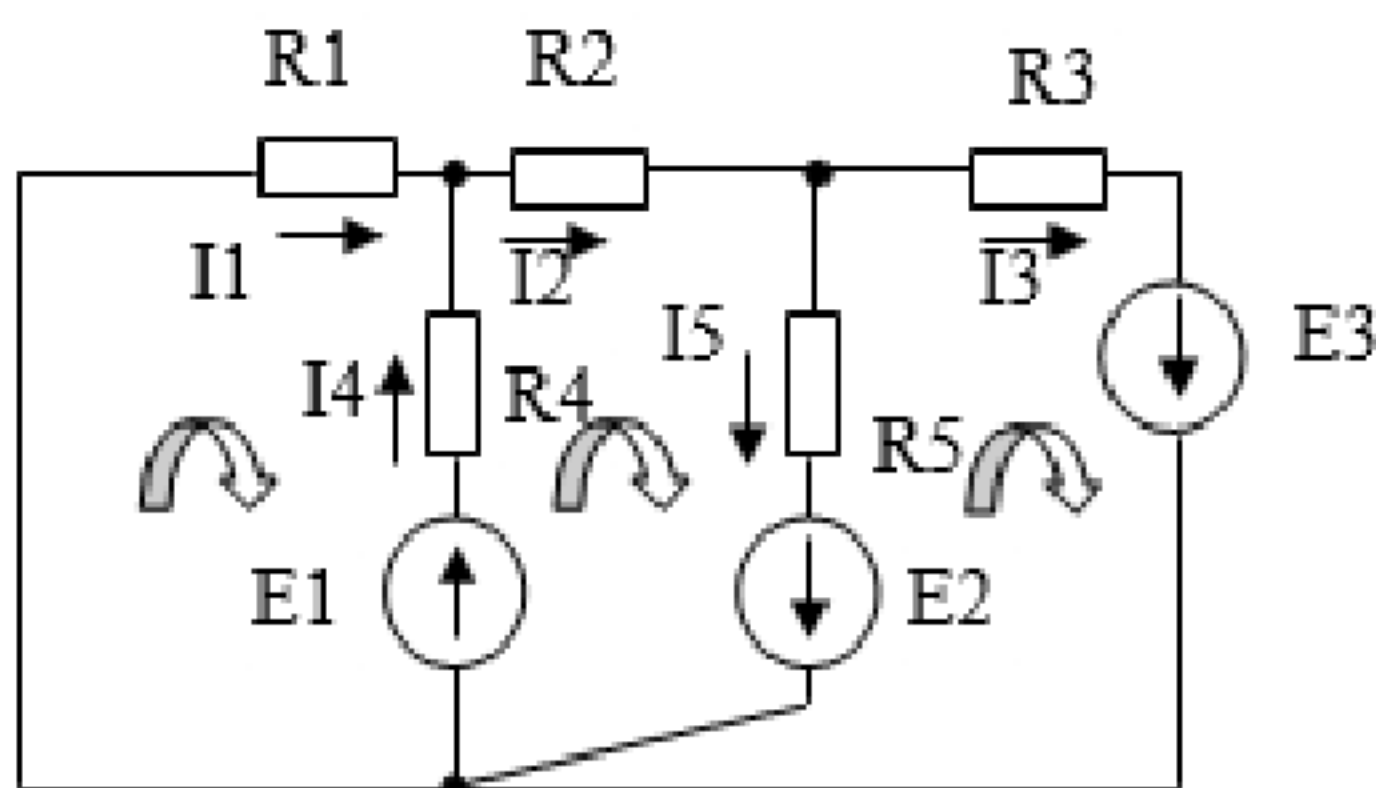


Рисунок 2.4 – Схема разветвлённой электрической цепи

По первому закону Кирхгофа (2.9):

$$I_1 - I_2 + I_4 = 0;$$

$$I_2 - I_3 - I_5 = 0.$$

По второму закону Кирхгофа (2.10):

$$I_1 \cdot R_1 - I_4 \cdot R_4 = -E_1;$$

$$I_4 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_2 + I_5 \cdot R_5 = E_2 + E_1;$$

$$-I_5 \cdot R_5 - I_3 \cdot R_3 = E_3 - E_2.$$

Полученные уравнения (2.11, 2.12) решают совместно, как систему. Удобный способ решений уравнений – с помощью определителей. Отметим, что число уравнений должно равняться числу неизвестных токов.

Во многих случаях расчет эл. цепей можно упростить путем уменьшения количества уравнений, используя для этого специальные методы.

Задания:

Задание №1

Методом уравнений Кирхгофа рассчитать токи в схеме рис. при следующих параметрах: $J = 3 \text{ A}$, $E = 30 \text{ В}$, $r_1 = 10 \text{ Ом}$, $r_2 = 5 \text{ Ом}$.

Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

Рассчитать токи во всех ветвях цепи, представленной на рис, если: $E_1 = 100 \text{ В}$, $E_2 = 50 \text{ В}$, $r_1 = r_2 = 10 \text{ Ом}$, $r_3 = 20 \text{ Ом}$.

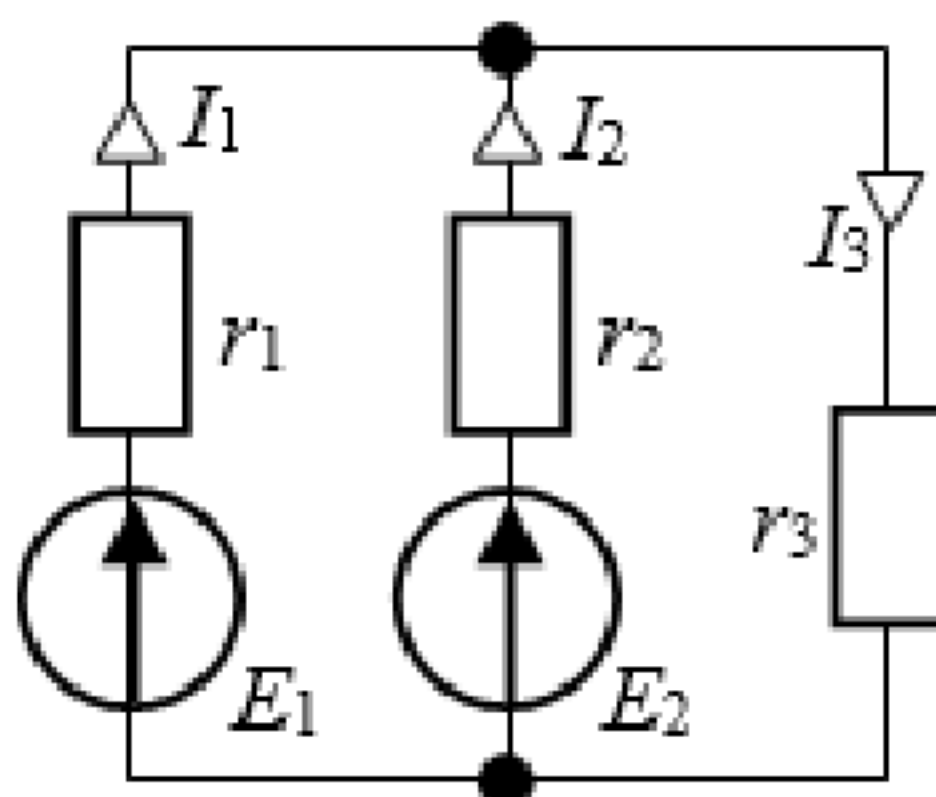


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Задание №5

Определить токи по законам Кирхгофа в ветвях схемы (рис. 1.26) и проверить баланс мощностей, если: $E_1 = 120 \text{ В}$, $E_2 = 60 \text{ В}$, $J = 4 \text{ А}$; $r_1 = r_2 = 20 \text{ Ом}$, $r_3 = 5 \text{ Ом}$, $r_4 = 15 \text{ Ом}$.

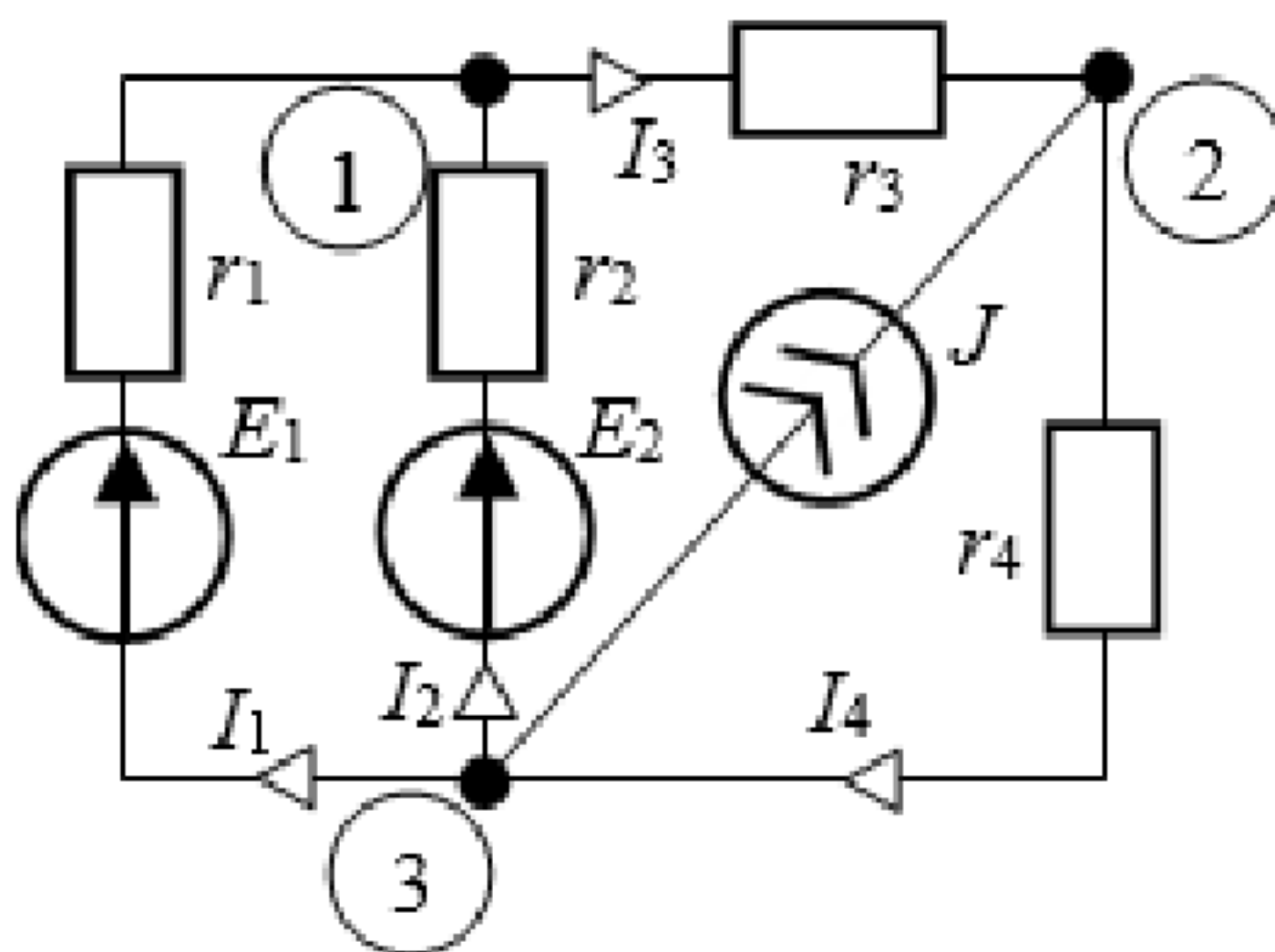


Рисунок 5 – Принципиальная схема к задаче

Задание №6

Определить токи в ветвях мостовой схемы, если известны параметры цепи: $E = 4,4 \text{ В}$, $r_1 = 20 \text{ Ом}$, $r_2 = 60 \text{ Ом}$, $r_3 = 120 \text{ Ом}$, $r_4 = 8 \text{ Ом}$, $r_5 = 44 \text{ Ом}$.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

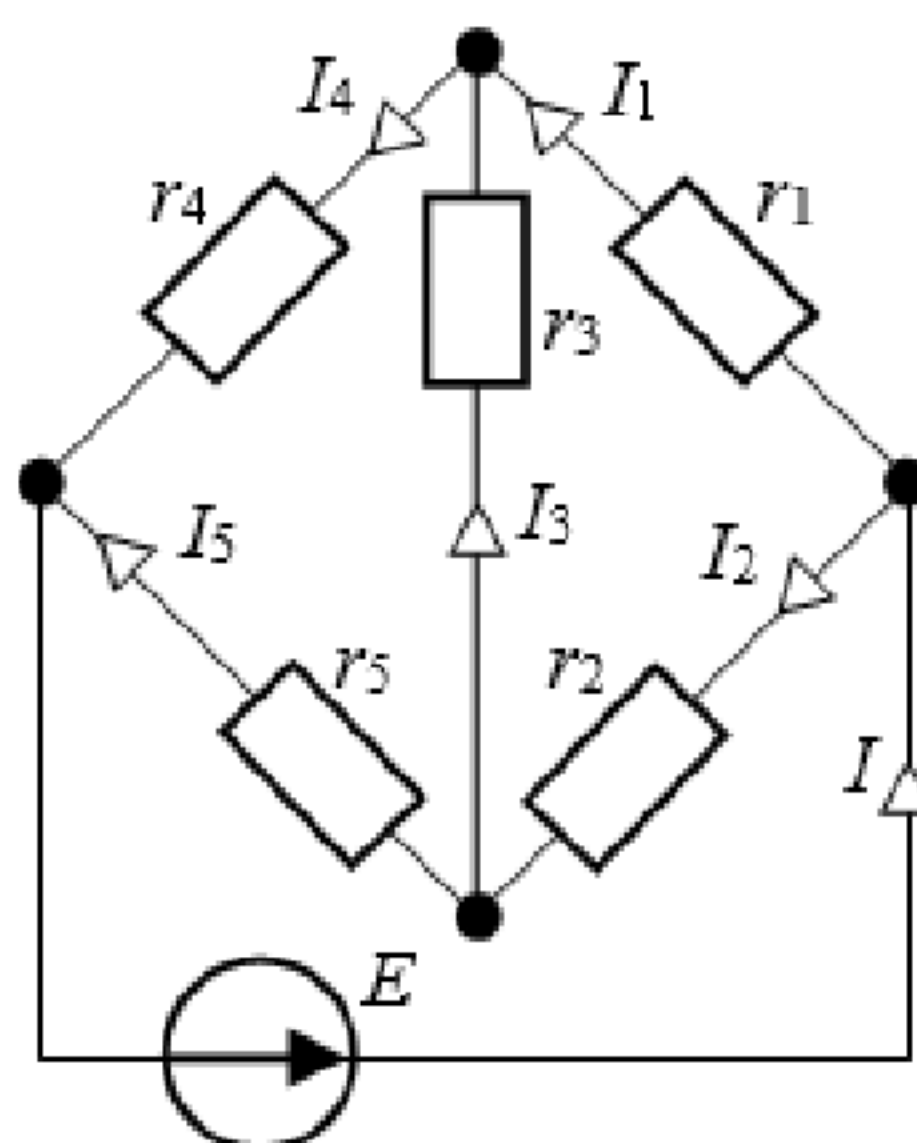


Рисунок 6 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается метод узловых и контурных уравнений?
2. Сколько узловых уравнений составляют для цепи?
3. По какому закону составляются узловые уравнения и как этот закон читается?
4. Как выбирают направления токов в узловых уравнениях?
5. Сколько контурных уравнений составляют для цепи?
6. По какому закону составляют контурные уравнения и как он читается?
7. Как выбирают направления ЭДС в контурных уравнениях?
8. Чему равно общее количество уравнений, составленных по данному методу?

3). Для контуров с неизвестными контурными токами составляются контурные уравнения по II закону Кирхгофа. Таким образом, количество уравнений по МКТ следующее: $N_{МКТ} = B - (Y-1) - B_T$.

5). Токи в ветвях определяют путём алгебраического суммирования контурных токов в соответствии с принципом наложения.

6). Проверка выполняется составлением баланса мощностей или расчётом токов ИНЫМ МЕТОДОМ.

Задание №1

Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Заданные величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_1, (В)$	60	80	100	40	50	70	90	100	60	80
$E_2, (В)$	90	60	50	100	70	80	40	80	70	90
$E_3, (В)$	70	100	90	60	80	100	70	40	50	60
$R_1 (Ом)$	10	5	10	5	2	3	7	4	9	10
$R_2 (Ом)$	5	10	9	4	7	6	3	2	5	8

R_3 (Ом)	8	4	3	9	10	7	5	8	6	3
R_4 (Ом)	5	7	9	8	7	4	8	9	7	7
R_5 (Ом)	6	9	8	6	5	8	4	8	7	9
R_6 (Ом)	6	7	58	9	8	6	4	3	9	5
R_7 (Ом)	10	8	3	5	8	9	6	7	10	5

Контрольные вопросы:

1. Как читается первый закон Кирхгофа?
2. Как читается второй закон Кирхгофа?
3. В каком случае ЭДС считается отрицательным?
4. Как выбираются направления токов в узловых уравнениях?
5. Что называют узлом?
6. Что называют контуром?
7. Что называют ветвью электрической цепи?

Практическая работа №4. Расчет сложной электрической цепи методом узловых потенциалов

Цель: Определение токов ветвей по методу узловых потенциалов.

Основы теории:

Этот метод позволяет уменьшить число расчётных уравнений от количества $B-V_T$ (число ветвей с неизвестными токами) до количества $(V-1)$, то есть до числа уравнений, записанных только по I закону Кирхгофа при использовании метода уравнений Кирхгофа.

В рассматриваемом методе (МУП) сначала составляется система уравнений для расчёта потенциалов узлов схемы. Так как потенциал электрического тела определяется с точностью до постоянной величины, то потенциал одного из узлов схемы всегда можно принять равным любому числу (лучше всего нулю, так как при этом упрощаются и уравнения, и вычисления). Этот узел принято называть *базисным* и при дальнейших расчётах принято, что $\varphi_E = 0$.

Для каждого из узлов схемы с неизвестным потенциалом составляется узловое уравнение. Для узла a , потенциал которого φ_a , узловое уравнение имеет вид:

$$\varphi_a \cdot \sum_a g - \varphi_b \cdot \sum_{a-b} g - \varphi_c \cdot \sum_{a-c} g - \dots = \sum_a E g + \sum_a J.$$

Здесь φ_b , φ_c – потенциалы узлов схемы, часть которых может быть известна, а остальные и не известны;

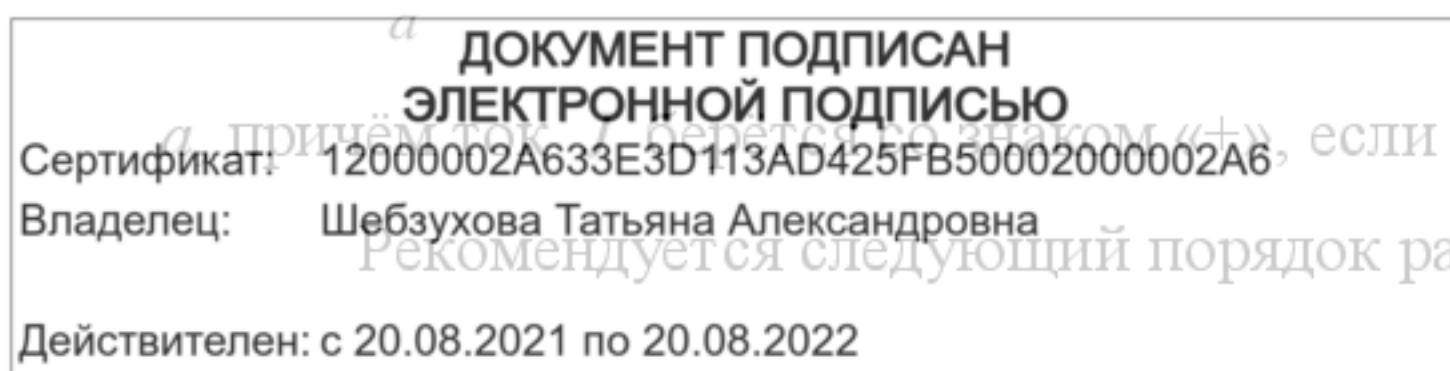
$\sum_a g$ – *собственная проводимость* узла a , сумма проводимостей ветвей, непосредственно примыкающих к узлу a , для которого и записывается узловое уравнение;

$\sum_{a-q} g$ – *взаимная проводимость* узлов a и q , сумма проводимостей ветвей, находящихся непосредственно между узлами a и q (для этих ветвей a и q – конечные точки);

$\sum_a E g$ – алгебраическая сумма токов короткого замыкания ветвей с источниками ЭДС, объединённых узлом a , причём слагаемое $E g$ берётся со знаком «+», если ЭДС ветви направлена к узлу a ;

$\sum_a J$ – алгебраическая сумма токов источников токов ветвей, объединённых узлом a .

Рекомендуется следующий порядок расчёта токов по МУП:



1. Выбирают произвольные направления токов в ветвях схемы.
2. Выбирают базисный узел и принимают его потенциал равным нулю $\varphi_B = 0$.
3. Для узлов с неизвестными потенциалами составляют и решают узловые уравнения.
4. По закону Ома рассчитывают токи ветвей.
5. Проверяют правильность решения задачи (в общем случае по выполнению баланса мощностей).

Задания:

Задание №1

По заданным значениям ЭДС и сопротивлений определить токи ветвей по методу узлового напряжения для данной цепи. Данные для своего варианта взять из таблицы.

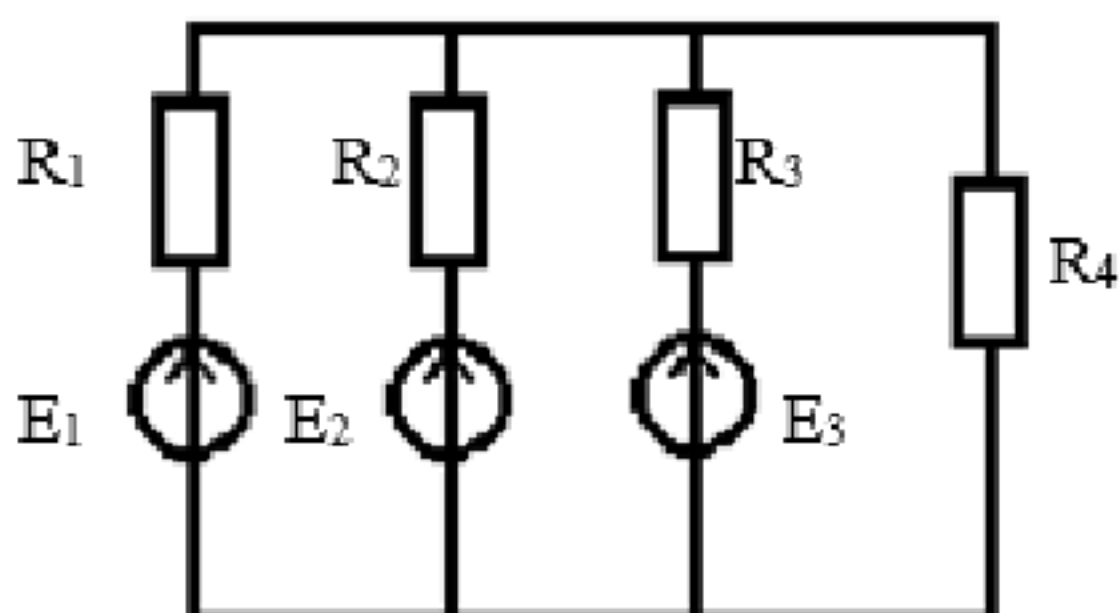


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Таблица 1

Заданные величины	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_1 , (В)	60	80	100	40	50	70	90	100	60	80
E_2 , (В)	90	60	50	100	70	80	40	80	70	90
E_3 , (В)	70	100	90	60	80	100	70	40	50	60
R_1 (Ом)	5,6	7,4	9,0	8,5	7,8	4,7	8,3	9,6	7,1	7,0
R_2 (Ом)	6,5	9,0	8,1	6,6	5,3	8,4	4,7	8,8	7,5	9,2
R_3 (Ом)	6,2	7,6	5,7	9,1	8,0	6,3	4,5	3,2	9,4	5,7
R_4 (Ом)	10	15	12	20	22	14	18	16	10	24

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается метод узлового напряжения?
2. Что называют узловым напряжением?
3. Чему равна проводимость ветви?
4. Как определяют токи ветвей по данному методу?
5. Как читается закон Ома для участка цепи?
6. Как читается первый закон Кирхгофа?
7. В каком случае ток ветви будет отрицательным?
8. Что называют ветвью?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Практическая работа №5. Применение метода наложения для расчета электрических цепей постоянного тока

Цель: Научиться с помощью метода наложения рассчитывать сложные электрические цепи с несколькими источниками ЭДС

Основы теории:

Метод наложения применяется для анализа и расчёта линейных электрических цепей, содержащих, как правило, небольшое число источников энергии.

Сущность метода заключается в том, что ток каждой ветви сложной цепи определяется путём алгебраического суммирования составляющих токов, каждая из которых является функцией только одной ЭДС.

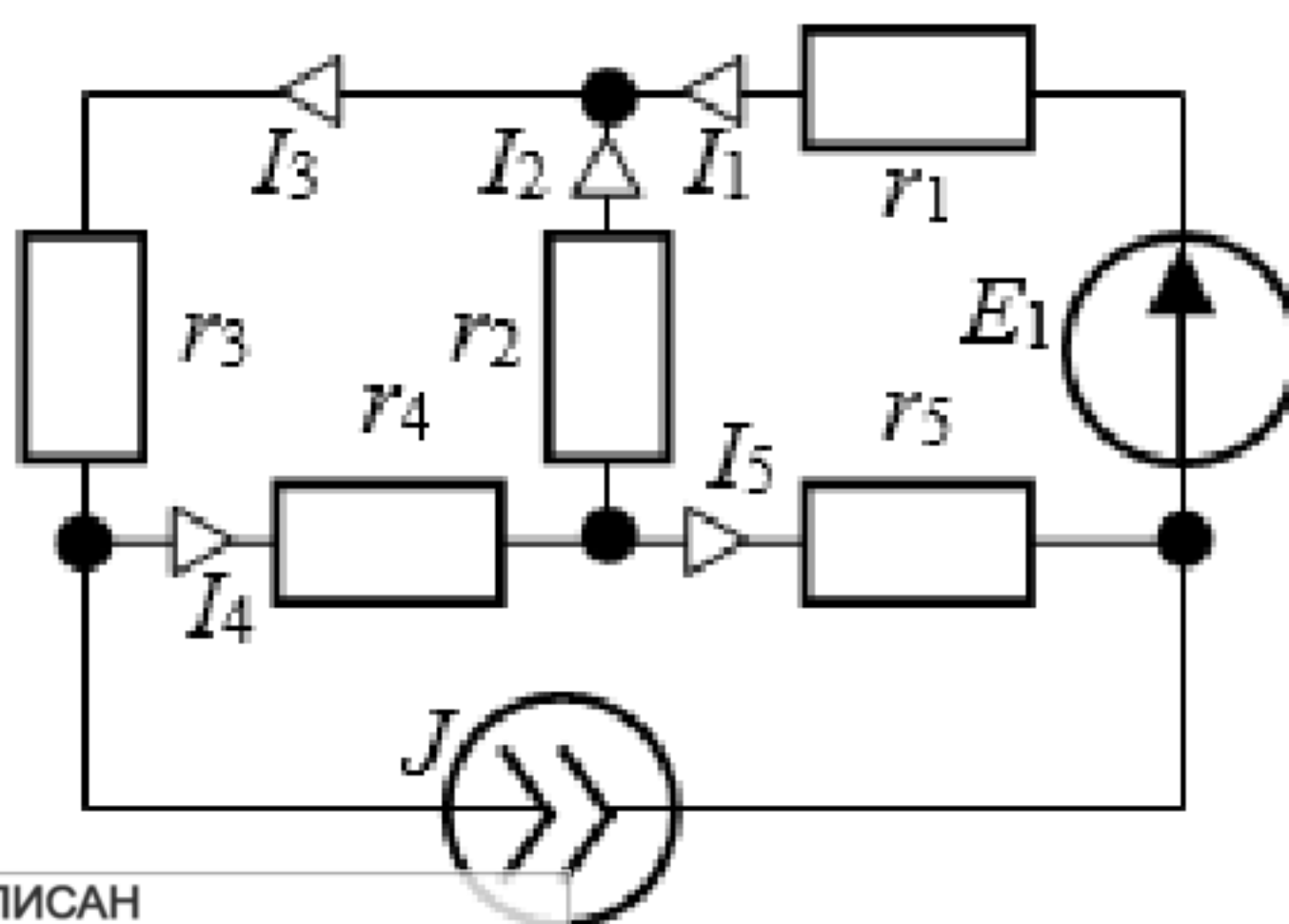
При расчёте цепи методом наложения вначале полагают, что в этой цепи действует только один источник, например, E_1 и определяют токи во всех ветвях: I_1', I_2', I_3' и т.д. Затем полагают, что в цепи действует только второй источник, например, E_2 и снова находят токи в ветвях: I_1'', I_2'', I_3'' и т.д. Затем полагают, что в цепи действует только третий источник, например, J и т.д. Полный ток в ветви n : $I_n = I_n' + I_n'' + I_n''' + \dots$,

где $I_n', I_n'', I_n''', \dots$ - составляющие тока в ветви n , обусловленные действием $E_1, E_2, J, \dots$, соответственно

Задания:

Задание №1

Определить токи в ветвях схемы рис., если $E_1 = 16 \text{ В}$, $J = 1 \text{ А}$, $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = 6 \text{ Ом}$.



Задание №2

Определить токи в отдельных участках цепи если $E_1 = 120 \text{ В}$, $E_2 = 160 \text{ В}$, $R_1 = R_2 = 55 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$, $R_{BH1} = R_{BH2} = 5 \text{ Ом}$.

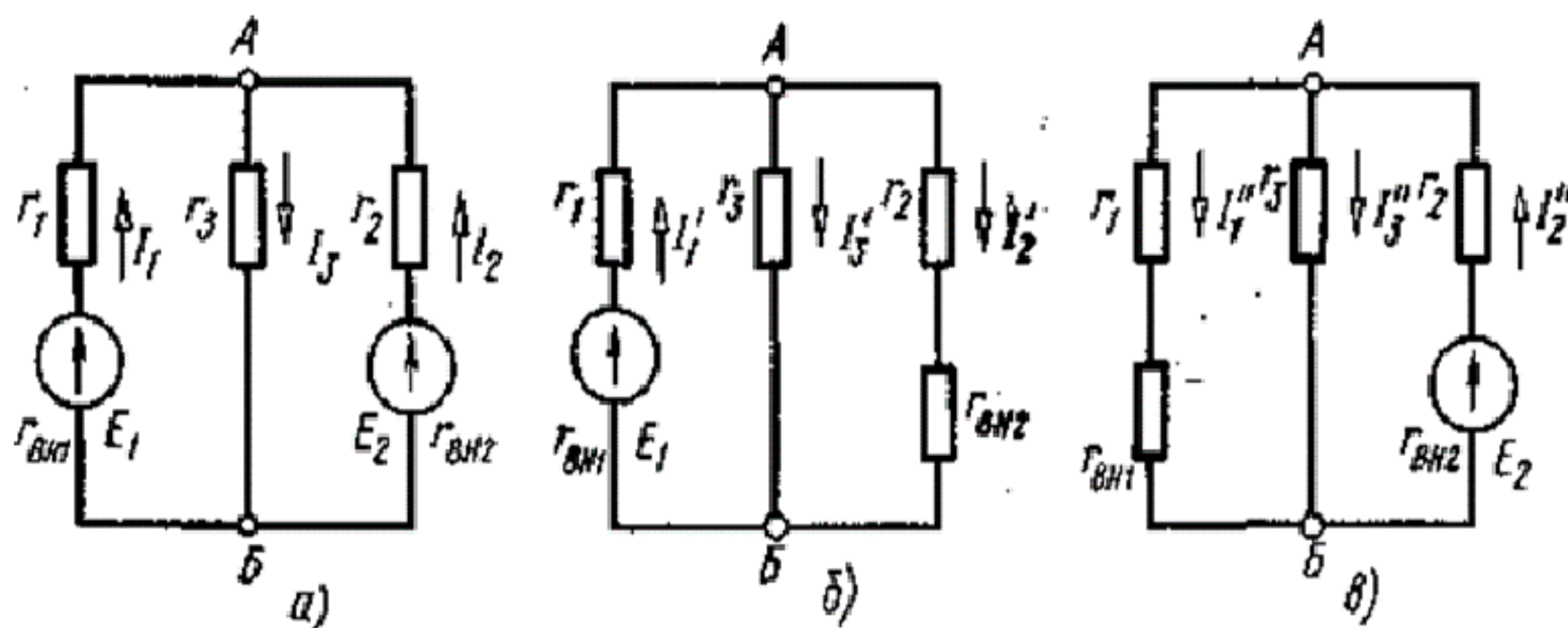


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается метод наложения?
2. Какие преимущества данного метода?
3. Как определяются значения действительных токов?
4. Как выбирают направления частичных токов?

Практическая работа №6. Применение метода эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений.

Цель: Научиться с помощью метода эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений рассчитывать электрические цепи с одним источником питания, применяемые в области электрических измерений.

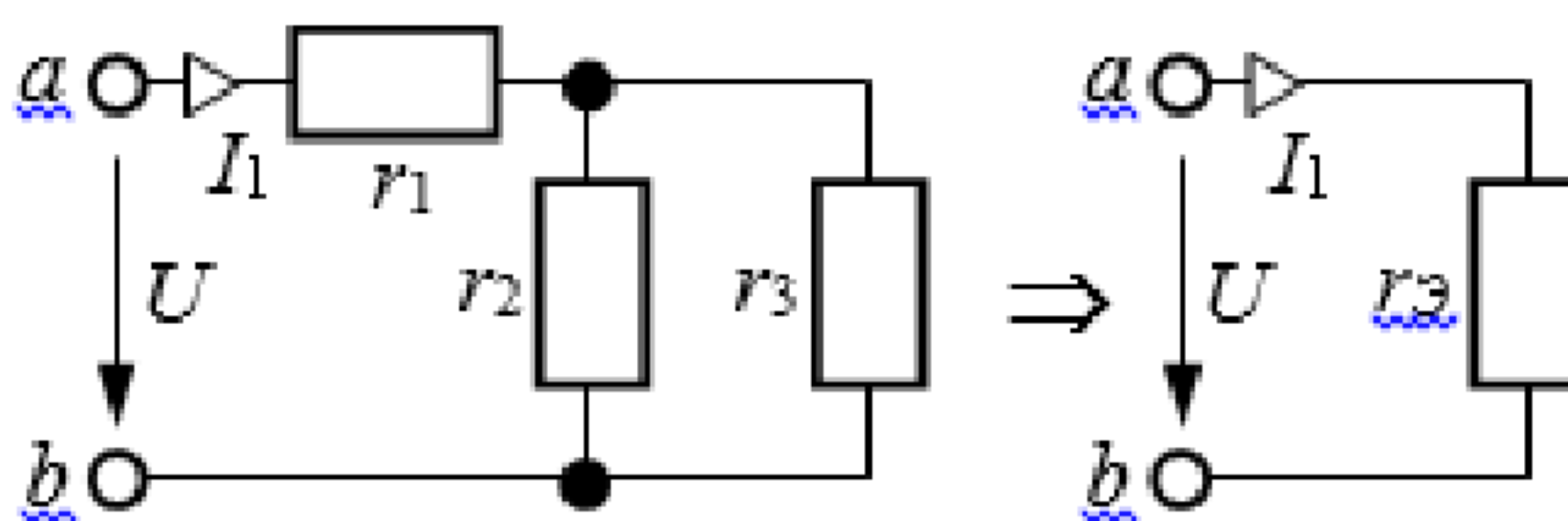
Основы теории:

Сущность эквивалентных преобразований заключается в том, что часть электрической цепи заменяется более простой схемой: либо с меньшим количеством ветвей и сопротивлений, либо с меньшим числом узлов или контуров. Преобразование считается *эквивалентным*, если токи и напряжения непреобразованной части схемы остаются прежними, то есть одинаковыми в исходной и преобразованной схемах. Сами по себе эквивалентные преобразования не являются методом расчёта, однако способствуют упрощению расчётов.

Часто используются следующие эквивалентные преобразования:

1. Замена последовательного соединения сопротивлений $r_1, r_2, \dots, r_n$ одним эквива-

лентным $r_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n r_k$.



2. Замена параллельного соединения пассивных ветвей с проводимостями $g_1, g_2, \dots$

g_n одной эквивалентной $g_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n g_k$.

3. Замена смешанного соединения сопротивлений рис. 1.35,а одним эквивалентным (рис. 1.35,б), где $r_{\Sigma} = r_1 + \frac{r_2 \cdot r_3}{r_2 + r_3}$, что следует из поэтапного применения п.2 и п.1 настоящих рекомендаций.

4. Эквивалентные преобразования пассивных трёхполосников – треугольника (рис.

1.36,а) и звезды (рис. 1.36,б) при этом сопротивления эквивалентного треугольника

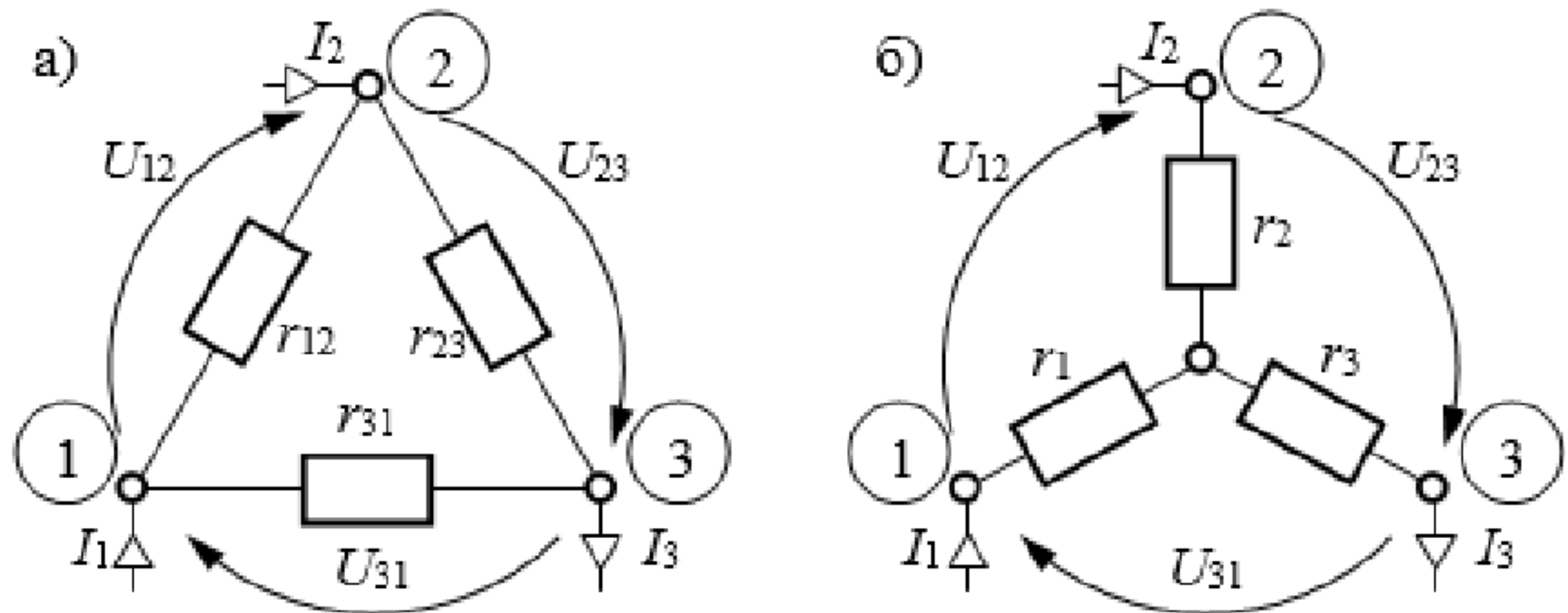
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$r_{12} = r_1 + r_2 + \frac{r_1 \cdot r_2}{r_3}, \quad r_{23} = r_2 + r_3 + \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1}, \quad r_{31} = r_3 + r_1 + \frac{r_3 \cdot r_1}{r_2},$$

а сопротивления эквивалентной звезды

$$r_1 = \frac{r_{12} \cdot r_{31}}{r_{\Delta}}, \quad r_2 = \frac{r_{23} \cdot r_{12}}{r_{\Delta}}, \quad r_3 = \frac{r_{31} \cdot r_{23}}{r_{\Delta}},$$

где $r_{\Delta} = r_{12} + r_{23} + r_{31}$ – сумма сопротивлений ветвей треугольника



5. При дальнейшем изучении курса ТОЭ будут представлены формулы эквивалентных замен пассивных четырёхполюсников Т- и П-схемами, замен цепей с распределёнными параметрами эквивалентными четырёхполюсниками, устранение индуктивной связи в цепях и др.

Особенно удобно пользоваться методом эквивалентных преобразований при расчёте входных и взаимных сопротивлений или входных и взаимных проводимостей схем, коэффициентов передачи напряжений и токов, поступающих на вход схемы при передаче сигнала в нагрузку, когда на схему воздействует только один источник энергии.

Задания:

Задание №1

Определить токи в схеме, используя эквивалентные преобразования, если входное напряжение схемы $U_{ex} = 400 \text{ В}$, а параметры $r_1 = 10 \text{ Ом}$, $r_2 = 60 \text{ Ом}$, $r_3 = 20 \text{ Ом}$, $r_4 = 100 \text{ Ом}$, сопротивление нагрузки, подключенной на выходе схемы (выход четырёхполюсника), $r_5 = 50 \text{ Ом}$.

Рассчитать также коэффициент передачи напряжения k_U и коэффициент передачи тока k_I .

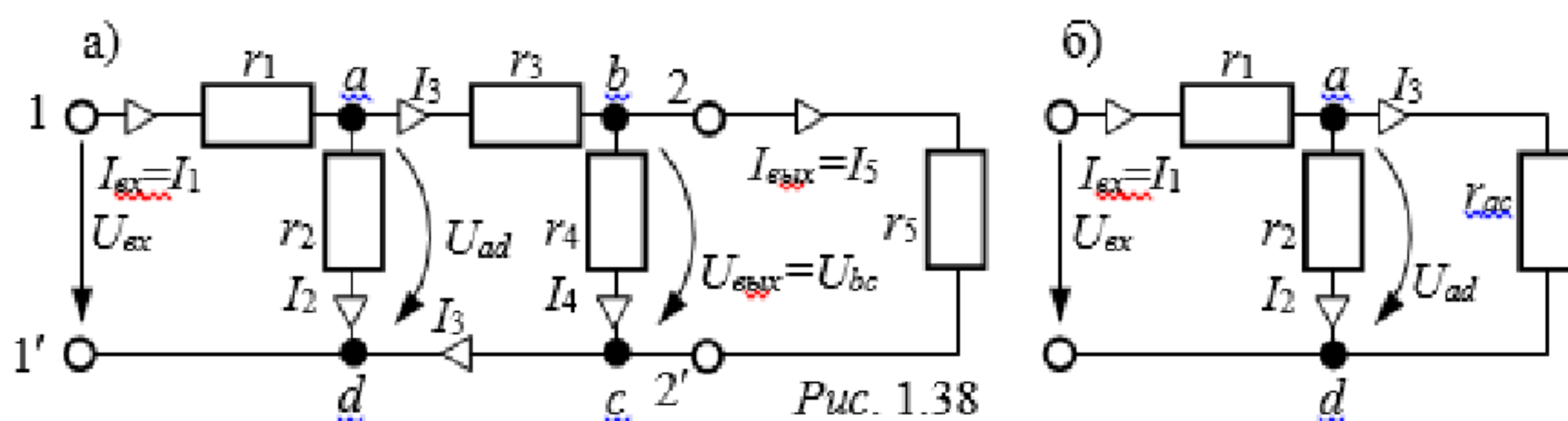


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Определить токи в ветвях схемы, приведенной на рис заменив треугольник сопротивлений r_{ab} - r_{bc} - r_{ca} эквивалентной звездой, если: $E_A = 50 \text{ В}$, $E_B = 30 \text{ В}$, $E_C = 100 \text{ В}$, $r_A = 3,5 \text{ Ом}$, $r_B = 2 \text{ Ом}$, $r_C = 7 \text{ Ом}$, $r_{ab} = 6 \text{ Ом}$, $r_{bc} = 12 \text{ Ом}$, $r_{ca} = 6 \text{ Ом}$.

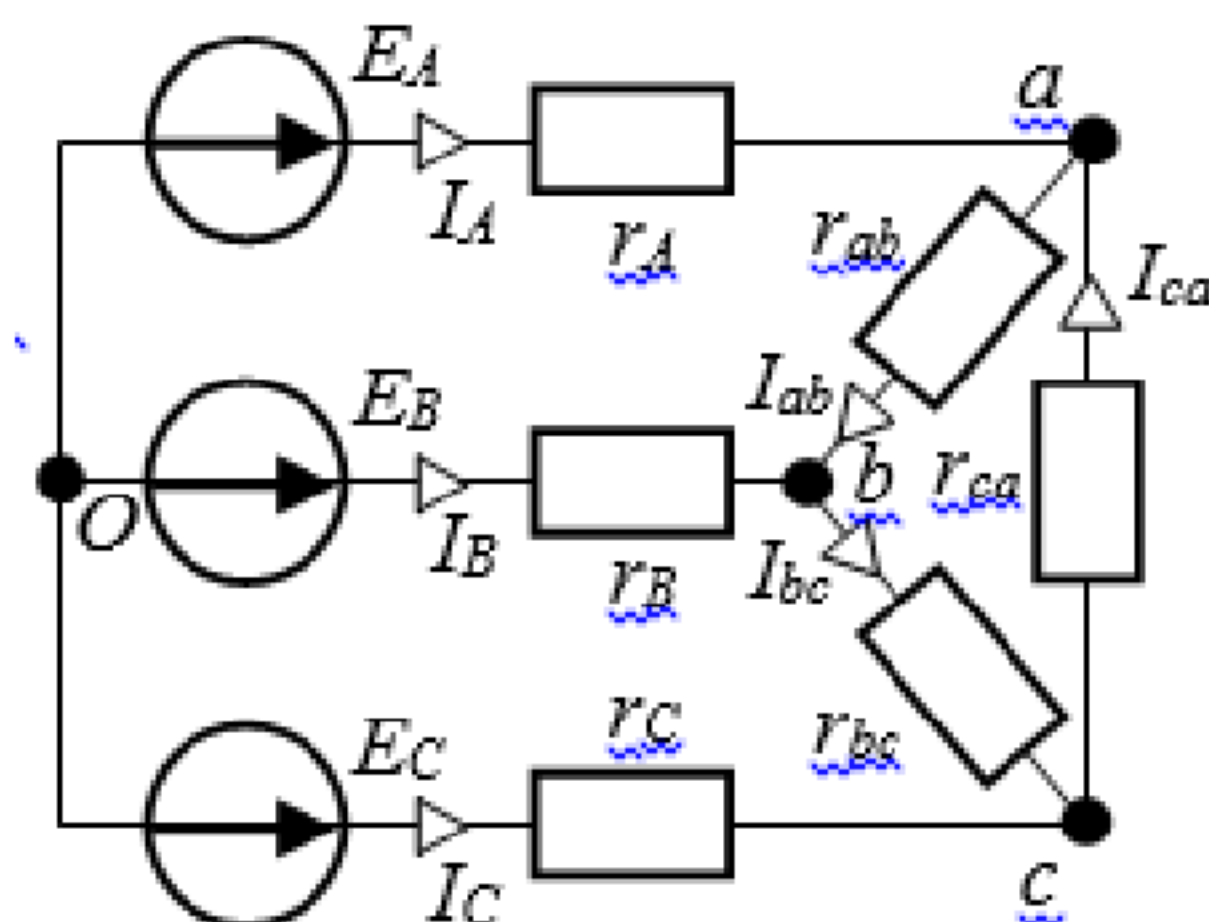


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

Рассчитать токи в схеме методом преобразования электрической цепи, проверить БМ, если: $r_1 = r_2 = 6 \text{ Ом}$, $r_3 = 3 \text{ Ом}$, $r_4 = 12 \text{ Ом}$, $r_5 = 4 \text{ Ом}$, $J = 6 \text{ А}$.

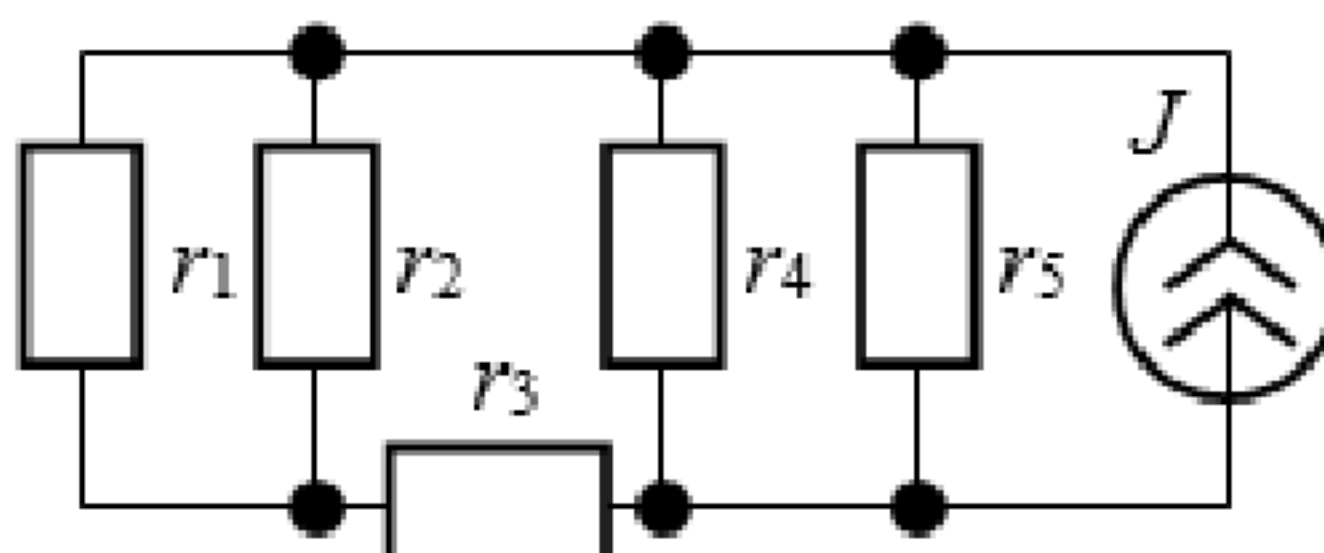


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Задание №4

В цепи $J = 50 \text{ мА}$, $E = 60 \text{ В}$, $r_1 = 5 \text{ кОм}$, $r_2 = 4 \text{ кОм}$, $r_3 = 16 \text{ кОм}$, $r_4 = 2 \text{ кОм}$, $r_5 = 8 \text{ кОм}$. Вычислить ток ветви с сопротивлением r_5 , пользуясь преобразованием схем с источниками тока в эквивалентные схемы с источниками ЭДС и наоборот.

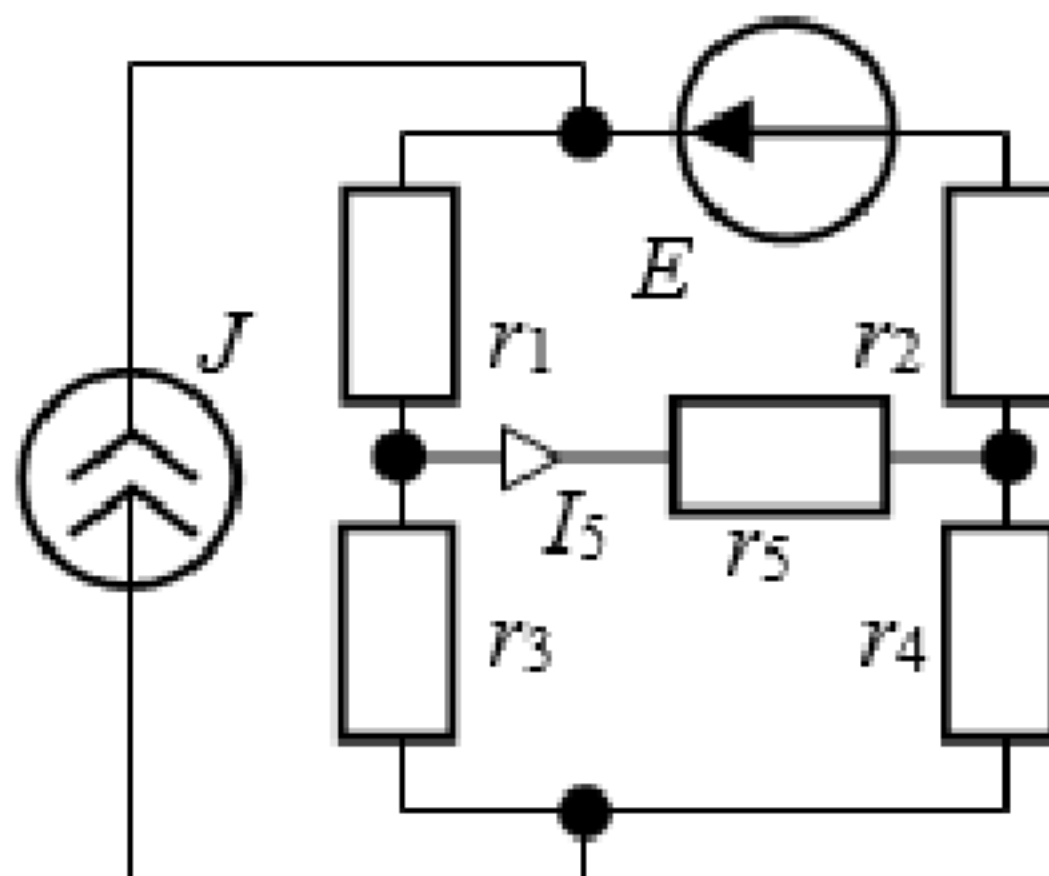


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. В чем состоит метод свертывания электрической цепи?
2. Расскажите о преобразовании треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений.
3. Расскажите о преобразовании звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник сопротивлений.

Практическая работа №7. Расчет неразветвленных магнитных цепей.

Цель: Получить практические навыки расчета неразветвленных магнитных цепей.

Основы теории:

Электрические цепи называются связанными, если процессы в них влияют друг на друга посредством общего магнитного или электрического поля. Если связь цепей осуществляется посредством магнитного поля, её называют индуктивной. Индуктивную связь между электрическими цепями широко используют в электротехнических устройствах для передачи или распределения электрической энергии без непосредственной электрической связи между цепями, преобразования параметров электрических цепей и т.п.

Рассмотрим две индуктивно связанные катушки (рисунок 4.1).

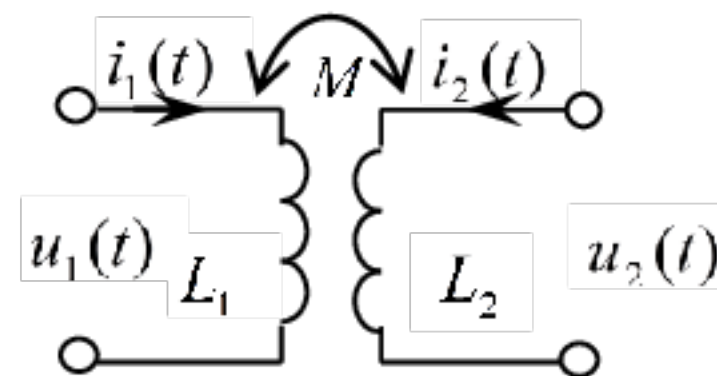


Рисунок 4.1 – Индуктивно связанные катушки

Если к L_1 подключить переменное напряжение $u_1(t)$, то по ней потечёт ток $i_1(t)$. Он создаст магнитное поле, которое будет пересекать проводники как первой, так и второй катушек. При этом в первой катушке будет наводиться ЭДС самоиндукции $e_{11} = -L_1 \frac{di_1}{dt}$, а во

второй ЭДС взаимной индукции $e_{21} = -M \frac{di_1}{dt}$, где M – взаимная индуктивность, Гн.

Взаимной индуктивностью M называют скалярную величину, равную отношению потокосцепления взаимной индуктивности к току обуславливающему это потокосцепление:

$$M = \frac{\Psi_{12}}{i_2} = \frac{\Psi_{21}}{i_1}, \quad (4.1)$$

где Ψ_{12} – потокосцепление первой катушки индуктивности, обусловленное потоком во второй катушке;

Ψ_{21} – потокосцепление второй катушки, обусловленное током в первой катушке.

Отношение ЭДС взаимной индукции к ЭДС самоиндукции, созданных одним током, называют степенью связи:

$\frac{di_2}{dt}$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

– степень связи второй катушки с первой;

(4.2)

$$K_{12} = \frac{e_{12}}{e_{22}} = \frac{-M \frac{di_2}{dt}}{-L_2 \frac{di_2}{dt}} = \frac{M}{L_2} - \text{степень связи первой катушки со второй.} \quad (4.3)$$

Степень связи показывает, какая часть магнитного потока одной катушки проходит через витки другой при отсутствии в ней тока. Среднее геометрическое степеней связи называют коэффициентом связи:

$$K = \sqrt{K_{12} \cdot K_{21}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}, \quad K < 1. \quad (4.4)$$

Для увеличения связи катушки располагают близко друг к другу или одна в другой.

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, состоящее из двух или нескольких индуктивно связанных обмоток, не имеющих между собой электрической связи. Трансформаторы применяются для преобразования токов, напряжений, сопротивлений. Высокочастотные трансформаторы, как правило, не имеют сердечника внутри катушек. У низкочастотных трансформаторов для увеличения магнитной связи и уменьшения тока холостого хода применяется ферромагнитный сердечник. На рисунке 4.2 приведена принципиальная электрическая схема трансформатора.

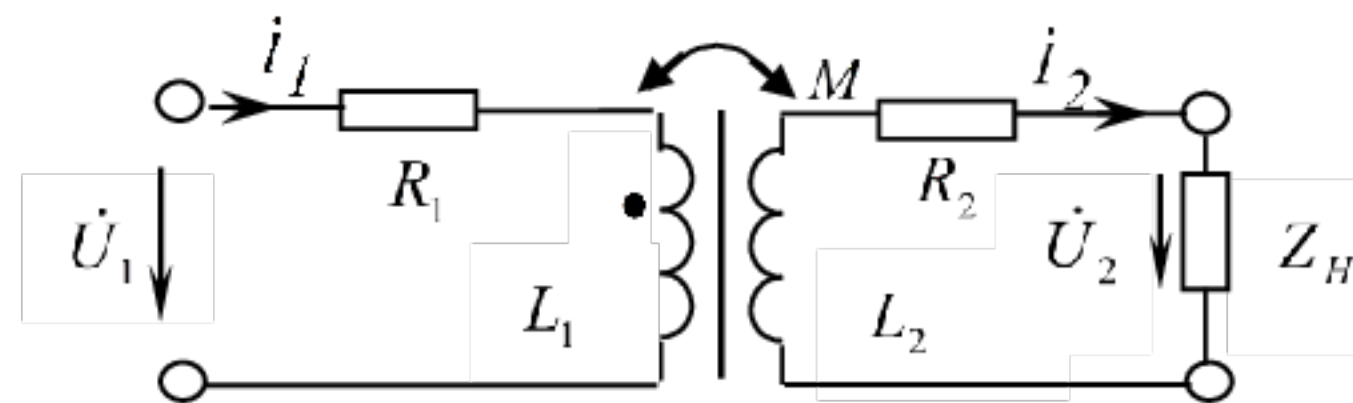


Рисунок 8.2 – Принципиальная электрическая схема трансформатора

Обмотка, на которую подаётся напряжение, называется первичной, а все остальные – вторичными. Если вторичная цепь замкнута на сопротивление нагрузки, то по вторичной обмотке будет протекать ток, который по закону Ленца создаст поток, действующий встречно основному. Поэтому всегда обе катушки трансформатора включены встречно, т.е. M имеет отрицательный знак.

На основании второго закона Кирхгофа уравнения мгновенных значений тока и напряжений в обмотках:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}; \\ 0 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + u_2. \end{cases} \quad (4.5)$$

В комплексной форме:

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2; \\ 0 = R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 + \dot{U}_2. \end{cases} \quad (4.6)$$

Векторная диаграмма трансформатора при нагрузке строится по уравнениям (4.6). Предположим, что нагрузка трансформатора активно-индуктивная, т.е. ток $\dot{I}_2$ отстаёт от напряжения $\dot{U}_2$ на угол φ_2 . Построение начинается с вектора $\dot{I}_2$. Векторная диаграмма приведена на рисунке 4.3. Векторы $-j\omega M\dot{I}_1$ и $-j\omega M\dot{I}_2$ отстают от токов на 90 электрических градусов, т. к. они имеют отрицательный знак.

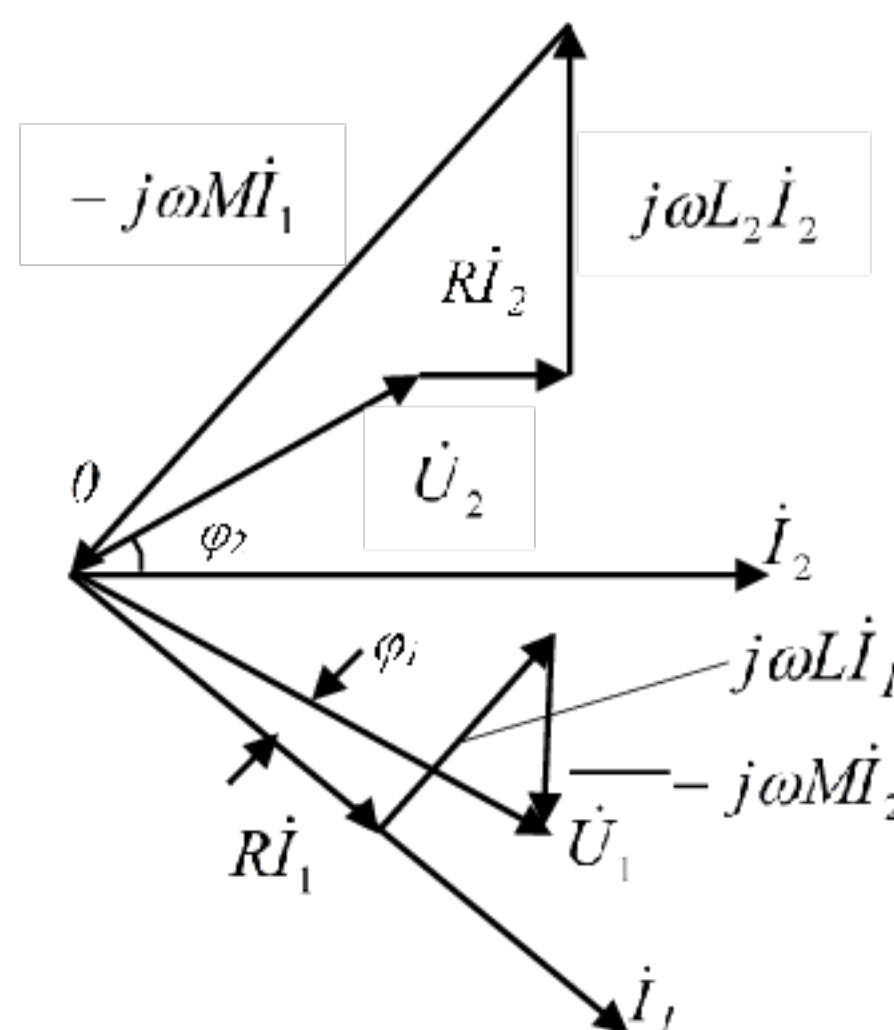


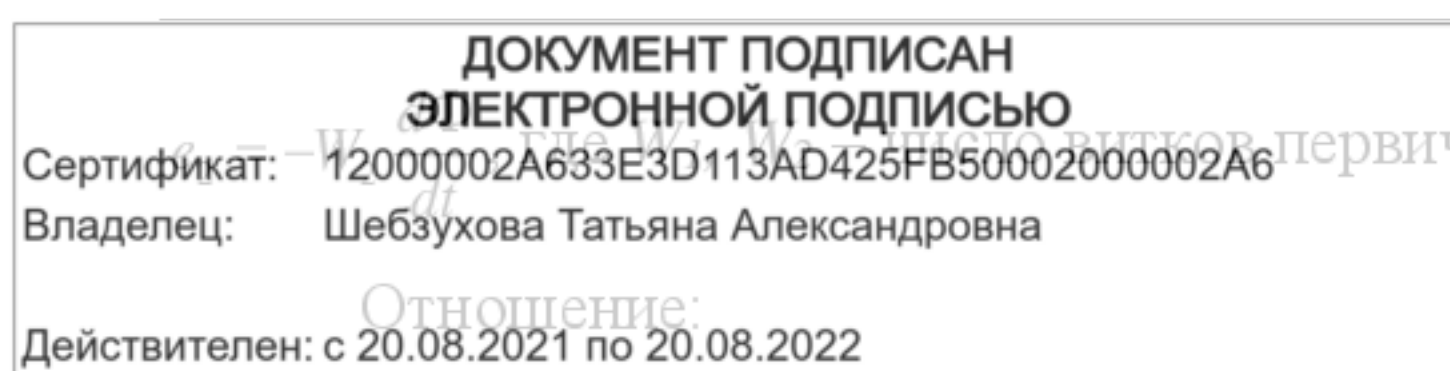
Рисунок 4.3 – Векторная диаграмма трансформатора

В режиме нагрузки ток вторичной обмотки трансформатора оказывает существенное влияние на ток первичной обмотки. Это объясняется встречным включением обмоток. Увеличение тока $\dot{I}_2$ приводит к уменьшению общего потока, пронизывающего обмотки, что снижает противоэдс первичной обмотки. При неизменном напряжении питания это увеличивает ток в первичной обмотке чтобы восстановился баланс ЭДС и падений напряжения в первичной цепи с напряжением питания $\dot{U}_1$.

Идеальным называется трансформатор, обмотки которого имеют бесконечно большие индуктивности и активные сопротивления, равные нулю, коэффициент связи равен единице, $K = M / \sqrt{L_1 L_2} = 1$. Уравнение идеального трансформатора имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1. \end{cases} \quad (4.7)$$

Если считать, что обе обмотки трансформатора пронизывает один и тот же магнитный поток Φ , то в первичной обмотке будет наводиться ЭДС $e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}$, а во вторичной



ной и вторичной обмоток.

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{W_2}{W_1} = K_T \text{ – коэффициент трансформации.} \quad (4.8)$$

В режиме холостого хода при $\dot{I}_2 = 0$ получим: $\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1$, $\dot{U}_2 = j\omega M \dot{I}_1$.

Выразим $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{j\omega M}$ и подставим:

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_2}{j\omega M} j\omega L_1 = \dot{U}_2 \frac{L_1}{M}; \quad \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{M}{L_1} = \frac{\sqrt{L_1 L_2}}{L_1} = \frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}} \approx \frac{W_2}{W_1} = K_T. \quad (4.9)$$

В режиме короткого замыкания $\dot{U}_2 = 0$, тогда $0 = j\omega M \dot{I}_1 - j\omega L_2 \dot{I}_2$, или $M \dot{I}_1 = L_2 \dot{I}_2$, откуда:

$$\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{L_2}{M} = \frac{L_2}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}} \approx \frac{W_2}{W_1} = K_T. \quad (4.10)$$

Таким образом:

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = K_T \dot{U}_1; \\ \dot{I}_1 = K_T \dot{I}_2. \end{cases} \quad (4.11)$$

– это уравнение идеального трансформатора.

Входное сопротивление трансформатора:

$$Z_{BX} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{U}_2 / K_T}{K_T \dot{I}_2} = \frac{\dot{I}_2 Z_H}{K_T^2 \dot{I}_2} = \frac{Z_H}{K_T^2}, \text{ откуда } Z_H = K_T^2 Z_{BX}. \quad (4.12)$$

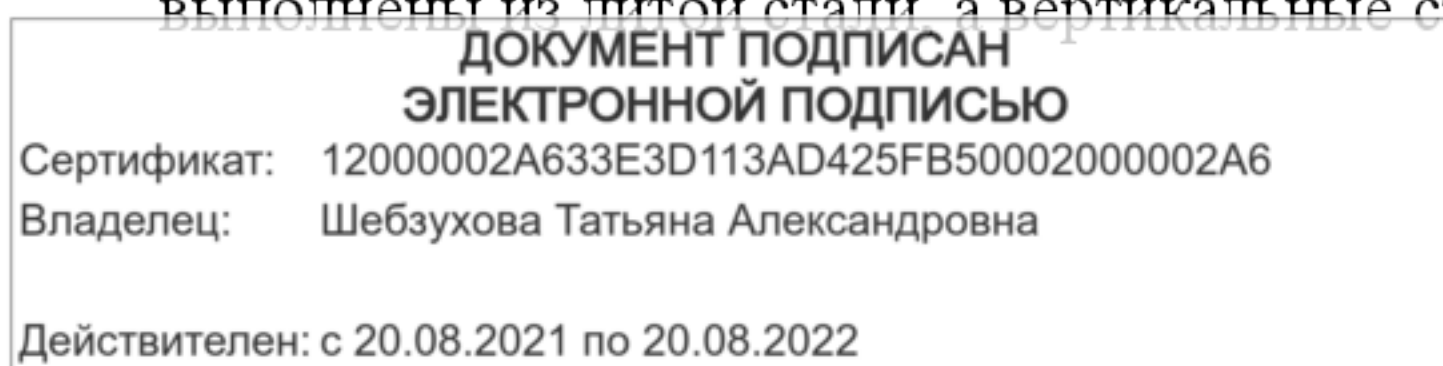
Таким образом, с помощью трансформатора можно осуществлять преобразование сопротивлений.

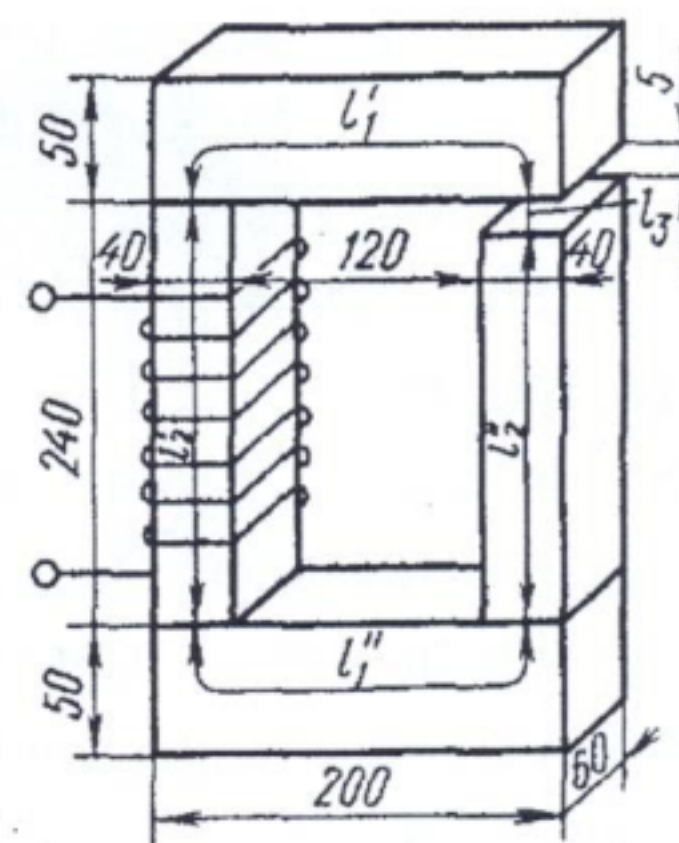
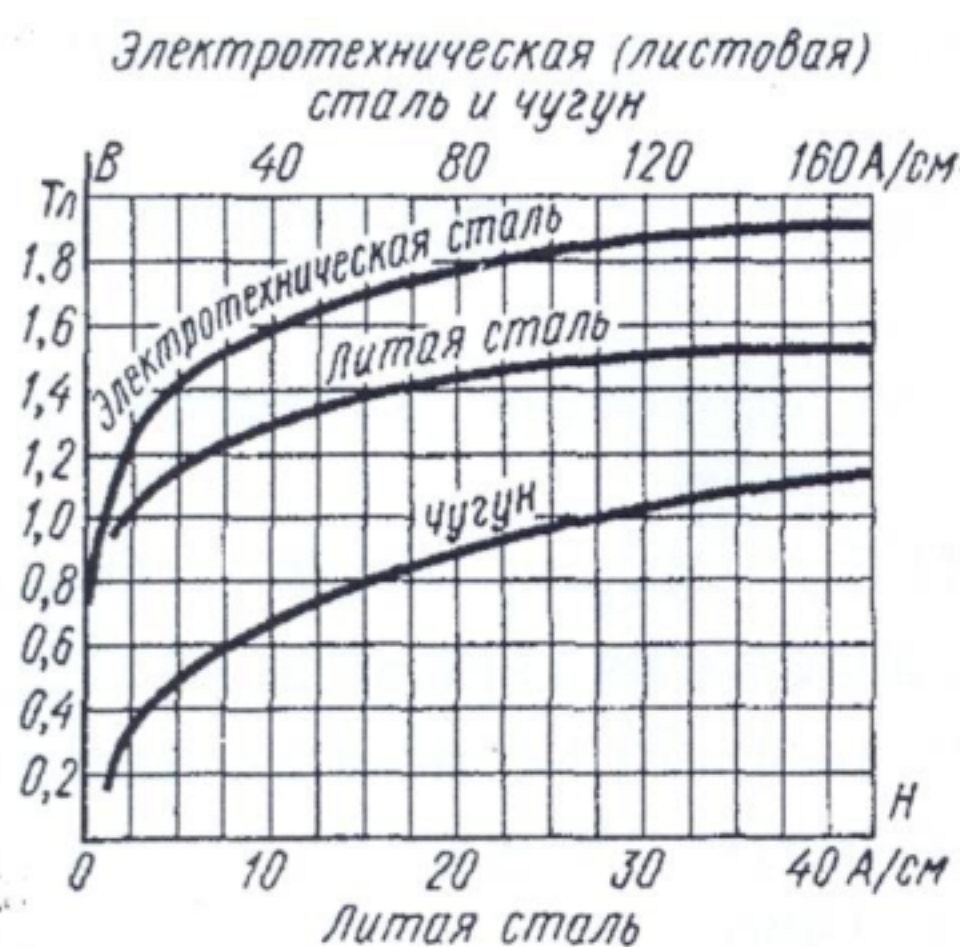
Следует отметить, что идеальный трансформатор является чисто теоретической моделью. Однако, свойствами, близкими к свойствам идеального трансформатора, обладают трансформаторы с ферромагнитным магнитопроводом при достаточно большом числе витков его обмоток.

Задания:

Задание №1

Определить число витков обмотки, расположенной на сердечнике, если при $I = 3$ А необходимо создать магнитный поток $\Phi = 36 \cdot 10^{-4}$ Вб. Верхняя и нижняя части сердечника выполнены из литой стали, а вертикальные стержни – из электротехнической стали.





На рис. индуктивно связанные катушки соединены в узле однополярными зажимами, на рис. 3.43,б те же катушки соединены в узле разнополярными зажимами. Определить показания вольтметра обеих схем, если: $x_1 = 20 \text{ Ом}$, $x_2 = 10 \text{ Ом}$, коэффициент связи катушек $k = 0,5$, ёмкостное сопротивление $x_3 = 10 \text{ Ом}$, ЭДС $e(t) = 100\sqrt{2} \sin(\omega t) \text{ В}$.

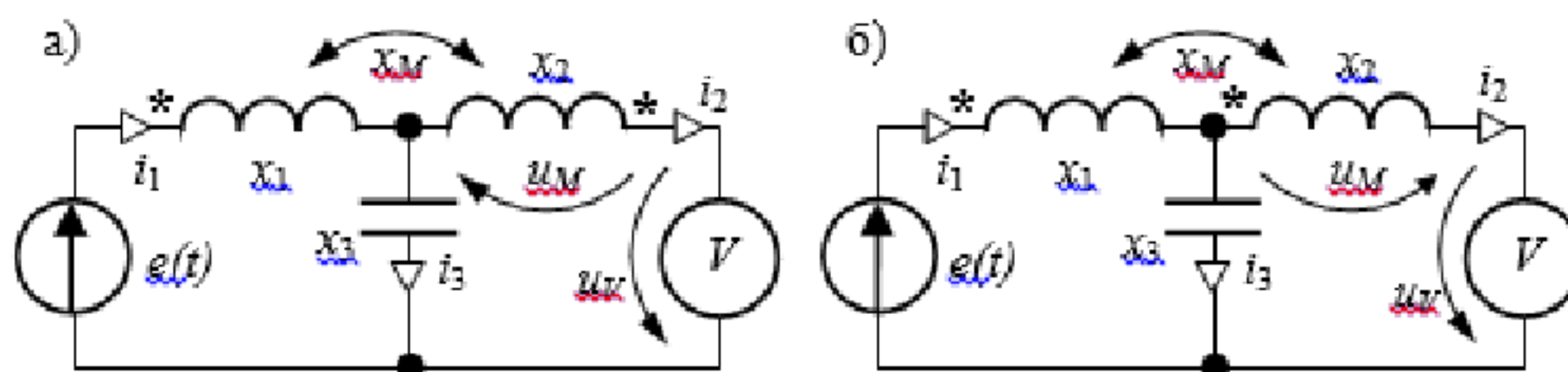


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Параметры схемы рис. $r_1 = 10 \text{ Ом}$, $x_1 = 20 \text{ Ом}$, $r_2 = 40 \text{ Ом}$, $x_2 = 30 \text{ Ом}$, $x_M = 20 \text{ Ом}$, приложенное напряжение $U = 220 \text{ В}$. Найти показания приборов. Построить векторную диаграмму цепи. Записать уравнение баланса мощностей. Найти активную мощность, передаваемую из одной ветви в другую.

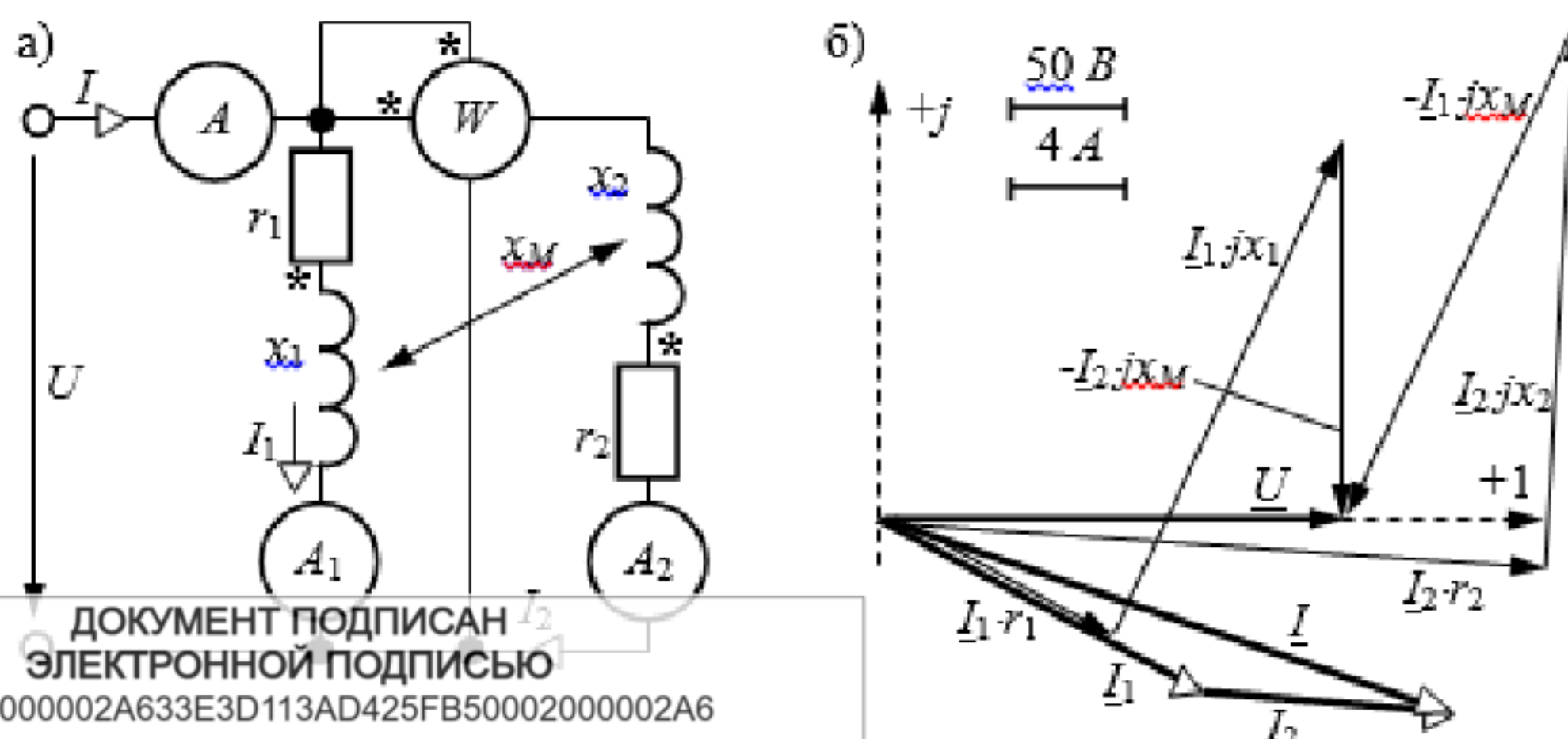


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Контрольные вопросы:

1. Что называется магнитной цепью?
2. Назовите элементы магнитной цепи.
3. Каковы основные параметры магнитной цепи?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Практическая работа №8. Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока

Цель: Получить навыки перевода синусоидальных величин в комплексные, научиться строить векторные диаграммы.

Основы теории:

Пусть в цепь переменного тока с частотой $f = 50 \text{ Гц}$ включена катушка, обладающая индуктивностью L и активным сопротивлением r (рис. 2.1).

При протекании по катушке переменного тока i_L в пространстве, окружающем витки, будет создаваться магнитный поток Φ и потокосцепление с витками катушки:

$$\psi = w \cdot \Phi$$

где w – число витков катушки.

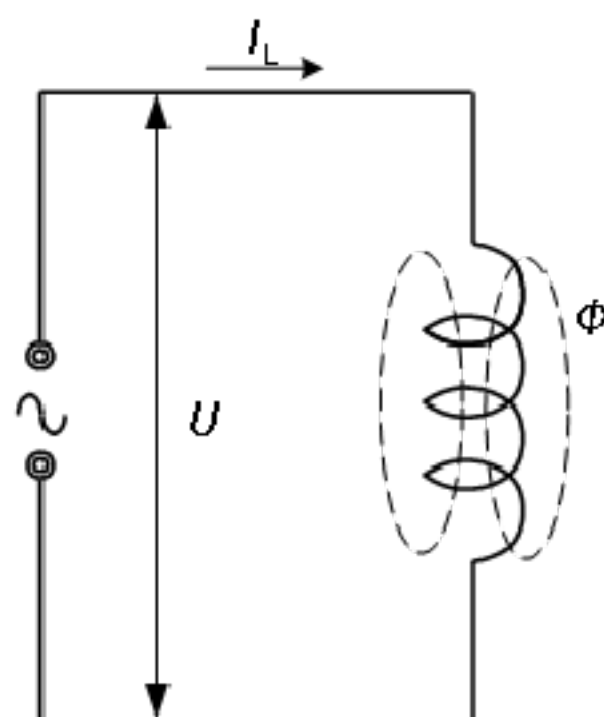


Рисунок 4.1 – Схема с индуктивностью

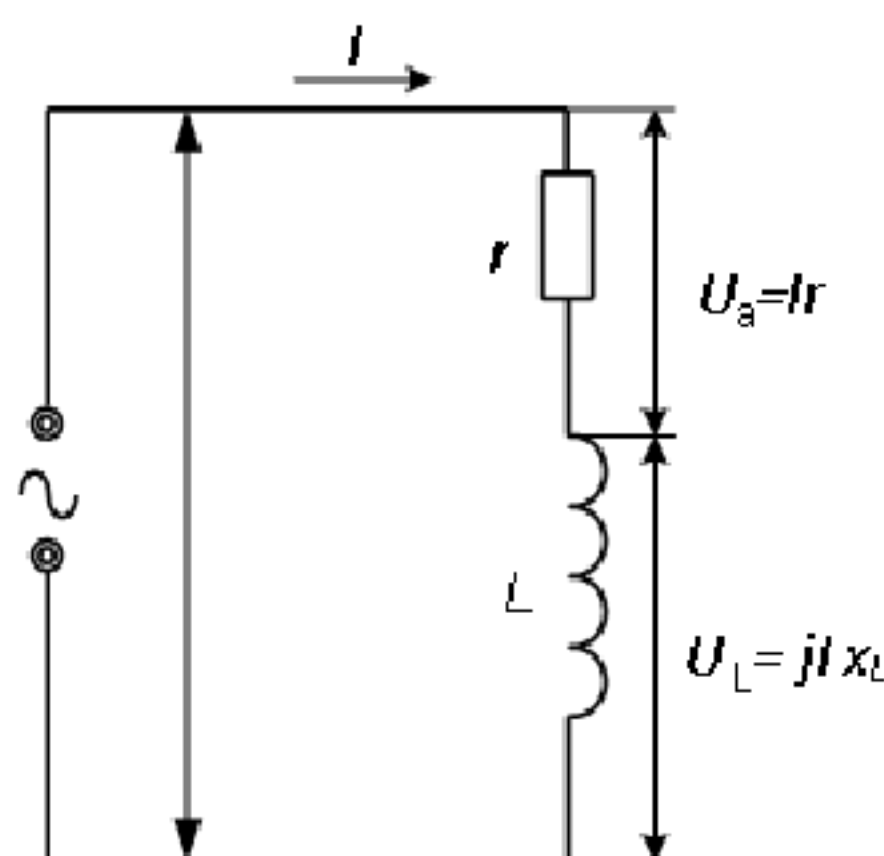


Рисунок 4.2 – Схема последовательного соединения R и L

Отношение потокосцепления катушки к току катушки i_L называется собственной ин-

ДУКТИВНОСТЬЮ:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$L = \frac{\psi}{i_L} = \frac{w \cdot \Phi}{i_L}$$

Если собственное потокоцепление пропорционально току (в случае катушки без стального сердечника), то $L = \text{const}$. Основной единицей измерения индуктивности является Генри (Гн):

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}}, 1 \text{ Гн} \cdot 10^{-3} = 1 \text{ мГн}$$

Если ток в катушке изменяется (например, по синусоидальному закону), то и потокоцепление катушки изменяется и поэтому в витках катушки по закону электромагнитной индукции наводится э.д.с. самоиндукции e_L :

$$e_L = - \frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di_L}{dt}$$

т.е. наводимая э.д.с. e_L препятствует изменению тока i_L . Кроме того, катушка обладает некоторым активным сопротивлением r .

Применяя второй закон Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин, можно записать:

$$u + e_L = i \cdot r$$

отсюда напряжение на зажимах цепи равно

$$u = i \cdot r - e_L = u_a + u_L$$

Падение напряжения на активном сопротивлении называют активной составляющей напряжения или активным напряжением, а падение напряжения на индуктивном сопротивлении называют индуктивной составляющей напряжения. Мгновенные значения этих величин обозначают u_a и u , а действующие – соответственно U_a и U_L . При синусоидальном законе изменения тока напряжение на зажимах цепи будет равно:

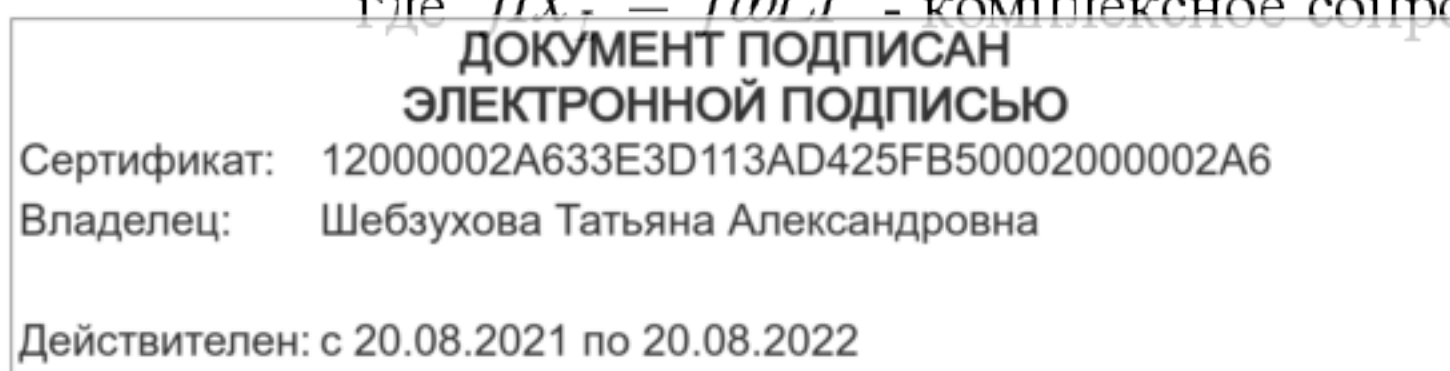
$$\begin{aligned} u = ir - e_L &= rI_m \sin \omega t + L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = rI_m \sin \omega t + \omega LI_m \cos \omega t = \\ &= U_{am} \sin \omega t + U_{Lm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned}$$

т.е. между активным и индуктивным падениями напряжения имеется сдвиг по фазе на 90° .

Переходя к комплексной форме можно записать:

$$\dot{U} = \dot{U}_a + j\dot{U}_L = \dot{I}r + j\dot{I}x_L$$

где $j\dot{I}x_L = j\omega L\dot{I}$ – комплексное сопротивление индуктивного элемента;



$\dot{U}_a = \frac{U_{am}}{\sqrt{2}}$ и $\dot{U}_L = \frac{U_{Lm}}{\sqrt{2}}$ - действующие значения активного и индуктивного напряжений.

Таким образом, напряжение на зажимах цепи $\dot{U}$ можно представить в виде суммы двух синусоид $\dot{U}_a$ и $j\dot{U}_L$. Известно, что всякую синусоидально изменяющуюся величину можно представить в виде вектора (например, тока $\dot{I}$), вращающегося в пространстве с угловой частотой ω , проекция которого на мнимую ось и дает синусоидальную величину (рис. 4.3).

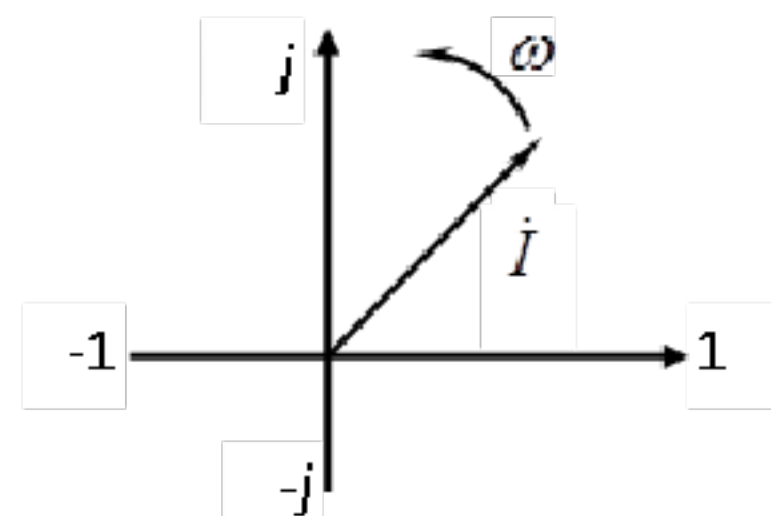
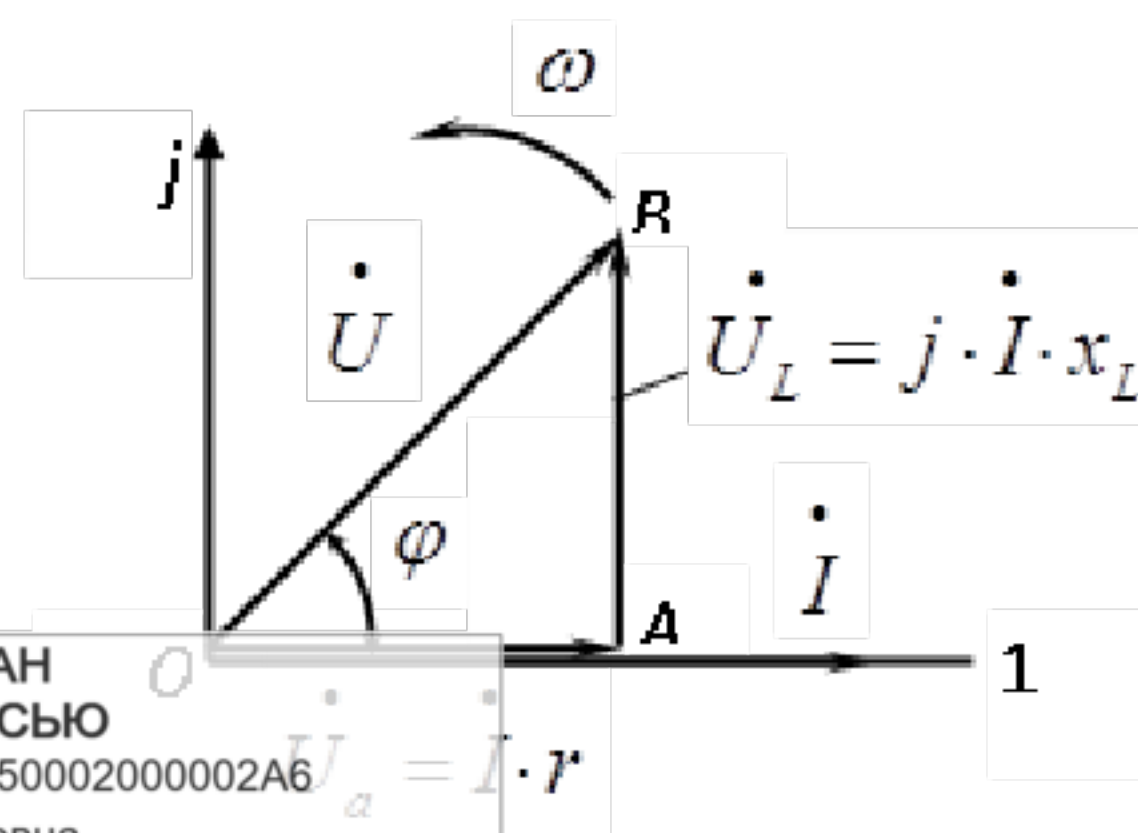


Рисунок 4.3 – Изображение синусоидально изменяющейся величины тока в виде вектора

Определим напряжения на зажимах цепи при помощи векторной диаграммы. Вектор тока $\dot{I}$ отложим в произвольном направлении, например, горизонтально (рис. 4.4). Все остальные векторы будут жестко привязаны к вектору $\dot{I}$, т.е. их сдвиг по фазе будет строго определенным.

Вектор активного напряжения $\dot{U}_a = \dot{I} \cdot r$ будет совпадать по направлению с вектором $\dot{I}$. Вектор индуктивной составляющей напряжения $\dot{U}_L = j \cdot \dot{I} \cdot x_L$ будет опережать на 90° вектор $\dot{I}$. Складывая геометрически векторы $\dot{U}_a$ и $\dot{U}_L$, получим вектор напряжения $\dot{U}$ на зажимах цепи.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 4.4 – Векторная диаграмма при последовательном соединении R и L

Величина $x_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L$ называется *индуктивным сопротивлением* и измеряется в *Ом*. Сопротивление x_L зависит от частоты и при включении катушки индуктивности в цепь постоянного тока ($f = 0$) ток катушки будет ограничен только ее активным сопротивлением и окажется намного больше. Поэтому катушки индуктивности, предназначенные для работы на переменном токе, нельзя включать в цепи постоянного тока.

Треугольник ОАВ (рис. 4.4) прямоугольный и называется треугольником напряжений. Из треугольника ОАВ имеем:

$$\dot{U}^2 = \dot{U}_a^2 + \dot{U}_L^2$$

$$\dot{U}^2 = (\dot{I} \cdot r)^2 + (\dot{I} \cdot x_L)^2 = I^2 (r^2 + x_L^2)$$

Извлекая из обеих частей корень, получим

$$U = I \cdot \sqrt{r^2 + x_L^2}$$

Величина $\sqrt{r^2 + x_L^2}$, имеющая размерность сопротивления, называется полным сопротивлением цепи и обозначается z :

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$$

и закон Ома для цепи переменного тока имеет вид:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{z} \text{ и } \dot{U} = \dot{I} z$$

Косинус угла сдвига фаз φ между током I и напряжением U равен:

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{I \cdot r}{I \cdot z} = \frac{r}{z}$$

Из треугольника мощностей, который можно получить из треугольника напряжений умножением его сторон на ток I , получим активную мощность:

$$P = I^2 r = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Реактивная мощность:

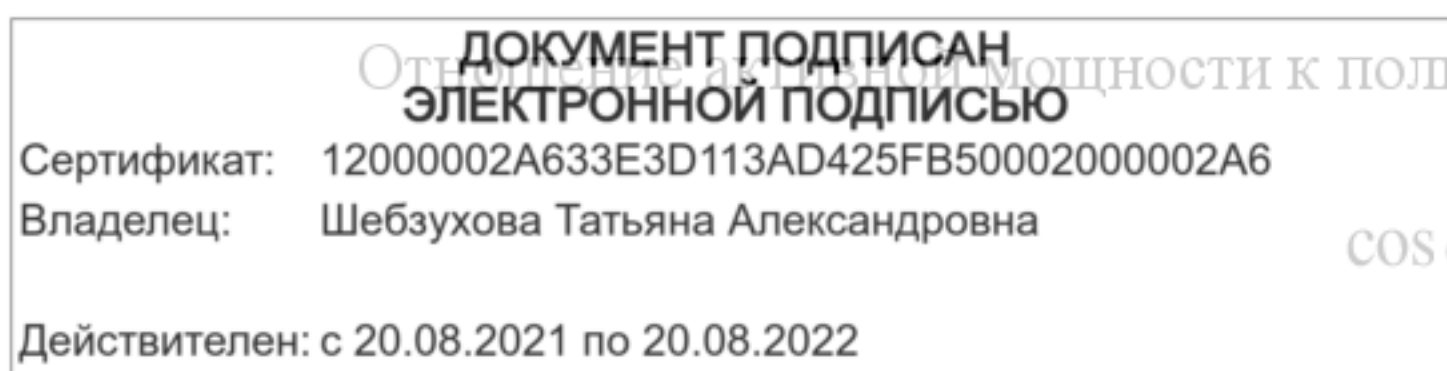
$$Q = I^2 x_L = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Полная мощность:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Отношение активной мощности к полной называется коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}$$



Если цепь переменного тока обладает активным сопротивлением r и емкостью C (рис. 4.5), то по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин можно записать:

$$u = i \cdot r + u_c$$

где u – мгновенное значение приложенного к цепи напряжения,

i – мгновенное значение тока цепи;

u_c – мгновенное значение напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора и представляющего собой падение напряжения на емкости.

Если ток изменяется во времени по синусоидальному закону, т.е. $i = I_m \sin \omega t$, то предыдущее уравнение будет иметь вид:

$$U = rI_m \sin \omega t + \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

Из этой формулы видно, что приложенное к цепи напряжение состоит из двух составляющих: активной или активного напряжения $u_a = rI_m \sin \omega t$ совпадающей по фазе с током, и реактивной или емкостной составляющей $U_c = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$, отстающей от тока на 90° (рис. 1.6). Тогда

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_c$$

Построим векторную диаграмму для данного случая, пользуясь теми же правилами, как и при построении диаграммы для последовательного соединения r и L (см. рис. 4.4).

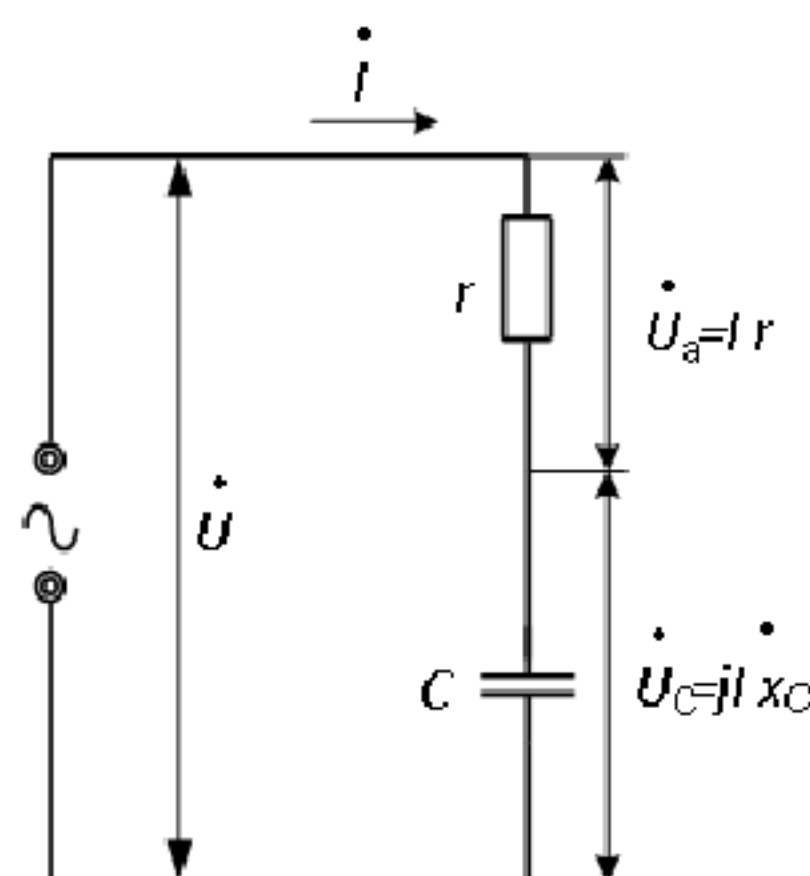


Рисунок 4.5 – Последовательное соединение R и C

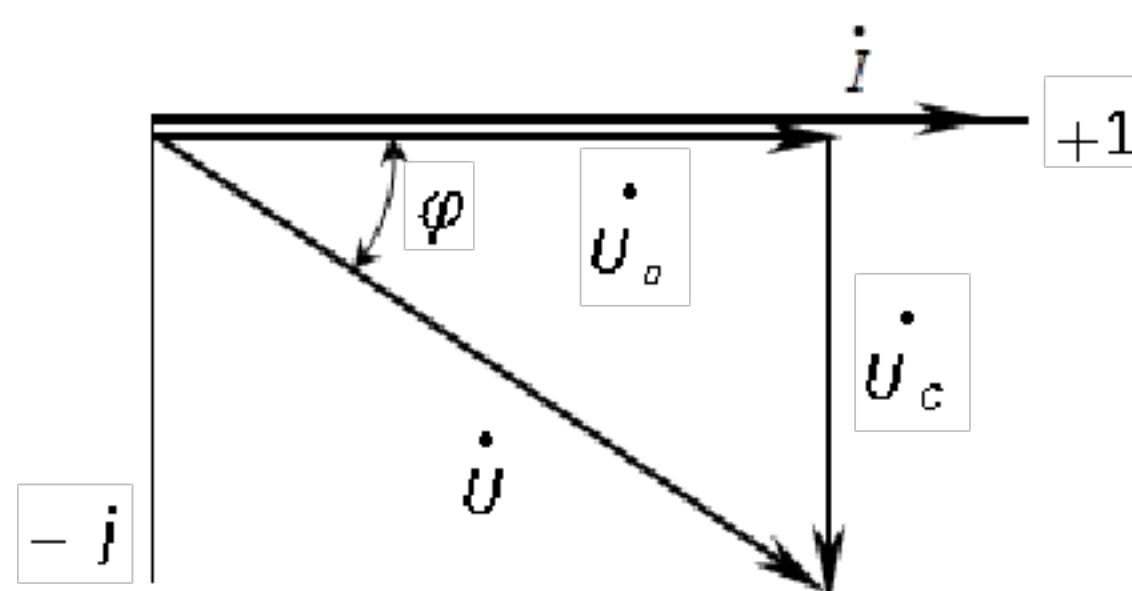


Рисунок 4.6 – Векторная диаграмма для последовательного соединения R и C

При этом необходимо иметь в виду, что вектор напряжения $\dot{U}_c$ отстает от тока $\dot{i}$ на 90° (рис 2.6).

Из треугольника OAB на рисунке 6 имеем:

$$U^2 = U_a^2 + U_c^2$$

или

$$U^2 = (Ir)^2 + \left(\frac{I}{\omega C}\right)^2 = I^2 \left(r^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}\right).$$

Извлекая квадратный корень из обеих частей, получим:

$$U = I \cdot \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

откуда

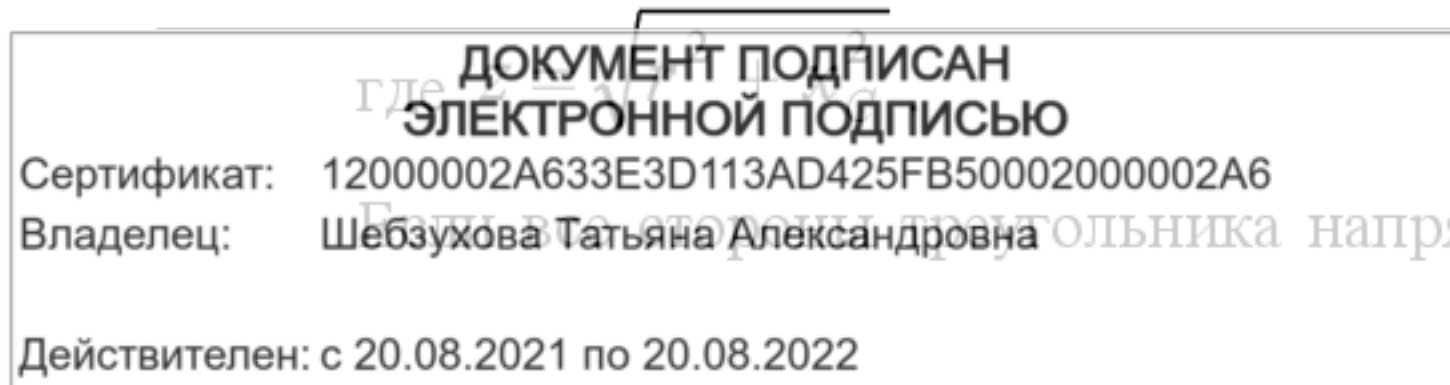
$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_c^2}}.$$

Величина $x_c = \frac{1}{\omega C}$ называется *емкостным сопротивлением* и измеряется в Ом.

Емкостное сопротивление зависит от частоты напряжения сети и от емкости конденсатора.

Величина $\sqrt{r^2 + x_c^2}$ называется *полным сопротивлением* и обозначается z . Закон Ома применительно к данной цепи переменного тока будет иметь вид:

$$I = \frac{U}{z},$$



Где U – действующее значение напряжения, I – действующее значение тока. Если разделить вектор напряжений OAB на ток I , то получим

треугольник сопротивлений с катетами r и x_C и гипотенузой z .

При последовательном соединении r , L и C будут справедливы все выводы, полученные для цепи с r - L и цепи с r - C . При этом возможны следующие комбинации:

$$\text{а) } x_L > x_C ; \text{ б) } x_L < x_C ; \text{ в) } x_L = x_C .$$

Рассмотрим с помощью векторных диаграмм каждый из этих вариантов.

а) Имеем цепь из последовательно соединенных r , L и C , причем

$x_L > x_C$. По всем трем сопротивлениям будет протекать один и тот же ток $\dot{I}$, вектор которого отложим в выбранном масштабе произвольно, например, горизонтально, т.е. направление первого вектора выбирается произвольно (рис. 4.7).

Вектор падения напряжения на активном сопротивлении будет совпадать с направлением тока, а падение напряжения на индуктивном элементе или $\dot{U}_L$ будет опережать вектор $\dot{I}$ на $\pi/2$. Падение напряжения на емкостном элементе $\dot{U}_C$ будет отставать от вектора тока на $\pi/2$ и согласно условию

$$\dot{U}_C < \dot{U}_L .$$

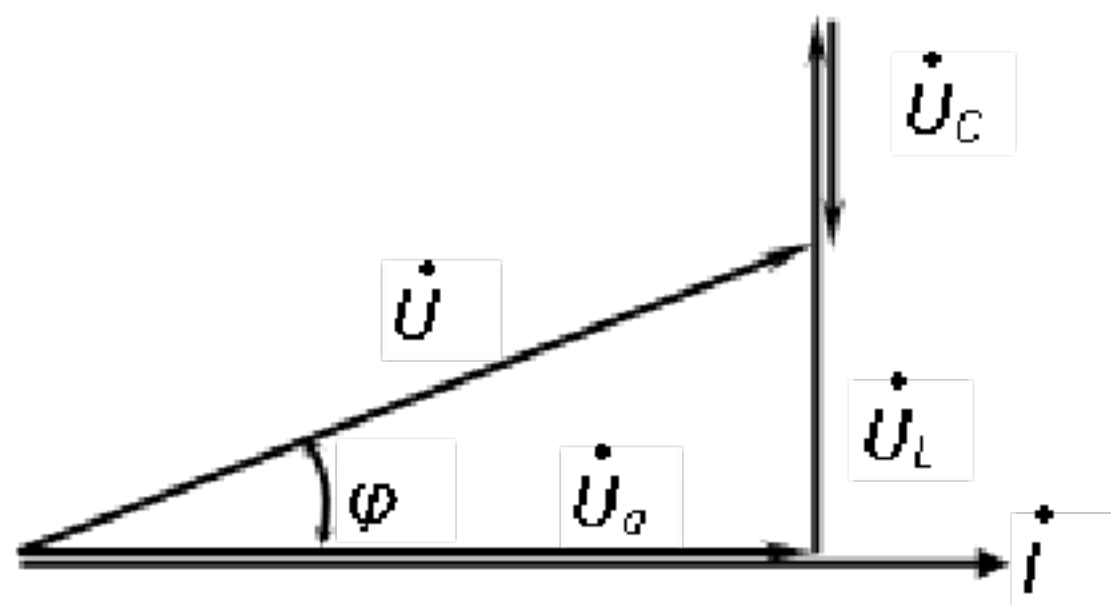


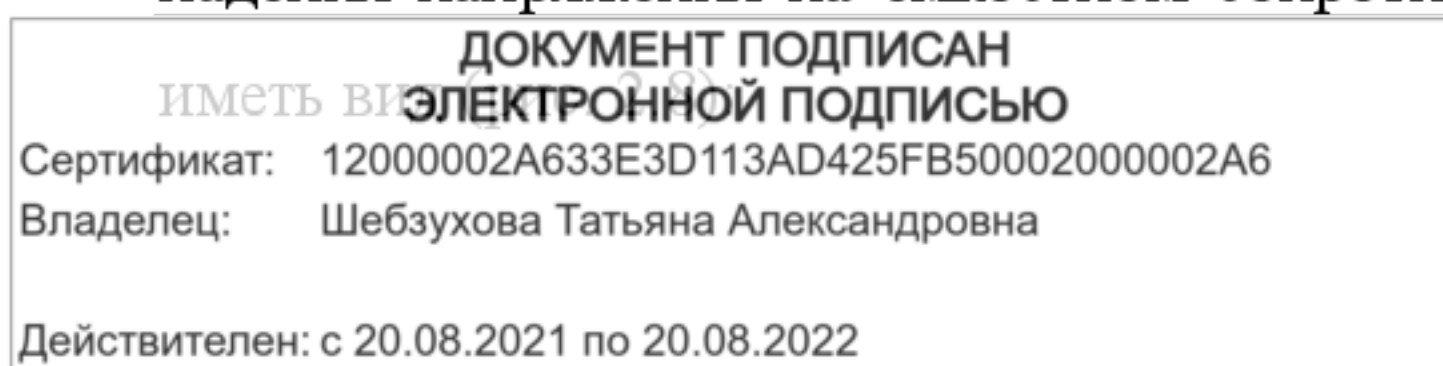
Рисунок 4.7 – Векторная диаграмма напряжений при $x_L > x_C$

Общее напряжение цепи будет равно сумме

$$\dot{U}_a + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{U} .$$

Из векторной диаграммы видно, что между током цепи $\dot{I}$ и напряжением $\dot{U}$ есть угол φ и ток имеет отстающий характер, а $\cos \varphi < 1,0$.

б) При $x_L < x_C$ падение напряжения на индуктивном сопротивлении будет меньше падения напряжения на емкостном сопротивлении, поэтому векторная диаграмма будет



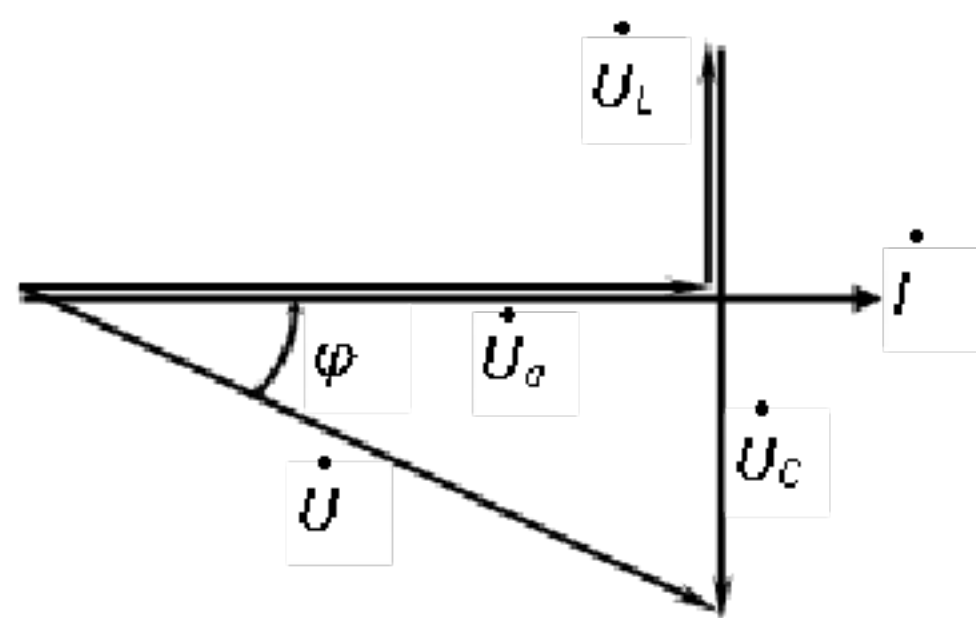


Рисунок 4.8 – Векторная диаграмма напряжений при $\dot{U}_C > \dot{U}_L$

в) При $x_L = x_C$ имеет место *резонанс напряжений*, т.е. $\dot{U}_C = \dot{U}_L$ и это будет при $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. При этом векторы $\dot{U}_L$ и $\dot{U}_C$ равны по модулю и противоположно направлены (рис. 4.9), поэтому их сумма равна нулю. Ток цепи при резонансе напряжений определяется только активным сопротивлением, поэтому угол сдвига фаз между током и напряжением цепи равен нулю, а $\cos \varphi = 1$. При этом надо иметь в виду, что результирующее сопротивление цепи резко уменьшится до значения $z = r$ и ток цепи при резонансе может резко возрасть.

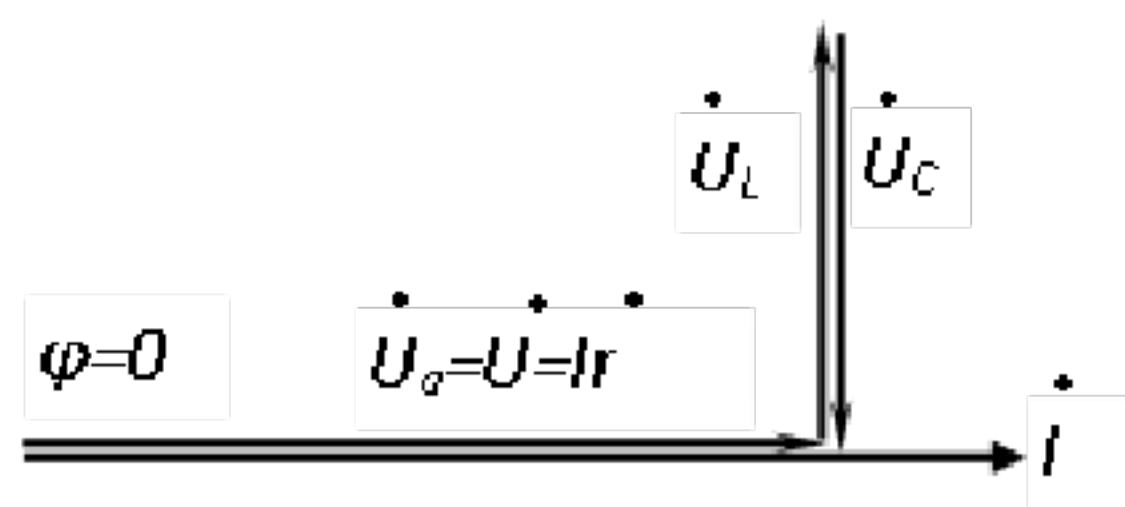


Рисунок 4.9 – Векторная диаграмма напряжений при резонансе

Задания:

Задание №1

Построить кривые изменения напряжения и тока во времени и начертить векторы, изображающие заданные синусоидальные функции

$$u(t) = 1008 \sin\left(157 * t + \frac{\pi}{10}\right); i(t) = 5 * \sin\left(157 * t - \frac{\pi}{8}\right)$$

Чему равен сдвиг фаз между напряжением и током? Определить период T и частоту ω .

$$i_1(t) = 100 * \sin(\omega t + 30^\circ)$$

$$i_2(t) = 120 * \sin(\omega t - 45^\circ)$$

$$i_1(t) = -20 * \sin(\omega t - 112^\circ)$$

$$i_2(t) = 50 * \sin(\omega t + 250^\circ)$$

$$i_1(t) = 50 * \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$i_2(t) = 25 * \sin(\omega t + 110^\circ)$$

Задание №3

Катушка с активным сопротивлением $R = 10 \text{ Ом}$, индуктивностью $L = 0,05 \text{ Гн}$ подключена к источнику синусоидального напряжения (рисунок 4.10), действующее значение которого $U = 120 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$. Определить полное сопротивление катушки, ток и сдвиг фаз между напряжением и током. Вычислить активную и реактивную составляющие напряжением на зажимах катушки. Построить векторную диаграмму напряжений и тока.

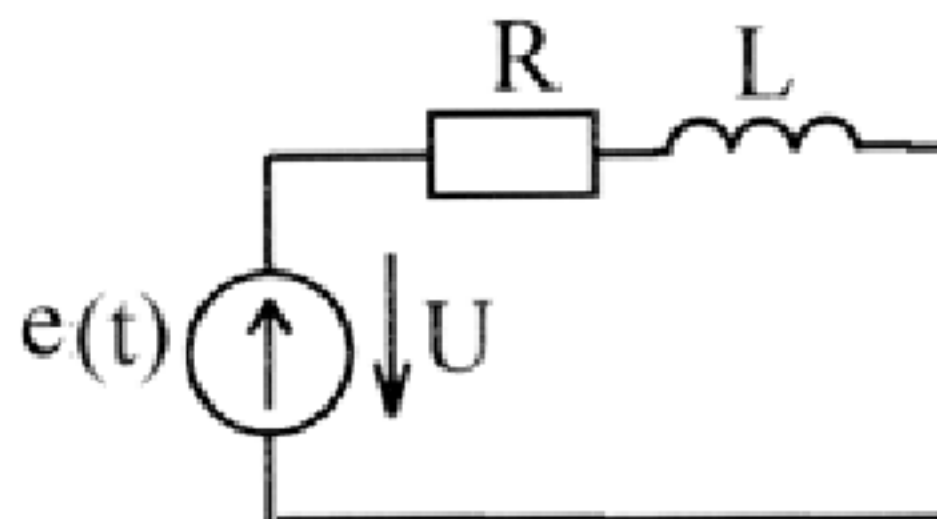


Рисунок 4.10 – Принципиальная схема

Задание №4

Найти мгновенные значения напряжения на всех участках и мгновенную мощность источника (рисунок 4.11). Дано: $J(t) = 2 * \sin(\omega t + 30^\circ)$, $f = 200 \text{ Гц}$, $r = 10 \text{ Ом}$, $L = 0.01 \text{ Гн}$, $C = 80 \text{ мкФ}$

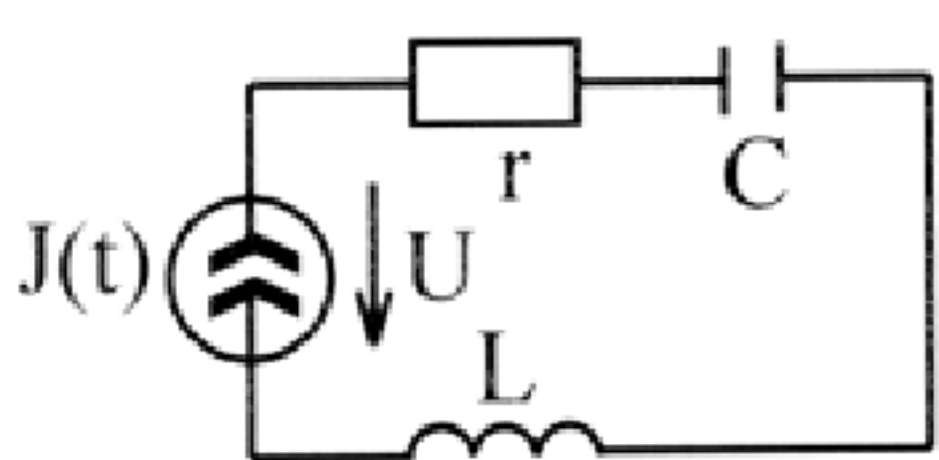


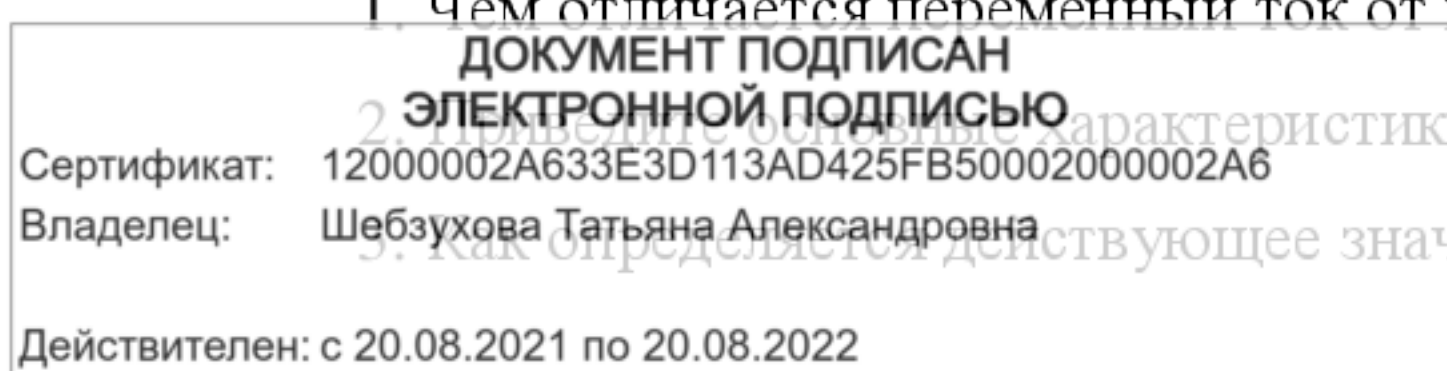
Рисунок 4.11 – Принципиальная схема

Контрольные вопросы:

1. Чем отличается переменный ток от постоянного?

2. Приведите основные характеристики синусоидального тока.

3. Как определяется действующее значения переменного тока?



4. Как изображается переменный ток на комплексной плоскости?
5. Приведите комплексные формы записи переменного тока.
6. Как аналитически и графически сложить (вычесть) два переменных тока?
7. Как аналитически умножить или разделить две комплексные величины?
8. Как определяется и что показывает мгновенная мощность?
9. Как определяется индуктивное сопротивление? Емкостное?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Практическая работа №9. Расчет однофазных цепей синусоидального тока.

Цель: Получить навыки расчета разветвленных однофазных цепей синусоидального тока различными методами как в обычных режимах, так и в режиме резонанса, научиться сопровождать расчеты векторными и топографическими диаграммами.

Основы теории:

В электрических цепях переменного синусоидального тока токи и напряжения всех ветвей изменяются во времени по синусоидальному закону. Общий вид этого закона для силы тока следующий (рис. 5.1)

Данное выражение для силы тока в каждый момент времени называется мгновенным значением тока. Величина I_m называется амплитудой, она равна максимальному значению тока.

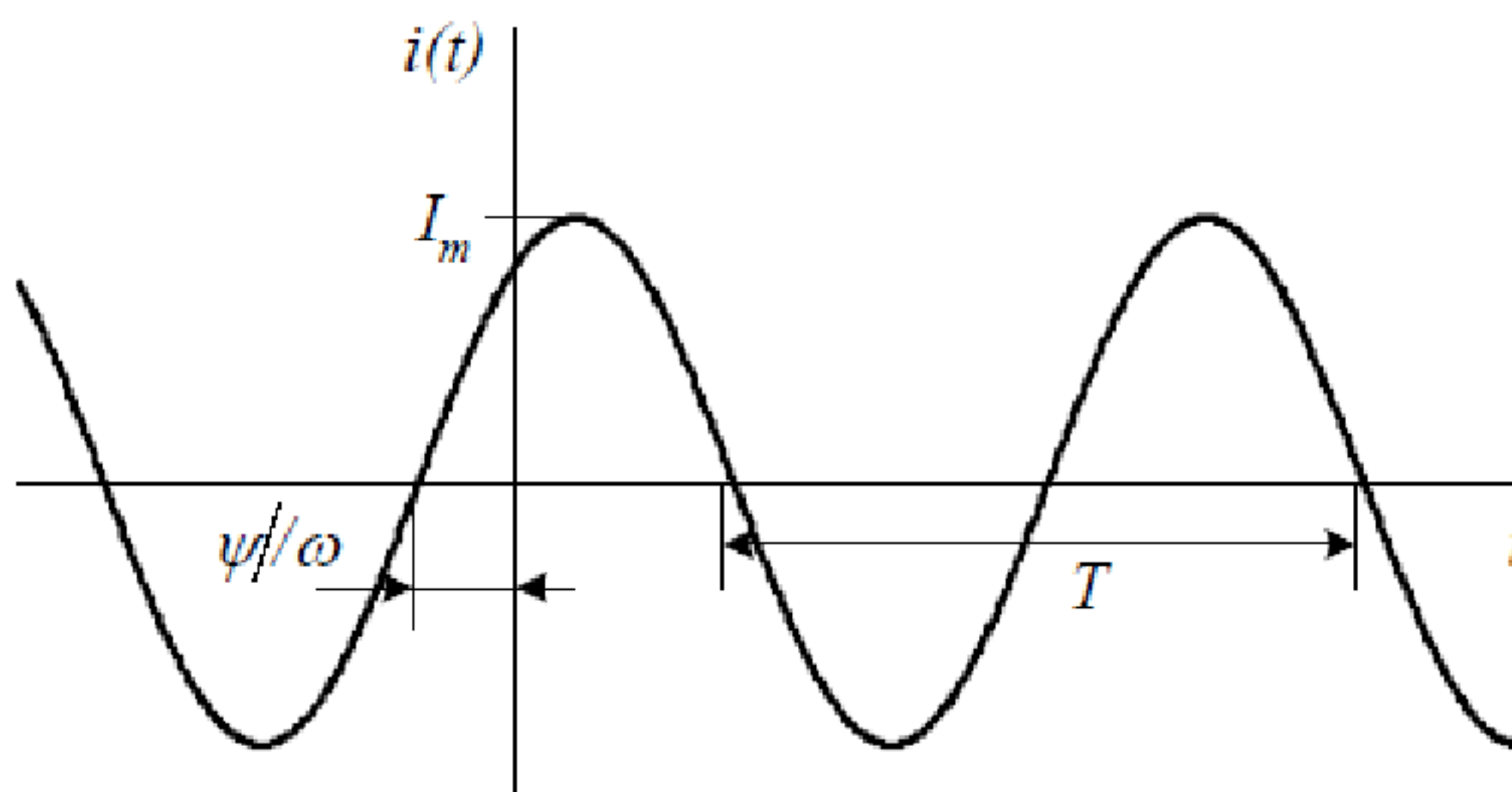


Рисунок 4.10 – Зависимость мгновенного значения тока от времени

Период синусоидальной функции T определяется частотой синусоидальных колебаний $f=1/T$. Круговая или циклическая частота связана с угловой частотой. Начальная фаза ψ определяет сдвиг синусоиды относительно оси ординат.

В цепях синусоидального тока присутствует источник синусоидального тока или напряжения. Может быть несколько источников одинаковой частоты. Если в цепи несколько источников синусоидального тока или напряжения с разными частотами, токи и напряжения цепи не будут синусоидальными, и, следовательно, цепь не будет являться це-

пью синусоидального тока. В данном разделе такие цепи не рассматриваются.

ТОКУСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА ПЕРЕМЕННЫЕ СОСТОЯНИЯ (ТОКИ И НАПРЯЖЕНИЯ ВСЕХ ВЕТВЕЙ) ИЗМЕНЯЮТСЯ ВО ВРЕМЕНИ ПО СИНУСОИДАЛЬНОМУ ЗАКОНУ С ОДНОЙ И ТОЙ ЖЕ

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

частотой, но каждая со своей начальной фазой и амплитудой. Эти две характеристики позволяют задать значение тока или напряжения в любой момент времени.

Задания:

Задание №1

Для электрической цепи однофазного переменного тока схема, которой представлена на рисунке 5.2. Записать уравнения по законам Кирхгофа в дифференциальной форме. Найти токи ветвей методом контурных токов и узловых потенциалов, напряжения на участках цепи, активную, реактивную и полную мощности, а также построить векторную диаграмму токов и напряжений. Определить показание измерительных приборов. Дано $e_1(t) = e_2(t) = 20 * \sqrt{2} \sin(314 * t)$, $C_1=C_2=318.5$ мкФ, $R_2=10$ Ом, $L_2= 16$ мГн, $R_3=10$ Ом.

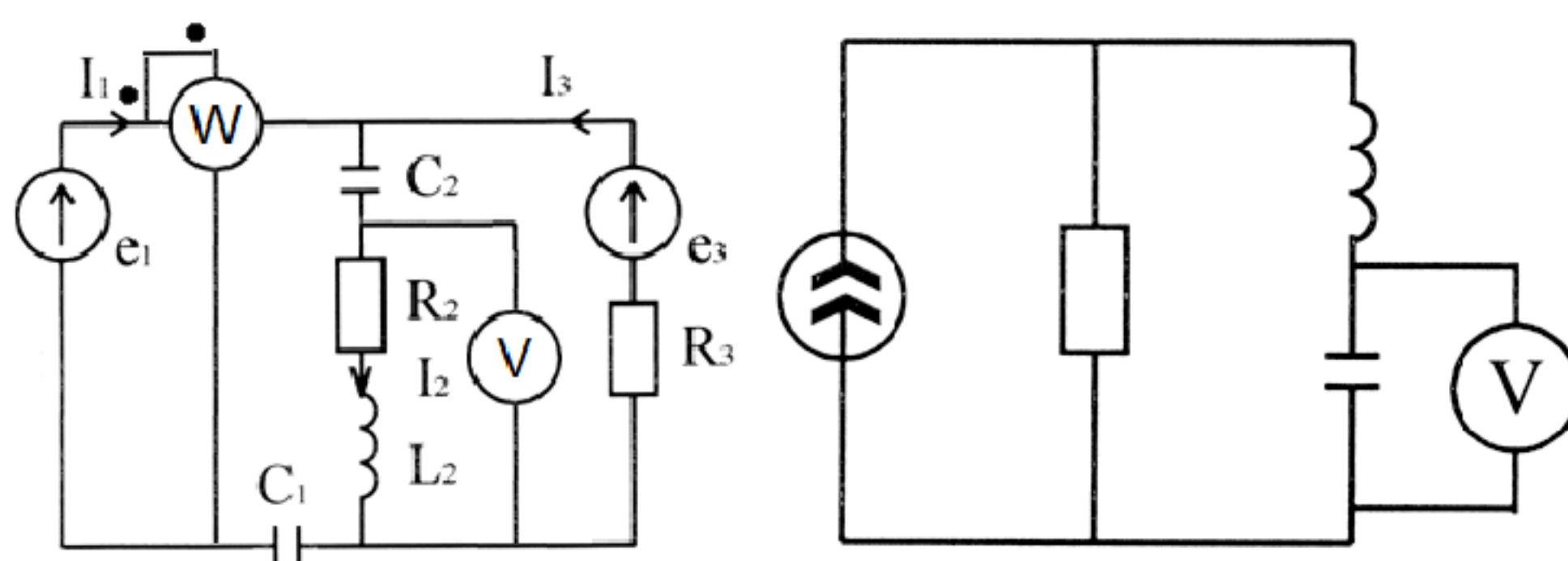


Рисунок 5.2 – Принципиальная схема

Задание №2

Для электрической цепи, схема которой представлена на рисунке 5.3 с параметрами $X_1 = 20$ Ом, $X_2 = 20$ Ом, $X_C = 10$ Ом, $X_1 = 20$ Ом, $R = 40$ Ом, $X_M = 10$ Ом, $E = 200$ В. Определить показание вольтметра. (97 В)

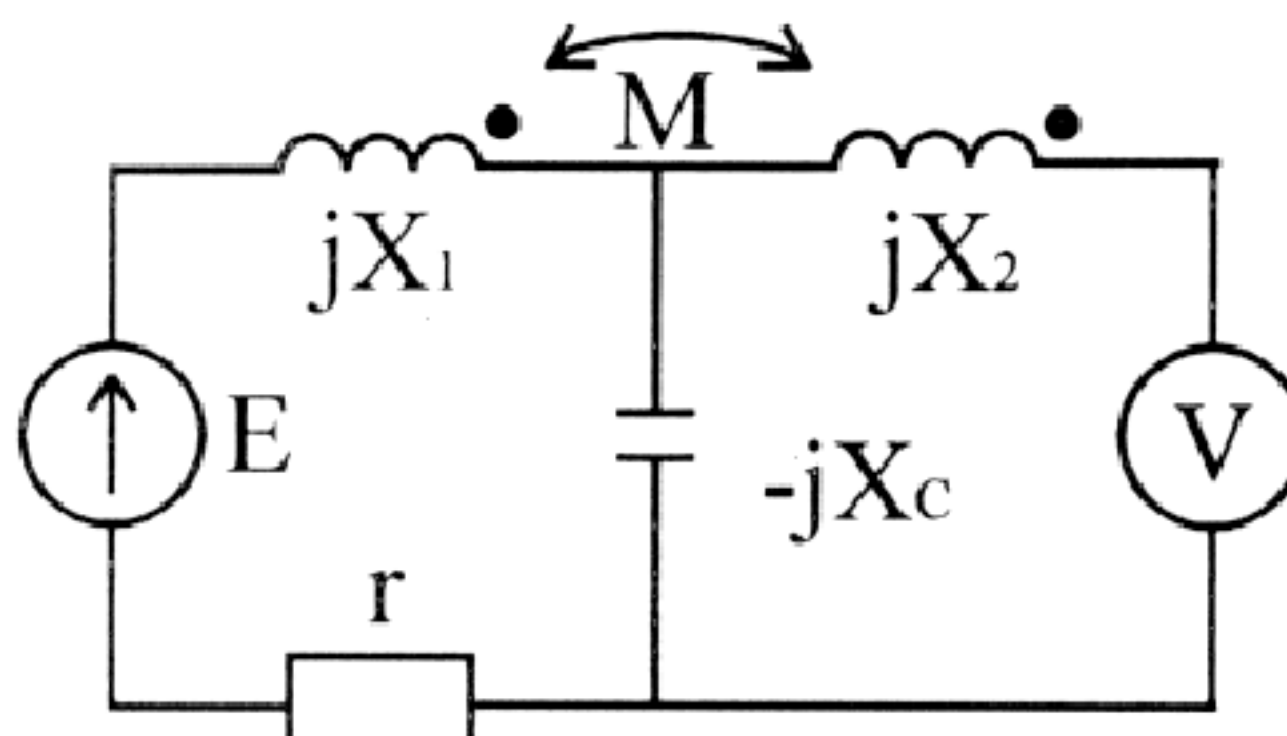


Рисунок 5.3 – Принципиальная схема

1. Если цепь разветвленная, то как соединятся параметры цепи?
2. Чему равны токи ветвей для такой цепи?
3. Как определяют общий ток цепи?
4. Чему равны активные и реактивные составляющие токов ветвей для такой цепи?
5. Что называют векторной диаграммой?
6. Объяснить построение векторной диаграммы для такой цепи
7. Как выбирается масштаб для данной векторной диаграммы?
8. Чему равны активная, реактивная и полная мощность для данной цепи?
9. Чему равен активный коэффициент мощности цепи?
10. Какой ток называют переменным?
11. Если цепь неразветвленная, то как соединяются параметры цепи?
12. Как ведет себя напряжение на участке с активным сопротивлением по отношению к току?
13. Чему равно мгновенное напряжение на участке с индуктивностью?
14. Чему равно мгновенное напряжение на участке с емкостью?
15. Что называют векторной диаграммой?
16. Чему равно полное сопротивление для такой цепи?
17. Как определяются реактивные сопротивления на индуктивности и на емкости?
18. Чему равны активный и реактивный коэффициенты мощности цепи?

Практическая работа №10. Расчет симметричных трехфазных цепей

Цель: Получить навыки расчета трехфазных цепей синусоидального тока при симметричной нагрузке.

Основы теории:

Трехфазной системой электрических цепей называется система, состоящая из трех однофазных электрических цепей, в каждой из которых действуют синусоидальные э.д.с. одинаковой частоты, но сдвинутые друг относительно друга на $1/3$ периода (120°) и создаваемые общим (трехфазным) источником электрической энергии.

Отдельные электрические цепи, входящие в состав трехфазной системы, называют *фазами*. Если э.д.с. каждой из фаз равны по величине, а полные сопротивления нагрузок всех трех фаз по величине и характеру нагрузки (по величине и знаку фазового сдвига) одинаковы, то такой режим называют *симметричным*. Невыполнение данных условий является причиной *несимметричного* режима. Нагрузка трехфазных цепей редко бывает симметричной, как правило, она в той или иной степени несимметрична из-за наличия однофазных потребителей.

Трехфазные генераторы создают симметричную систему э.д.с., поэтому несимметричный режим возникает из-за несимметричной нагрузки фаз. Если концы обмоток фаз синхронного генератора или трансформатора соединить вместе звездой, а к началам присоединить провода, идущие к приемникам электрической энергии, которые тоже соединить звездой, то получим трехфазную систему (рис. 1). Провод, соединяющий нулевые точки источника и потребителя называется нулевым. Такую систему называют *четырёхпроводной*. В цепях трехфазного тока независимо от способа соединения обмоток генератора и потребителей различают напряжения – линейные U_L и фазные U_Φ , а также токи – линейные I_L и фазные I_Φ . Напряжение между линейным и нулевым проводом называется *фазным*, а между линейными проводами – *линейным*. Токи, протекающие в линейных проводах, называют *линейными*, а протекающие в фазах нагрузки или источника – *фазными*. В схеме (рис. 6.1) линейные токи равны фазным, т.е. линейный ток одновременно является и фазным. При равномерной нагрузке $U_L = \sqrt{3}U_\Phi$, если схема соединения - звезда.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

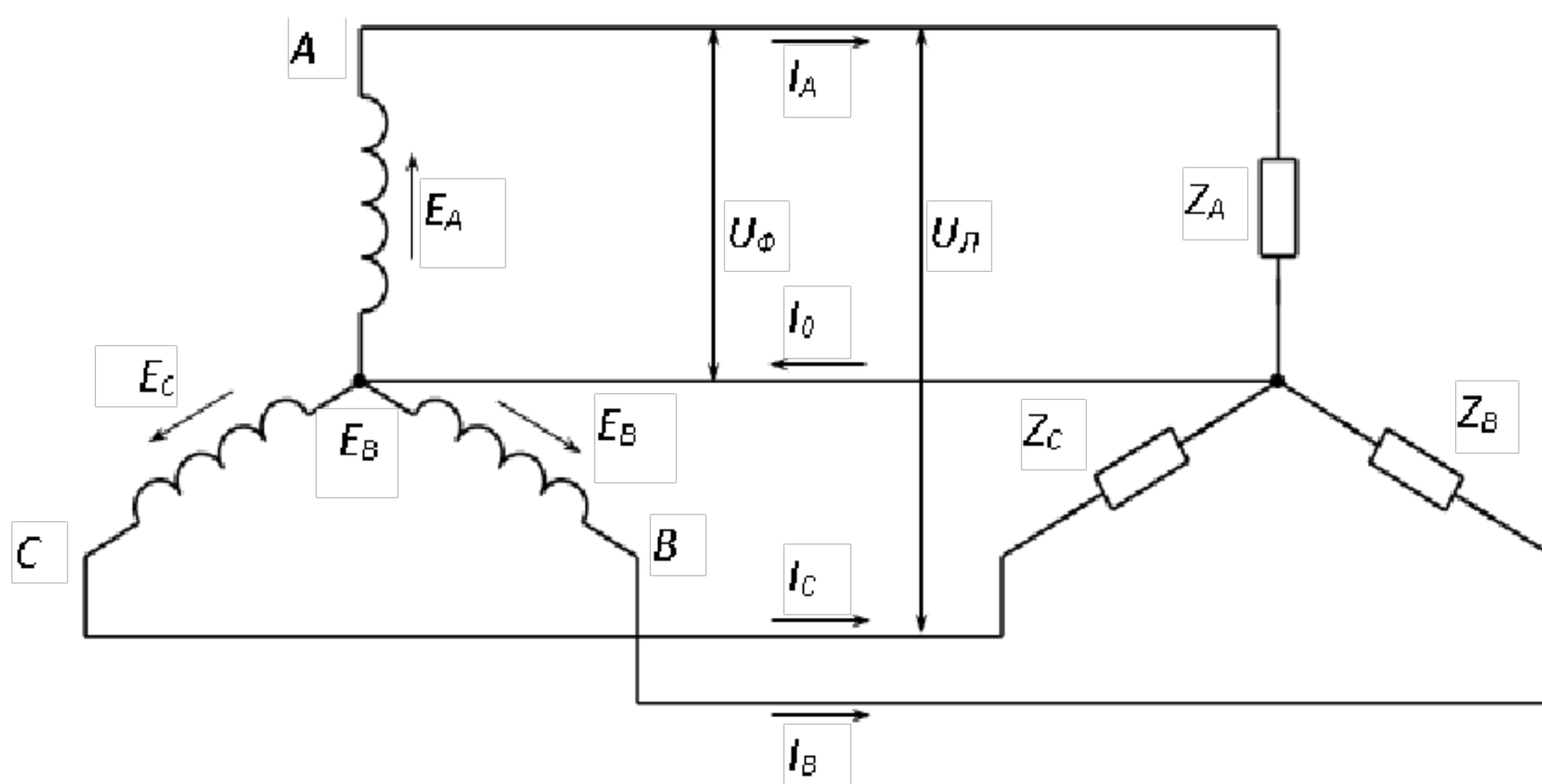


Рисунок 6.1 – Схема трехфазной четырехпроводной цепи при соединении звездой

При неравномерной нагрузке фаз в схеме с нулевым проводом (рис. 6.1), в нулевом проводе появляется ток, величина которого определяется по первому закону Кирхгофа:

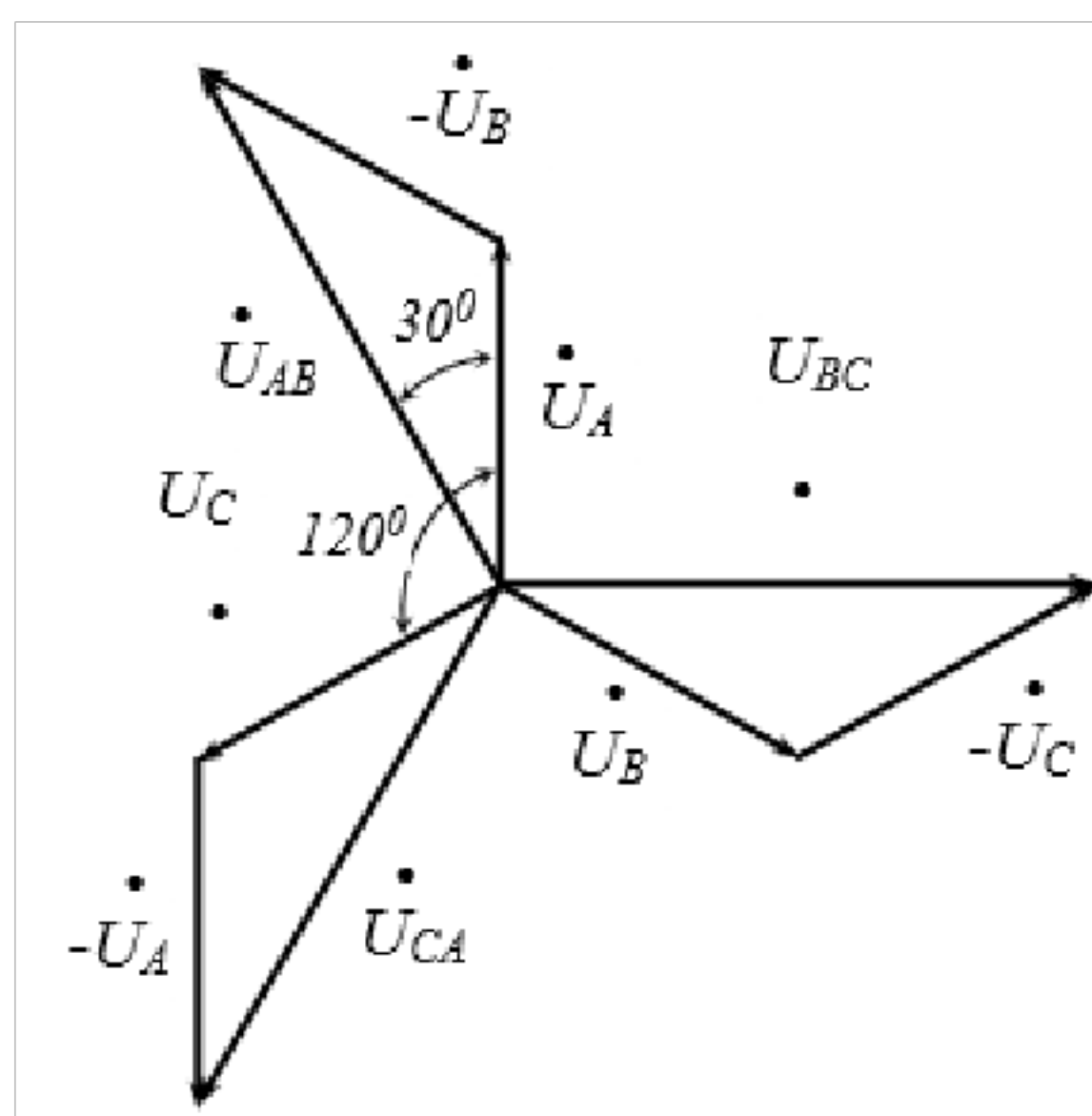


Рисунок 6.2 – Векторная диаграмма напряжений при соединении звездой

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

Наличие тока в нулевом проводе вызывает незначительное падение напряжения в нем, которым можно пренебречь и считать, что между нулевой точкой источника и приемника разность потенциалов отсутствует.

На рис. 6.2 показано графическое определение линейных напряжений с помощью векторной диаграммы. Отложим для произвольного момента времени комплексы фазных

напряжений, смещенные друг относительно друга на 120° .

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

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

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

Для получения линейных напряжений сложим геометрически векторы $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ с векторами $-\dot{U}_B$, $-\dot{U}_C$, $-\dot{U}_A$, которые равны соответственно $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$, $\dot{U}_A$, но противоположно направлены.

Векторная диаграмма линейных напряжений также может быть получена из векторной диаграммы фазных напряжений (рис. 6.3). Таким образом, звезда линейных напряжений опережает звезду фазных на 30° . Найдем соотношение между фазными и линейными напряжениями, учитывая, что все напряжения симметричны:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C = \dot{U}_\Phi$$

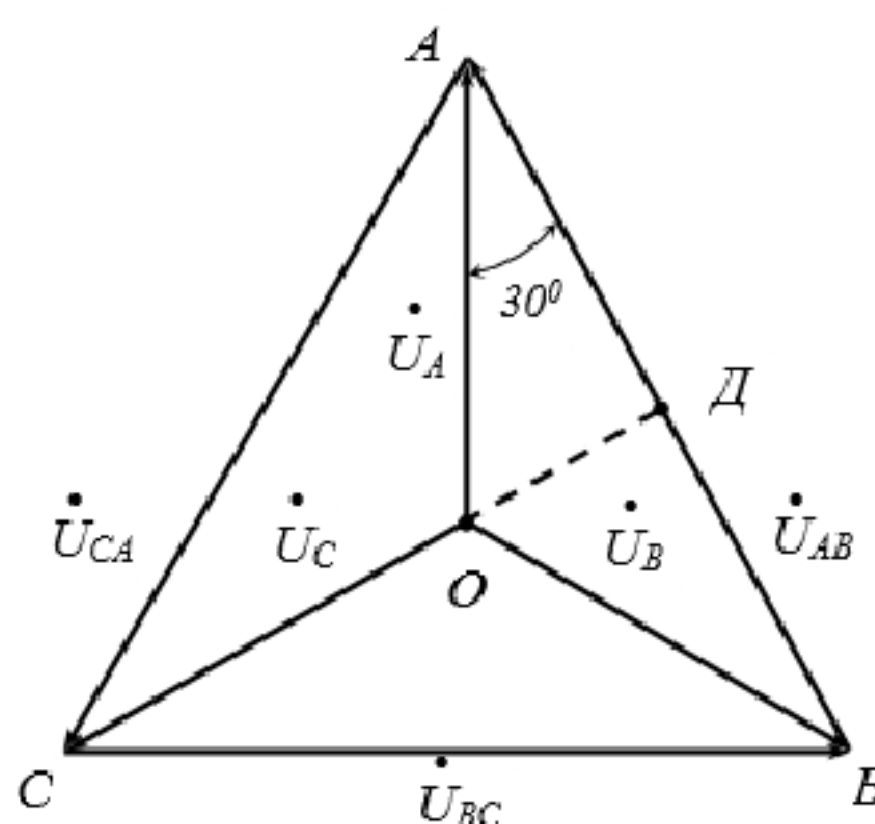


Рисунок 6.3 – Векторная диаграмма напряжений при соединении звездой
Из прямоугольного треугольника OAD имеем:

$$\begin{aligned} \frac{U_{\text{л}}}{2} &= \frac{U_{AB}}{2} = U_A \cdot \cos 30^\circ = \\ &= U_\Phi \cdot \cos 30^\circ = U_\Phi \frac{\sqrt{3}}{2} , \end{aligned}$$

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_\Phi$$

Фазные токи приемников определяются так же, как и в однофазных цепях:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{z_A} = \frac{\dot{U}_A}{\sqrt{r_A^2 + x_A^2}};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{z_B} = \frac{\dot{U}_B}{\sqrt{r_B^2 + x_B^2}};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{z_C} = \frac{\dot{U}_C}{\sqrt{r_C^2 + x_C^2}},$$

Углы сдвига между напряжениями и токами фаз можно определить из формул:

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{z_A}; \quad \cos \varphi_B = \frac{r_B}{z_B}; \quad \cos \varphi_C = \frac{r_C}{z_C}.$$

Если приемники обладают чисто активными сопротивлениями, то $z_A = r_A$, $z_B = r_B$, $z_C = r_C$, а углы сдвига между токами и напряжениями во всех трех фазах будут нулевыми.

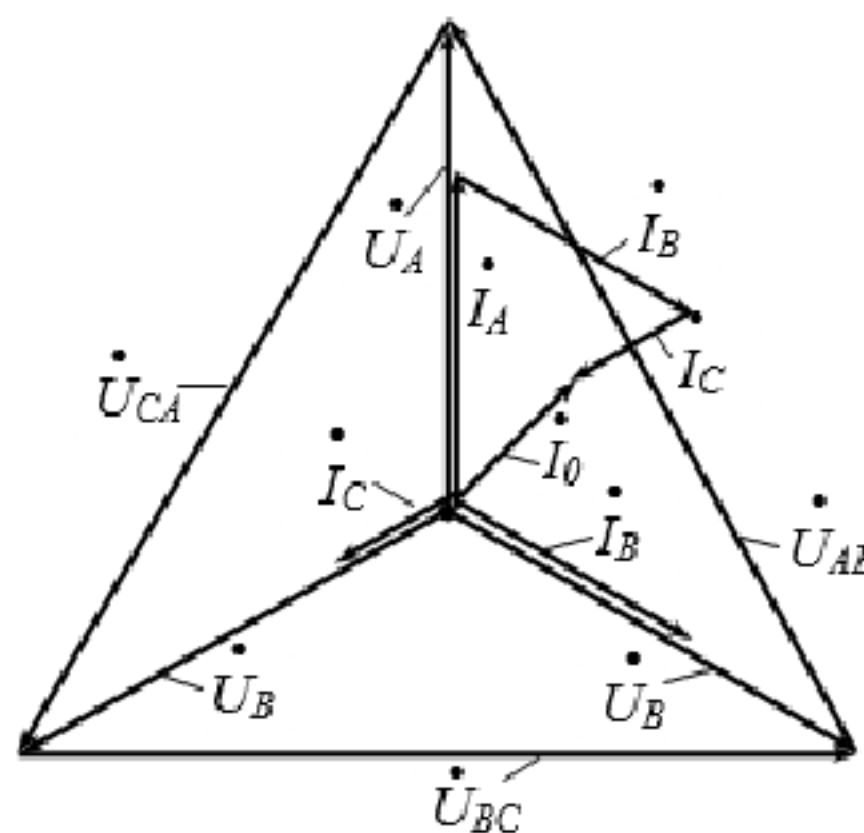
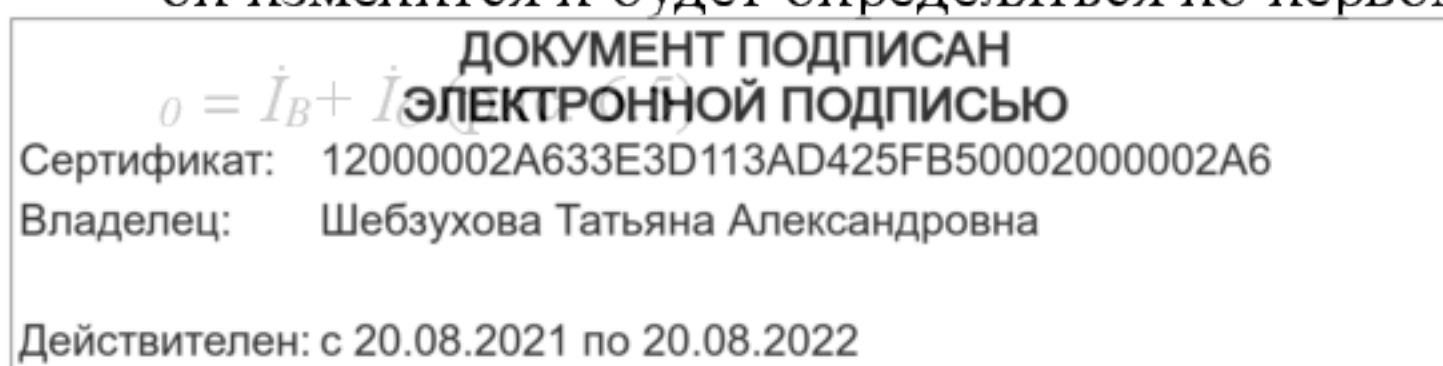


Рисунок 6.4 – Векторная диаграмма напряжений и токов четырехпроводной цепи при активной несимметричной нагрузке фаз

Ток нулевого провода $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$

Сечение нулевого провода зависит от степени несимметрии нагрузки фаз, но обычно его принимают равным 50% от сечения линейного провода.

При наличии нейтрали (нулевого провода) напряжения на фазах приемников остаются неизменными и равными фазным напряжениям источника даже при неравномерной нагрузке, если пренебречь сопротивлением проводов линии и нулевого провода. Предельным случаем неравномерной нагрузки фаз в четырехпроводной системе трехфазного приемника, включенного звездой, можно считать обрыв одной из фаз. Например, если фаза *A* будет оборвана, то не будет напряжения и тока у потребителя, включенного в эту фазу, а в оставшихся под напряжением фазах режим работы не изменится. Что касается нулевого провода, то если до обрыва одной из фаз ток был равен $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ (рис. 4.4), то теперь он изменится и будет определяться по первому закону Кирхгофа: $\dot{I}_0 + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, откуда $\dot{I}_0 = -\dot{I}_B - \dot{I}_C$.



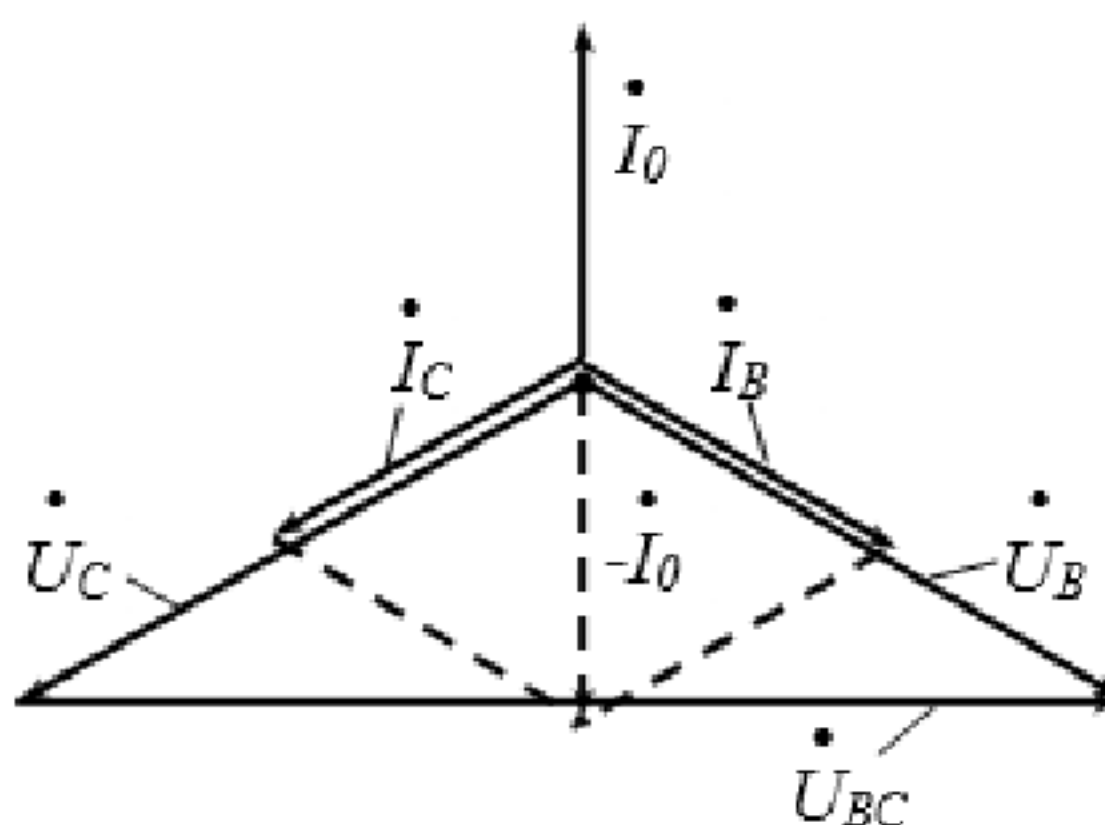


Рисунок 6.5 – Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве фазы А

При обрыве или отсутствии в схеме нулевого провода энергетические соотношения в этой цепи изменятся.

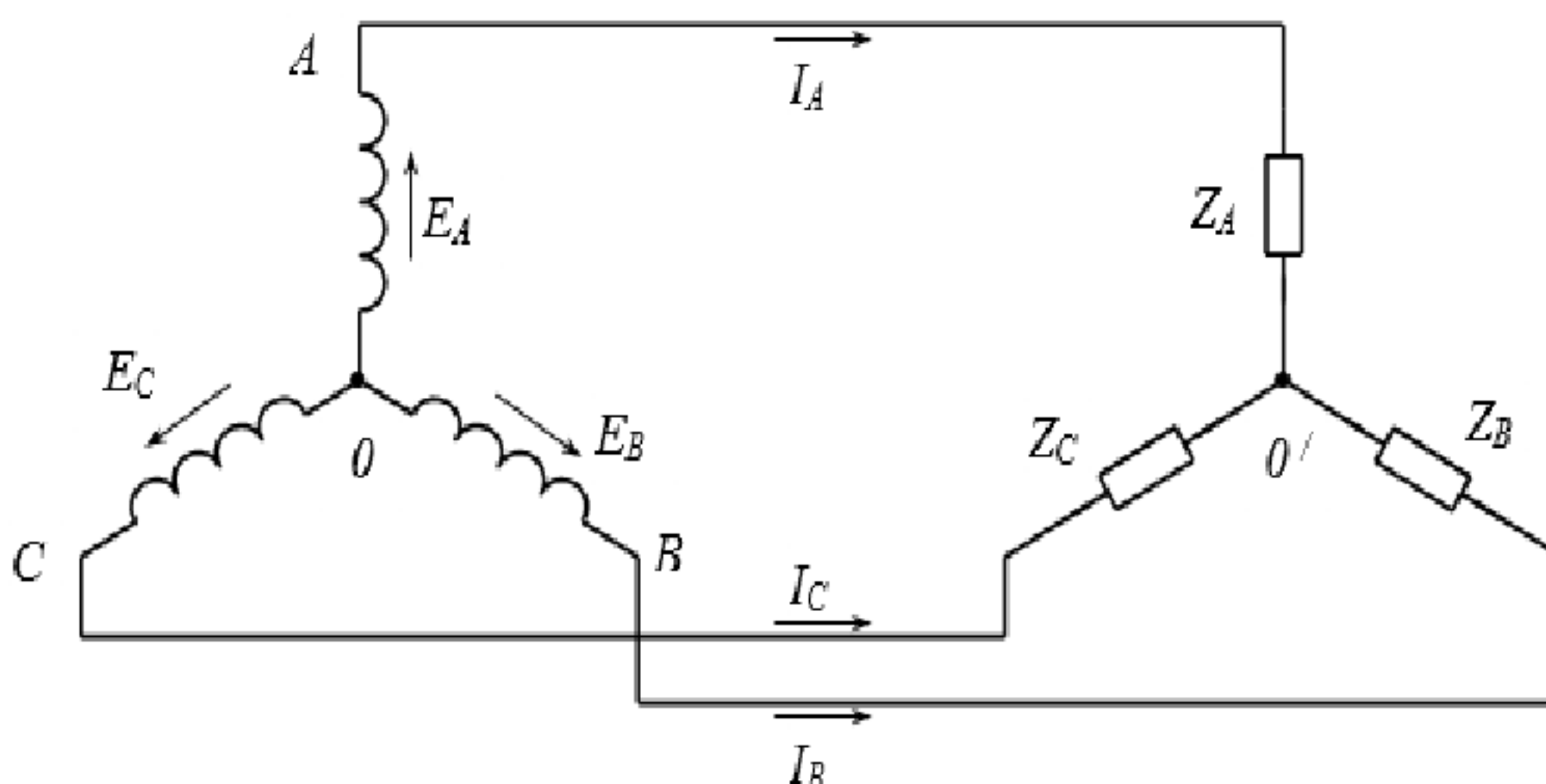


Рисунок 6.6 – Схема трехпроводной цепи трехфазного тока

При симметричной нагрузке в трехпроводной трехфазной системе (рис. 6.6) напряжение между нулевыми точками источника и приемника равно нулю и каждую фазу системы можно рассматривать как замкнутый контур.

При неравномерной нагрузке и отсутствии нулевого провода фазные напряжения будут изменяться прямо пропорционально сопротивлениям фаз. Если бы система была четырехпроводной, то по нулевому проводу протекал бы ток I_0 и таким образом практически выравнивались бы фазные напряжения. На рис. 4.7 изображена векторная диаграмма напряжений и токов при неравномерной нагрузке всех трех фаз и отсутствии нулевого провода.

Треугольник линейных напряжений остается таким же, а звезда фазных напряжений

и точка O' будут получены методом засечек из вершин линейных напряжений.

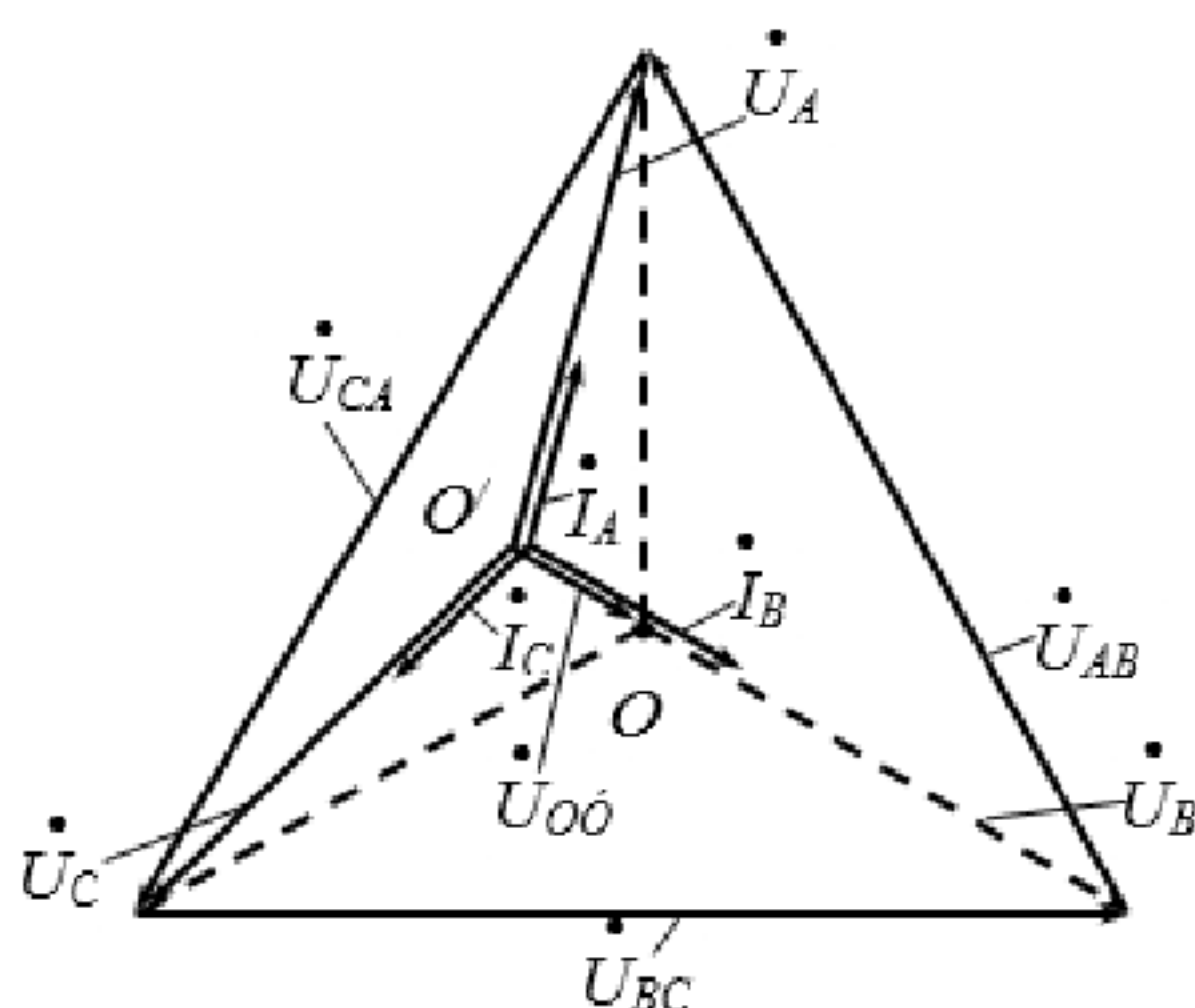


Рисунок 6.7 – Векторная диаграмма токов и напряжений при неравномерной нагрузке и отсутствие нулевого провода

Если одна из фаз, например, А, оборвется или все потребители этой фазы будут выключены, то при отсутствии нулевого провода оставшиеся под напряжением фазы В и С окажутся включенными последовательно. Фазные токи $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$, протекающие через последовательно включенные сопротивления приемника, в этом случае будут одинаковыми, а фазные напряжения будут пропорциональны сопротивлениям фаз (рис. 4.8). Поэтому на векторной диаграмме точка O' переместится на вектор линейного напряжения U_{BC} и будет делить его на части, равные фазным напряжениям U_B и U_C (в нашем случае $U_B = U_C$)

$$\dot{U}_C = \dot{U}_B = \frac{1}{2} \dot{U}_L = \frac{1}{2} \sqrt{3} \dot{U}_\phi = 0,87 \dot{U}_\phi$$

Напряжение фазы А возрастет:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{AB} \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_\phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,5 \dot{U}_\phi$$

Поэтому в четырехпроводных цепях на нулевой провод не ставят предохранитель, т.к. его перегорание изменяет распределение напряжений фаз.

При коротком замыкании какой-либо фазы, например, С, нулевая точка O' приобретает потенциал линейного провода ВС, а фазы А и В оказываются под линейным напряжением. Векторная диаграмма для этого случая представлена на рис. 6.9. Точка O' перемещается в точку С.

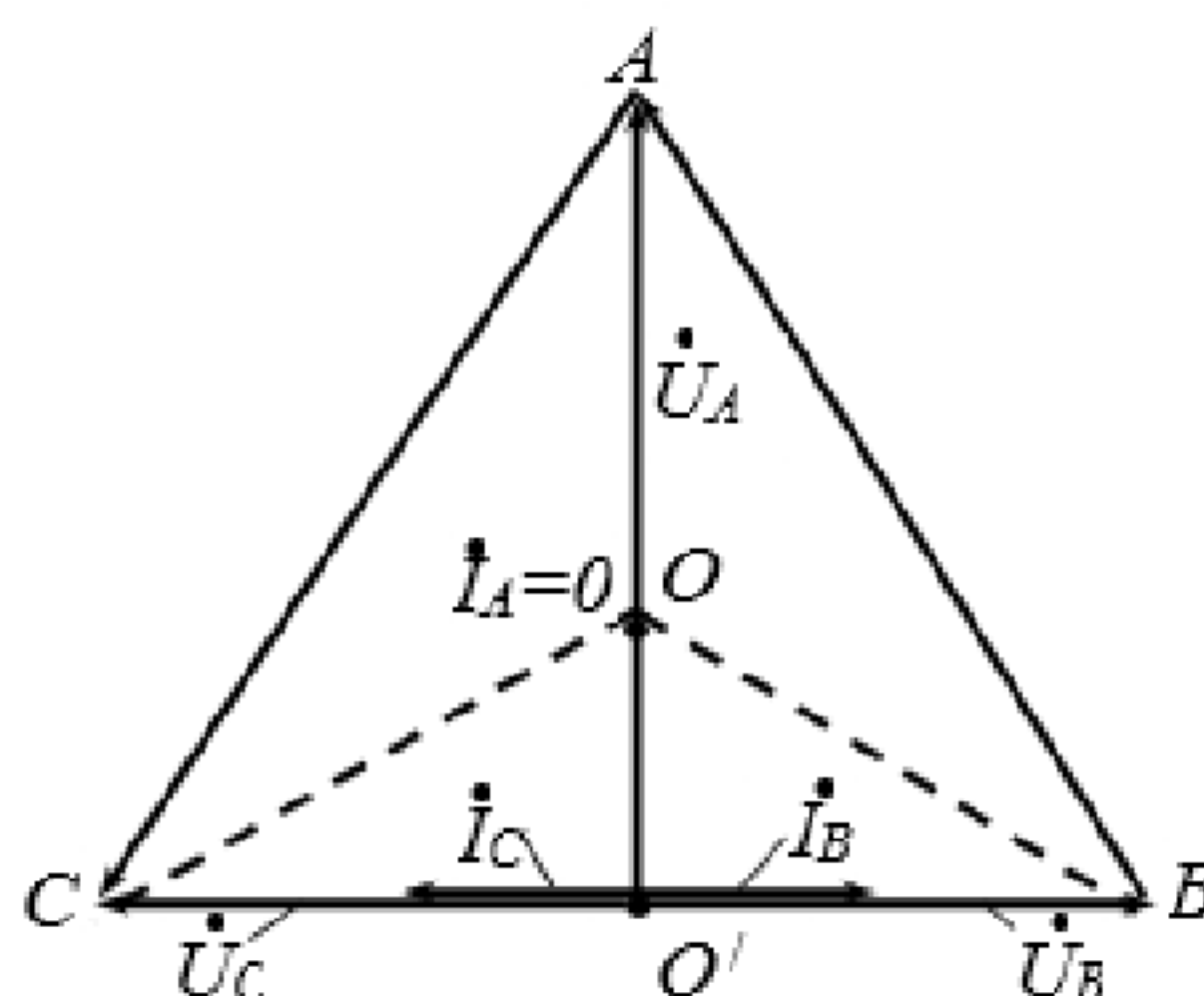


Рисунок 6.8 – Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве фазы в схеме без нулевого провода

Напряжения фаз A и B становятся равными линейным (рис. 4.9):

$$U_A = U_{CA} = U_L = U_\Phi \cdot \sqrt{3},$$

$$U_B = U_{BC} = U_L = U_\Phi \cdot \sqrt{3},$$

$$U_C = 0.$$

Ток короткого замыкания фазы C распределяется на фазы B и A, т.е. $I_C = I_K = -(I_A + I_B)$. Таким образом, две фазы приемника оказываются под линейным напряжением, на которое они не рассчитаны, и они могут выйти из строя.

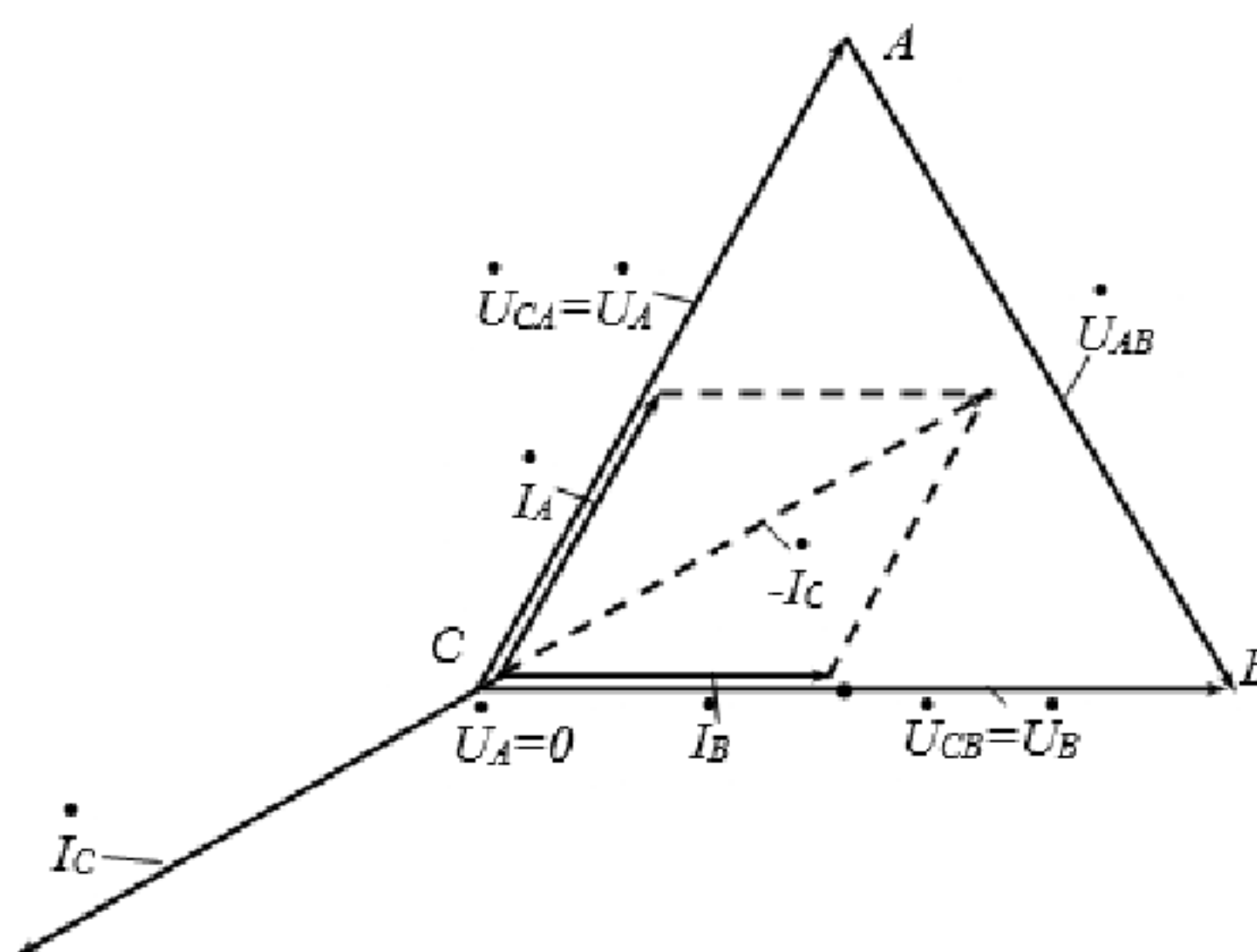


Рисунок 6.9 – Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве фазы C приемника трёхпроводной системе

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
В цепи трехфазного тока активная мощность равна сумме активных мощностей фаз:
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

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

Для измерения мощности в четырёхпроводной цепи можно использовать три однофазных ваттметра, суммируя их показания, или использовать однофазный ваттметр с переключением его поочередно во все три фазы. Этот метод может быть использован как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

Расчёт симметричных трёхфазных цепей сводится по сути к расчёту одной фазы по однолинейной эквивалентной схеме. В двух других фазах будут такие же по величине токи и напряжения, как в первой, но сдвинуты по фазе относительно них на угол 120° .

Задания:

Задание №1

К симметричной трёхфазной цепи с напряжением $U = 380 \text{ В}$ подключен симметричный приёмник, фазы которого соединены в «звезду», сопротивления фаз $r = 12 \text{ Ом}$, $x = 16 \text{ Ом}$.

Найти показания приборов, построить векторную диаграмму цепи.

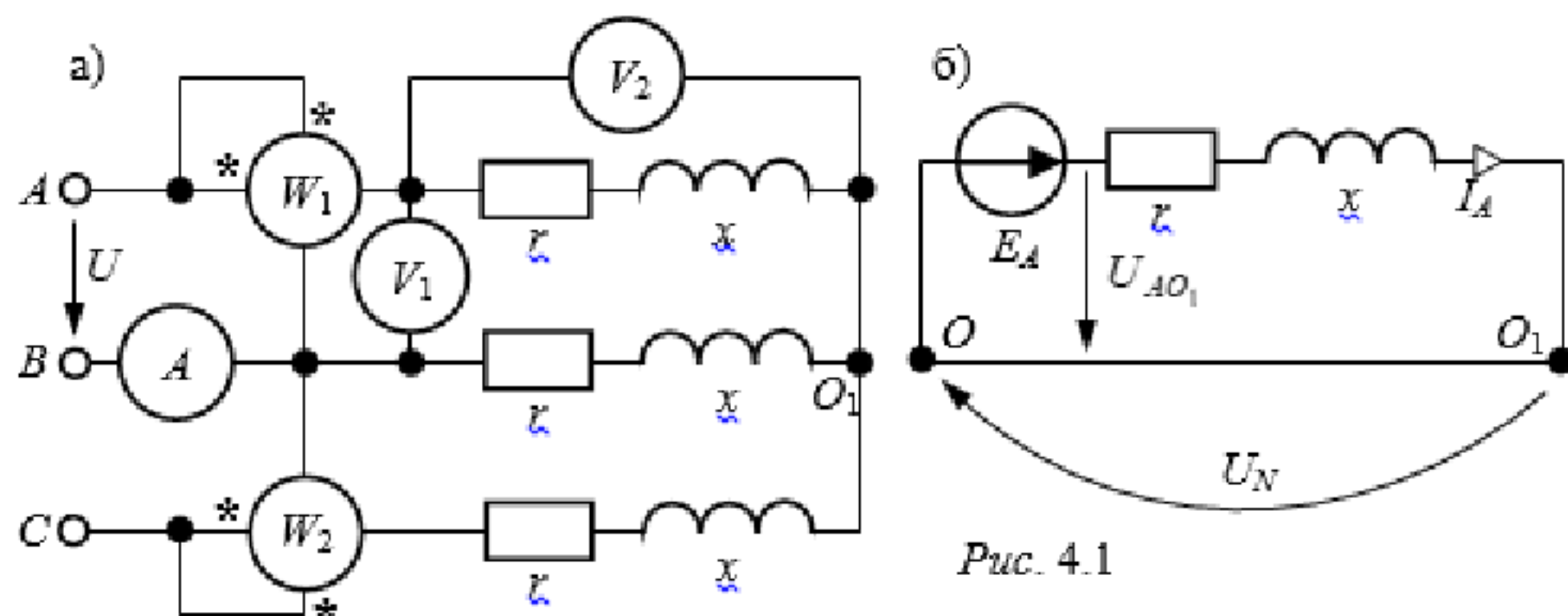


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Рассчитать симметричный режим соединения в звезду, если $r = 40 \text{ Ом}$, $x = 80 \text{ Ом}$, напряжение сети $U = 380 \text{ В}$. Построить векторную диаграмму цепи.

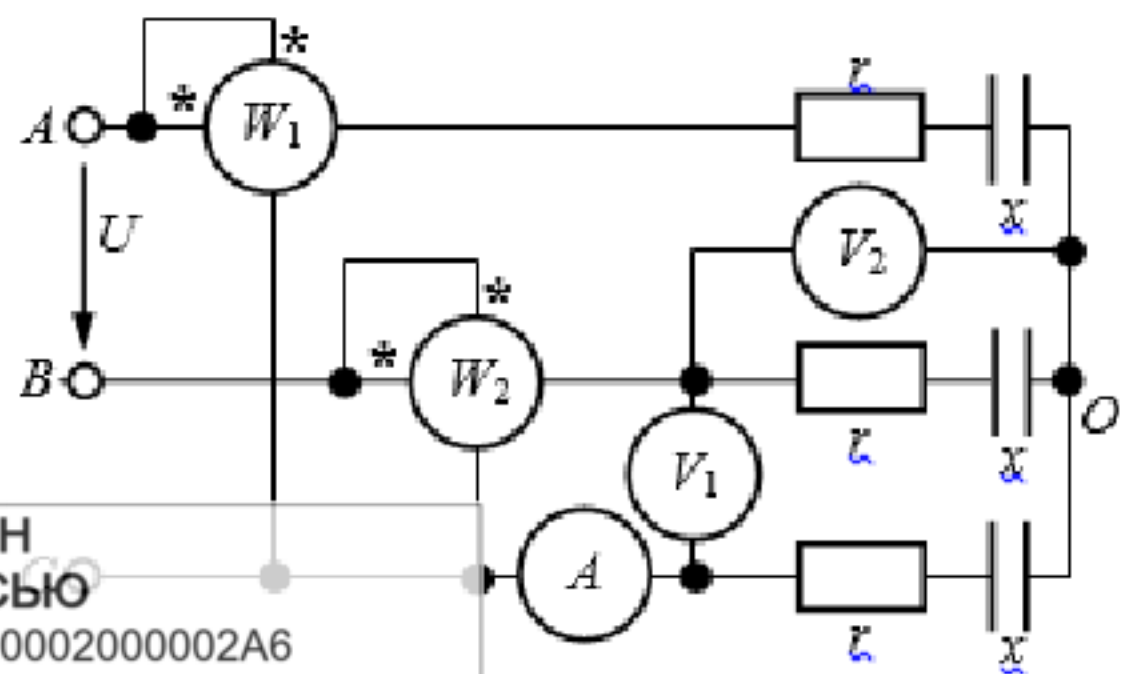


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Задание №3

К источнику с линейным напряжением $U = 660 \text{ В}$ через реакторы с сопротивлением $x_0 = 25 \text{ Ом}$ подключены: электродвигатель, каждая фаза которого имеет сопротивление $r = x = 50 \text{ Ом}$ при соединении звездой; трёхфазный масляный конденсатор, используемый для повышения коэффициента мощности установки, фазы которого соединены в треугольник и имеют сопротивление $x_C = 300 \text{ Ом}$.

Определить напряжение на зажимах двигателя и его мощность. Найти потерю напряжения.

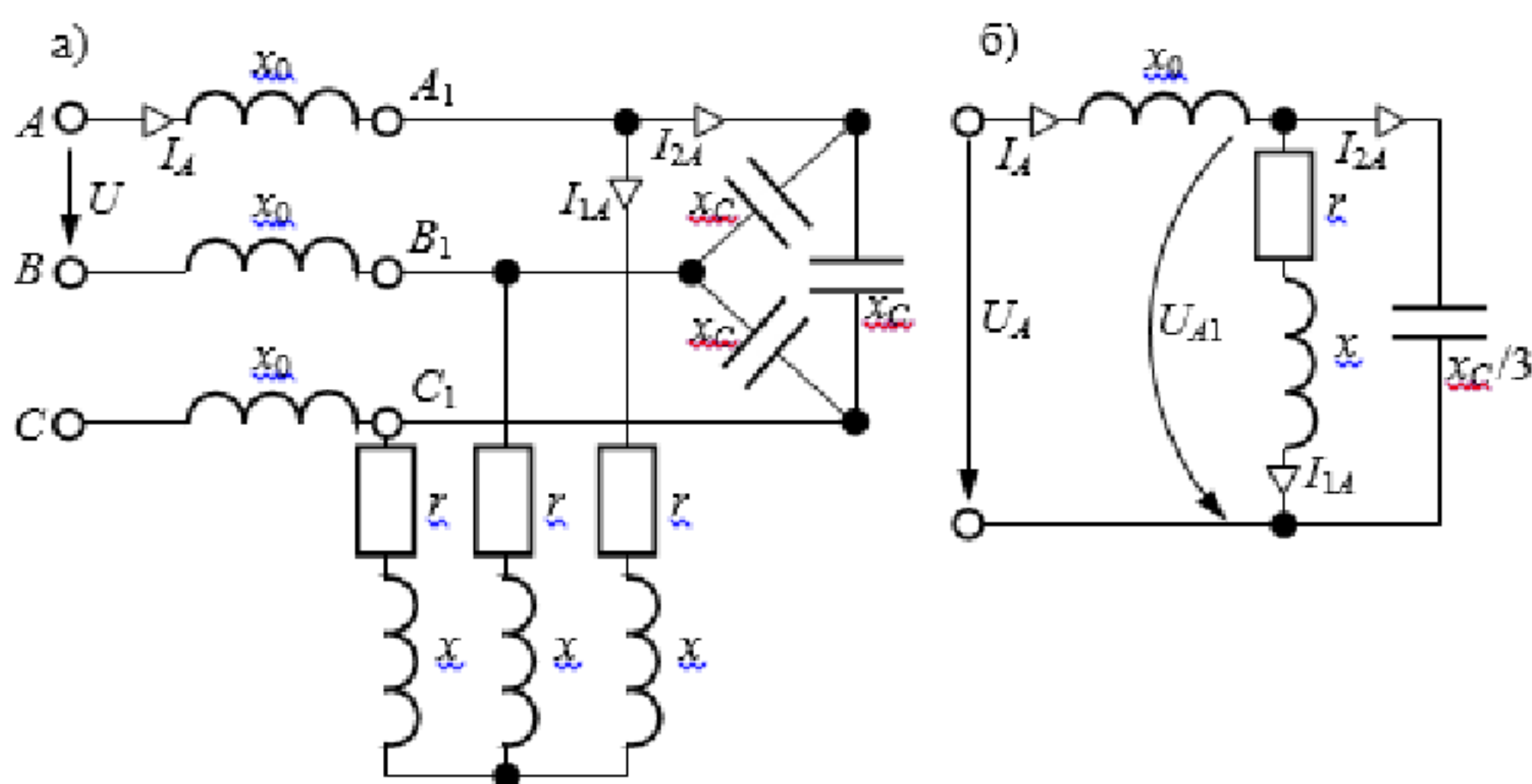


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

Напряжение симметричной трёхфазной сети $U = 380 \text{ В}$. Параметры приведенной схемы $\underline{Z}_1 = 1,5 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2 = 1 + j2 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_3 = -j6 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_4 = 21 + j12 \text{ Ом}$. Определить линейные и фазные токи приёмников. Найти линейные и фазные напряжения каждого приёмника.

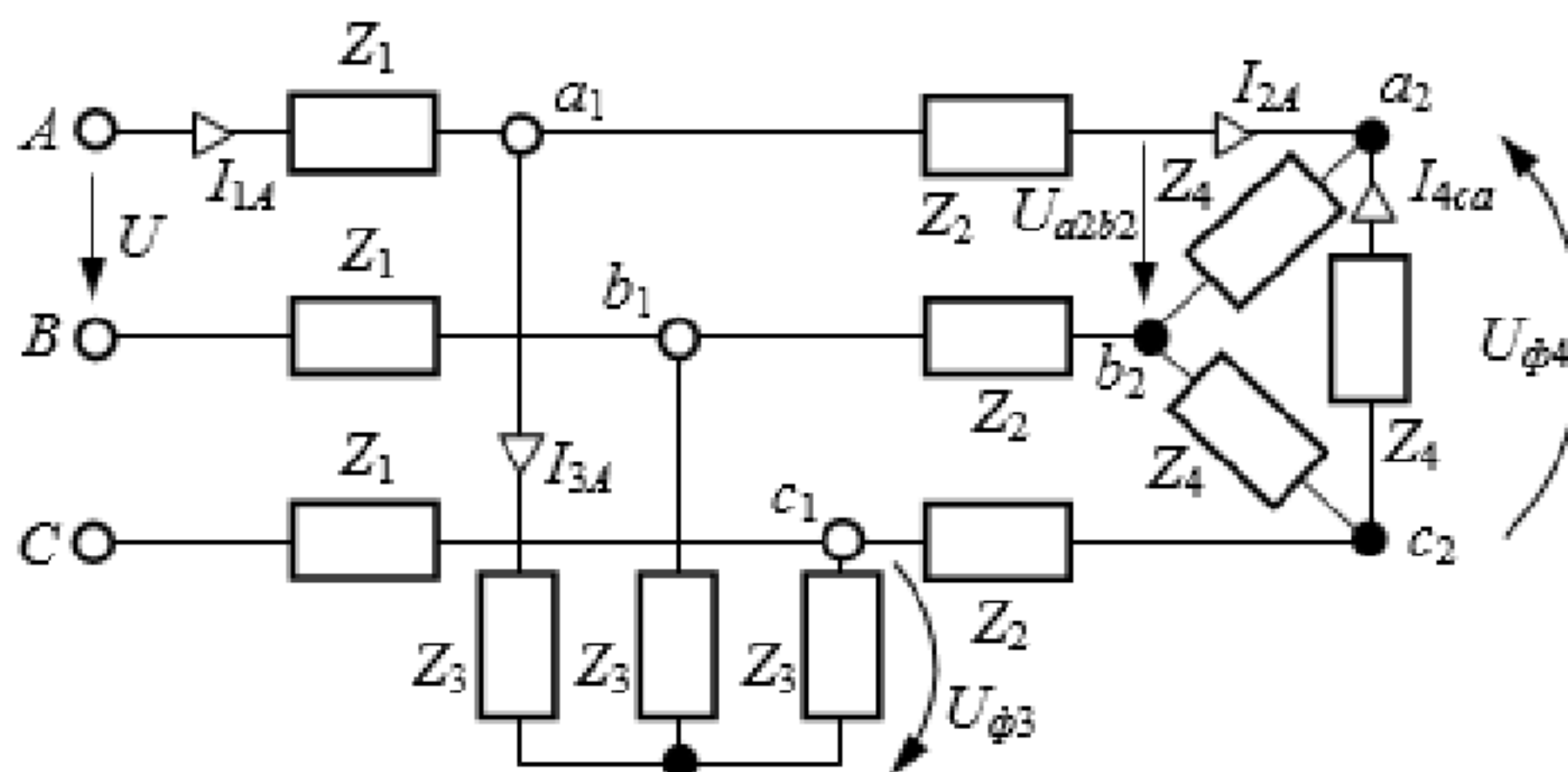


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Что означает симметричный трехфазный источник электрической энергии?
2. Что означает несимметричный трехфазный источник?
3. Перечислите способы соединения обмоток трехфазного источника.
4. Что такое нейтральный провод?
5. Какое напряжение называется фазным, линейным?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Практическая работа №11. Расчет несимметричных трехфазных цепей

Цель: Получить навыки расчета трехфазных цепей синусоидального тока при несимметричной нагрузке.

Основы теории:

Теория трёхфазных систем начинается с введения понятий: симметричные системы ЭДС, напряжений, токов; несимметричные системы ЭДС, напряжений, токов.

Краткий перечень названий ЭДС, напряжений, токов следующий:

- фазные ЭДС E_A, E_B, E_C соответствующих фаз генератора AX, BY, CZ ;
- фазные токи I_{AX}, I_{BY}, I_{CZ} ;
- фазные напряжения U_{AX}, U_{BY}, U_{CZ} ;
- линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ;
- линейные токи I_A, I_B, I_C ;
- ток нейтрали (нулевого провода) I_N ;
- напряжение смещения нейтрали U_N или U_{O_1O} (между нулевыми точками генератора и приёмника).

Соответственно, различают активные, реактивные, полные мощности фаз P_A, P_B, P_C , Q_A, Q_B, Q_C , S_A, S_B, S_C , а также активную P , реактивную Q и полную S мощности трёхфазных приёмников (или генератора), причём

$$P = P_A + P_B + P_C, \text{ Вт}; \quad Q = Q_A + Q_B + Q_C, \text{ вар}; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ ВА}.$$

Трёхфазные цепи со *статической нагрузкой*, то есть не содержащие электродвигателей, трансформаторов и других активных элементов рассчитываются, как правило, комплексным методом. Их расчёт обычно сопровождается построением векторных или топографических диаграмм, которые предостерегают от возможных ошибок аналитических расчётов, делают все соотношения более наглядными.

Если в трёхфазной системе имеются устройства, сопротивления фаз которых зависят от системы токов (трёхфазные трёхстержневые трансформаторы, асинхронные или синхронные электродвигатели или генераторы, или хотя бы одно из таких устройств, мощность которого соизмерима с мощностью всей трёхфазной системы), то для расчёта несимметричного режима таких трёхфазных цепей применяют специальный метод расчёта – *метод сим-*

метричный документ подписан электронной подписью

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Задания:

Задание №1

Рассчитать токи несимметричного треугольника, построить векторную диаграмму, если $U = 380 \text{ В}$, $r = x_C = 100 \text{ Ом}$, $x_L = 100\sqrt{2} \text{ Ом}$. Найти показания ваттметров, сравнить их с активной мощностью несимметричного трёхфазного приёмника.

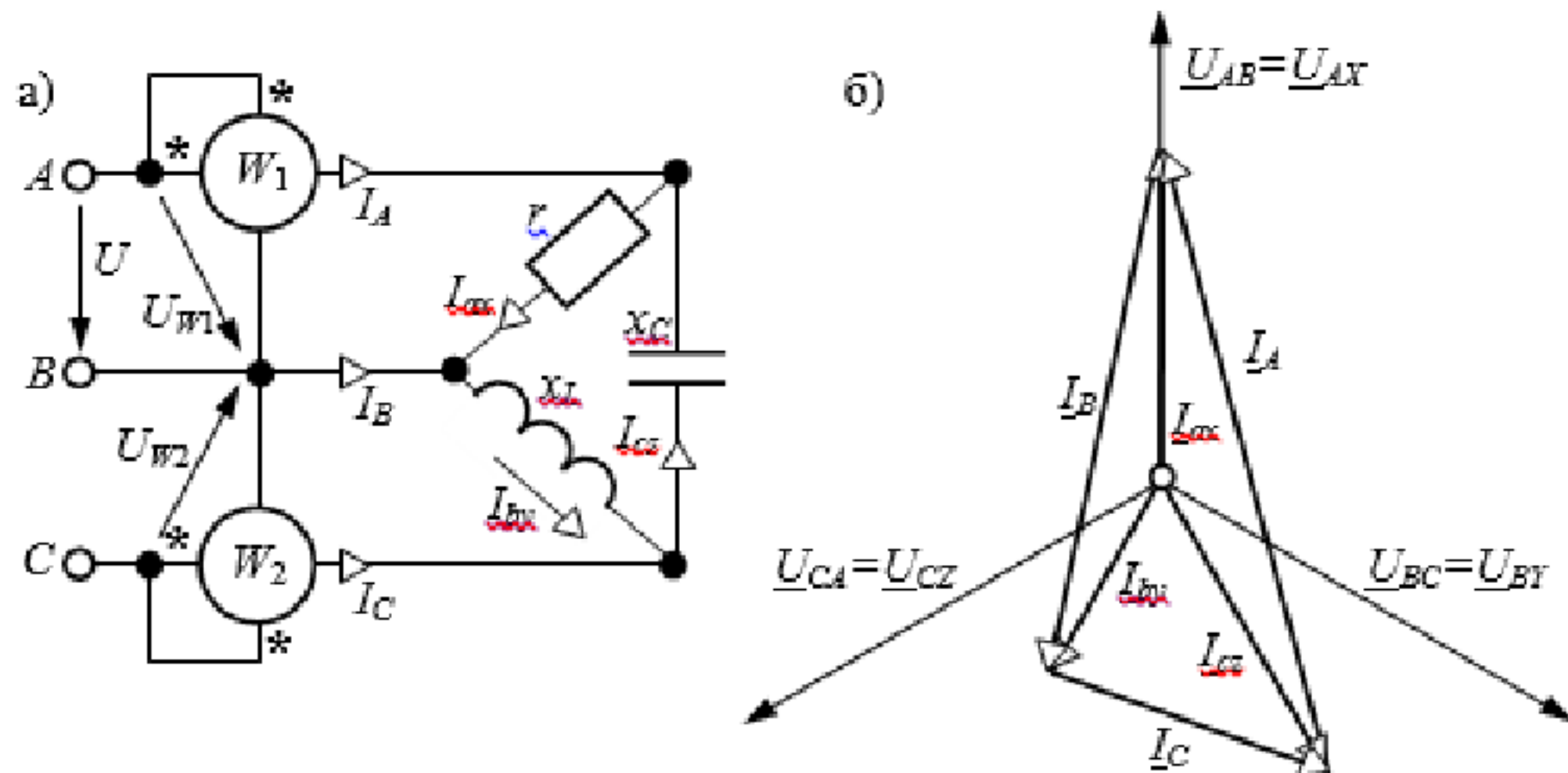


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Схема питается от симметричного источника, фазы которого соединены в треугольник. Считая источник питания идеальным, фазную ЭДС $E_{AX} = 380 \text{ В}$, найти фазные токи генератора.

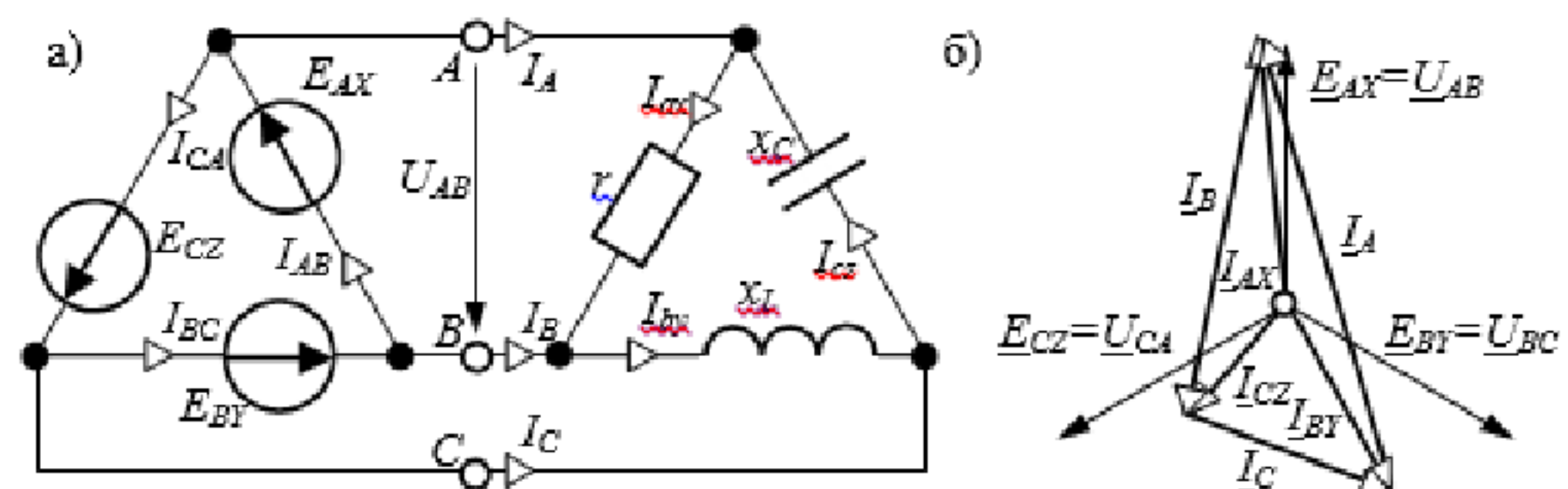


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

Трёхфазная цепь подключена к симметричному генератору с напряжением $U = 660 \text{ В}$.

Параметры цепи $r = \omega L = \frac{1}{\omega C} = 10 \text{ Ом}$, $r_1 = \omega L_1 = 5 \text{ Ом}$.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рассчитать токи и фазные токи всех участков цепи.

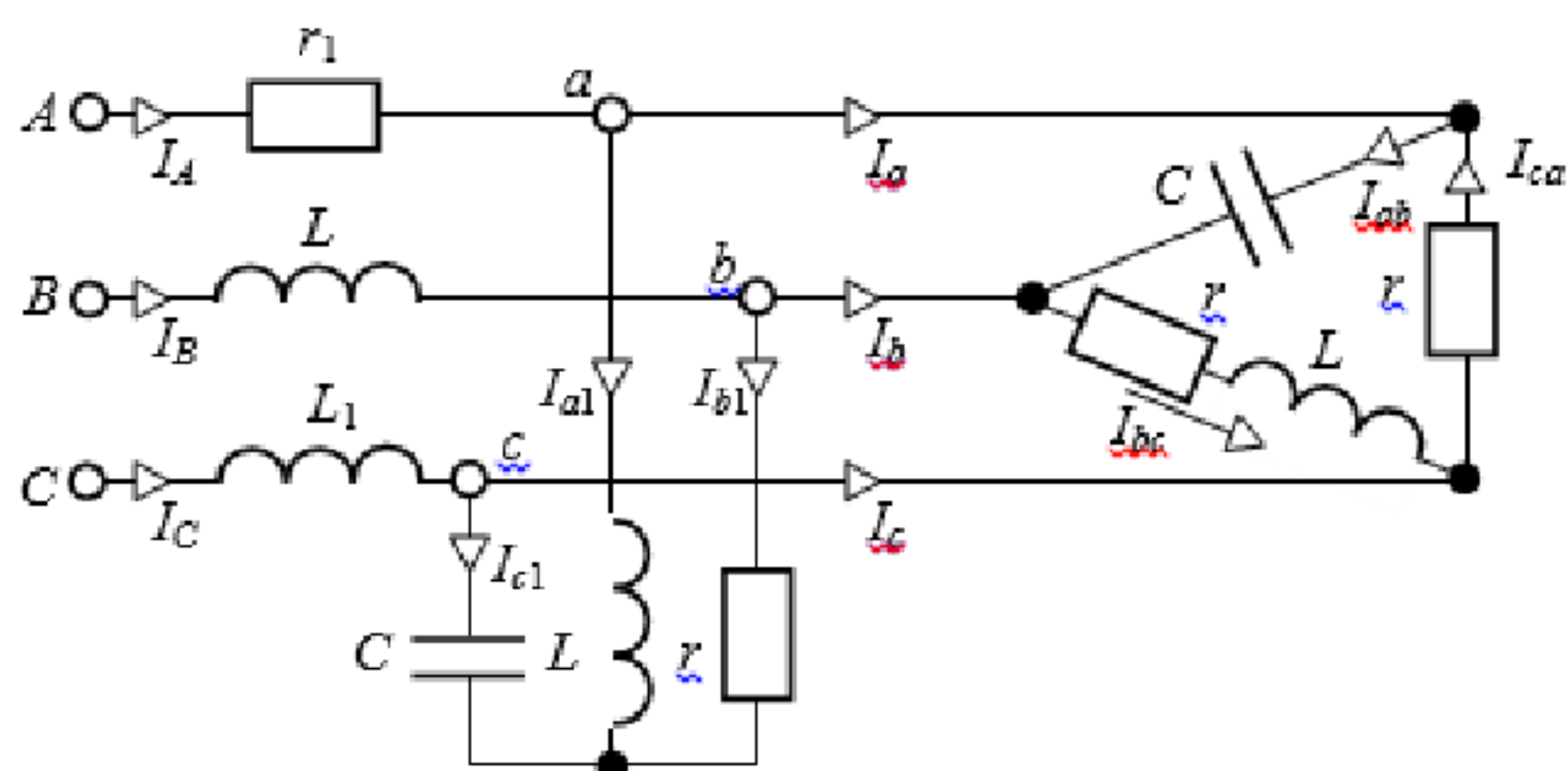


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

В схеме определить токи во всех ветвях, если показания вольтметров: $U_1 = 220 \text{ В}$, $U_2 = 127 \text{ В}$, $U_3 = 191,3 \text{ В}$, а $Z_1 = 3 + j4 \text{ Ом}$, $R = 20 \text{ Ом}$, $x_L = 30 \text{ Ом}$, $x_M = 25 \text{ Ом}$, $x_C = 40 \text{ Ом}$. Рассчитать показания ваттметров и сравнить их с тепловыми потерями в треугольнике нагрузки

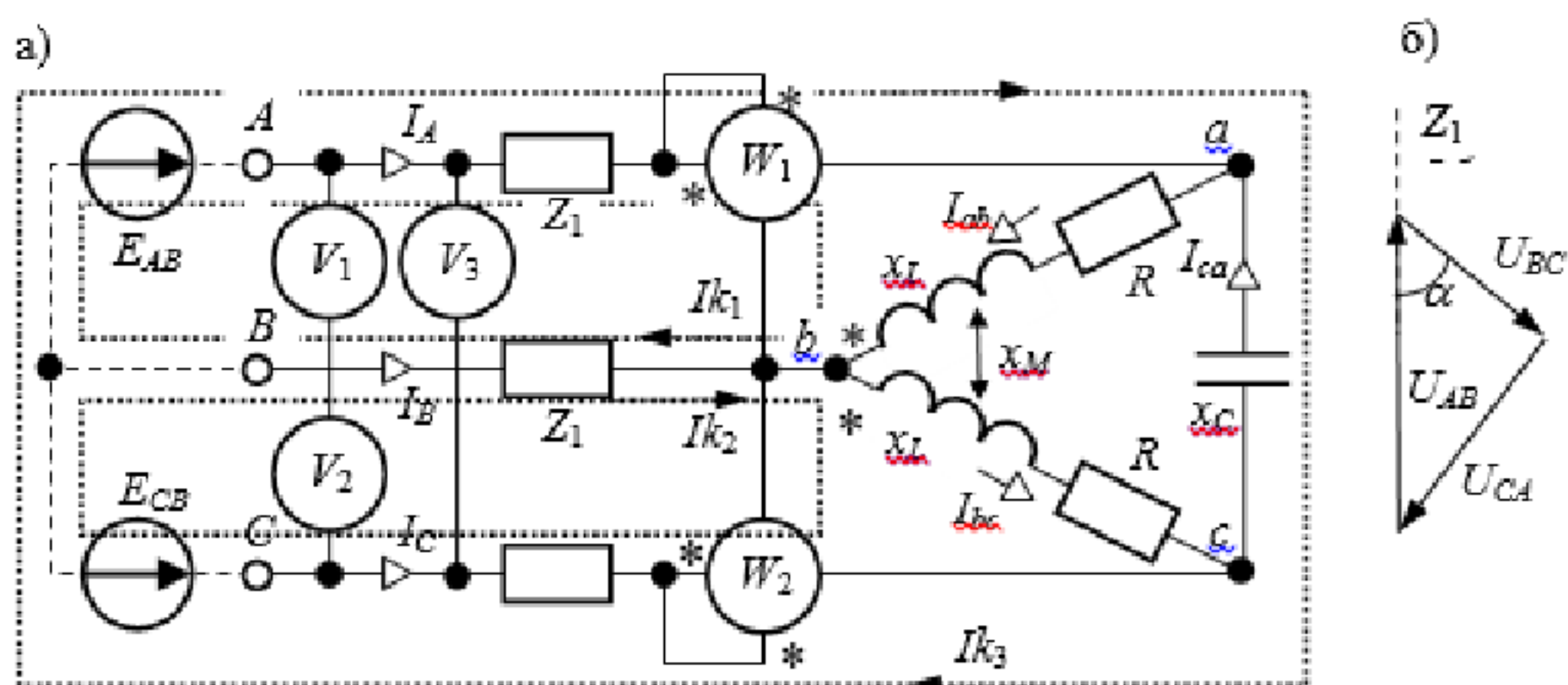


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Что означает симметричная и несимметричная нагрузка?
2. Что такое напряжение смещения нейтрали?
3. Как определить ток в нейтральном проводе при симметричной нагрузке?
7. Чему равна мощность трехфазной системы в симметричном режиме?
5. Что такое одно-, двух- и трехфазное короткое замыкание?

Практическая работа №12. Расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих

Цель: Освоить навыки применения расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих

Основы теории:

Сущность метода заключается в представлении несимметричной системы величин $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$ в виде суммы трёх симметричных систем: прямой $\underline{A}_1$, $\underline{B}_1$, $\underline{C}_1$, имеющей такую же последовательность, как и исходные величины, обратной $\underline{A}_2$, $\underline{B}_2$, $\underline{C}_2$, имеющей противоположную последовательность, и нулевой последовательности, состоящей из трёх одинаковых по величине и направлению векторов $\underline{A}_0$.

Определение симметричных составляющих производится по формулам:

$$\underline{A}_0 = \frac{1}{3} (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}), \quad \underline{A}_1 = \frac{1}{3} (\underline{A} + a \cdot \underline{B} + a^2 \cdot \underline{C}), \quad \underline{A}_2 = \frac{1}{3} (\underline{A} + a^2 \cdot \underline{B} + a \cdot \underline{C}),$$

где $a = e^{j120^\circ}$ – фазный множитель.

Сопротивления приёмника токам различных последовательностей называются сопротивлением прямой последовательности $\underline{Z}_1$, обратной последовательности $\underline{Z}_2$ и нулевой последовательности $\underline{Z}_0$. Для схемы Y–Y они имеют значения

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}, \quad \underline{Z}_0 = \underline{Z} + 3\underline{Z}_N,$$

где $\underline{Z}$ – сопротивление фазы приёмника, $\underline{Z}_N$ – сопротивление нейтрали.

Для асинхронного двигателя характерно такое соотношение:

$$\underline{Z}_1 \gg \underline{Z}_0 \gg \underline{Z}_2.$$

Расчёт симметричных цепей с несимметричным источником состоит из трёх этапов: разложение заданной несимметричной системы на симметричные составляющие; расчёт токов каждой из последовательностей в отдельности; суммирование токов всех последовательностей.

Расчёт аварийных режимов (КЗ, обрыв фазы) симметричных цепей производится следующим образом: в месте аварии вводятся системы трёх несимметричных напряжений $\underline{U}_A$ – $\underline{U}_B$ – $\underline{U}_C$ и трёх несимметричных токов $\underline{I}_A$ – $\underline{I}_B$ – $\underline{I}_C$. Каждая из этих систем раскладывается на симметричные составляющие $\underline{U}_1$ – $\underline{U}_2$ – $\underline{U}_0$, $\underline{I}_1$ – $\underline{I}_2$ – $\underline{I}_0$. Далее рассматриваются схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей, для каждой из которых составляются уравнения,

связывающие $\underline{U}_0$ с $\underline{I}_0$. Еще три уравнения составляются для аварийного режима. Решение этих уравнений даёт $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$, $\underline{U}_0$, $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, $\underline{I}_0$, через которые могут быть определены все интересующие нас величины.

Задания:

Задание №1

Две фазы генератора замкнуты накоротко (рис. 4.39). Его сопротивления прямой последовательности $\underline{Z}_1 = j8 \text{ Ом}$, обратной последовательности $\underline{Z}_2 = j2 \text{ Ом}$, фазная ЭДС $E = 100 \text{ В}$. Определить показания приборов.

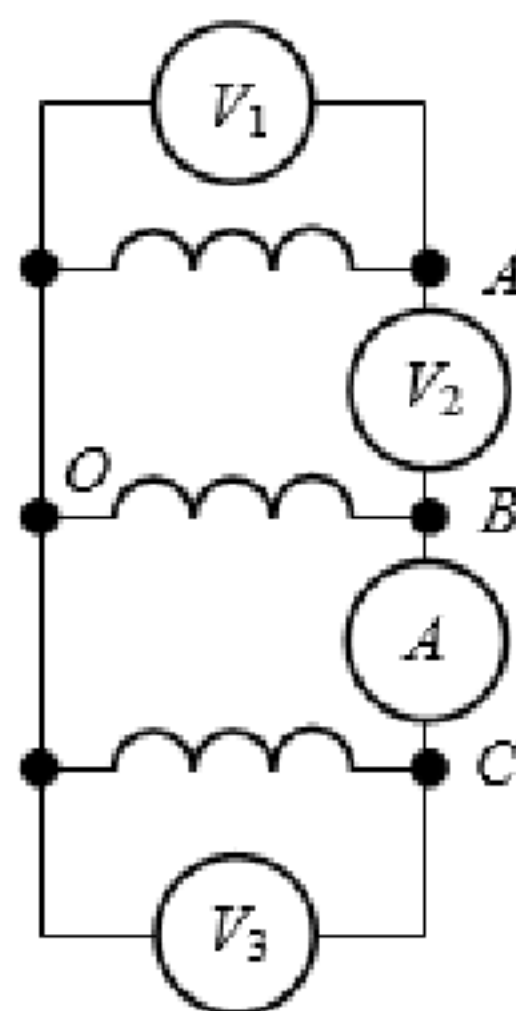
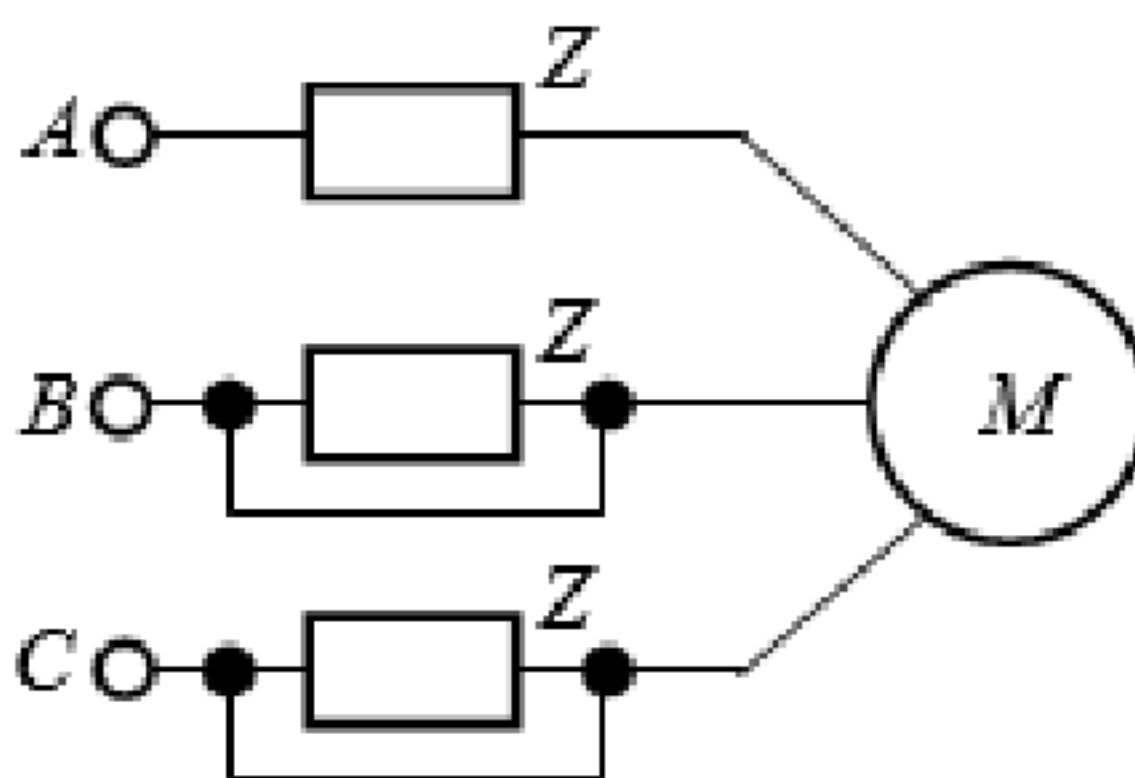


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Для ограничения пусковых токов двигателя М (номинальное линейное напряжение $U = 380 \text{ В}$, сопротивления прямой и обратной последовательности, соответственно, $\underline{Z}_1 = 1 + j22 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2 = 1 + j8 \text{ Ом}$) последовательно с ним включаются три сопротивления (реакторы) $\underline{Z} = j20 \text{ Ом}$, которые после пуска закорачиваются.

Вследствие неисправности выключателя одно из сопротивлений после пуска осталось включенным (рис. 4.40). Определить отношение токов I_2/I_1 (обратной и прямой последовательностей).



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

Генератор с сопротивлениями для разных последовательностей $Z_{Г1} = j8 \text{ Ом}$, $Z_{Г2} = j2 \text{ Ом}$, $Z_{Г0} = j0,5 \text{ Ом}$, обмотки которого соединены в звезду с нейтралью, заземлённой через сопротивление $Z_{ЗГ} = 1 + j2 \text{ Ом}$, вырабатывает фазные напряжения $U_{\Phi} = 220 \text{ В}$, которые образуют симметричную трёхфазную систему, и питает через линию с сопротивлениями $Z_{Л1} = Z_{Л2} = 1 + j2 \text{ Ом}$, $Z_{Л0} = 1 + j4 \text{ Ом}$ синхронный двигатель, обмотки которого имеют сопротивления $Z_{Д1} = j12 \text{ Ом}$, $Z_{Д2} = j4 \text{ Ом}$, $Z_{Д0} = j1 \text{ Ом}$, соединены в звезду, нейтраль которой заземлена через сопротивление $Z_{ЗД} = 2 + j1 \text{ Ом}$ (рис. 4.41).

Определить ток линии в симметричном режиме, токи проводов B и C при обрыве провода A и напряжение в месте обрыва

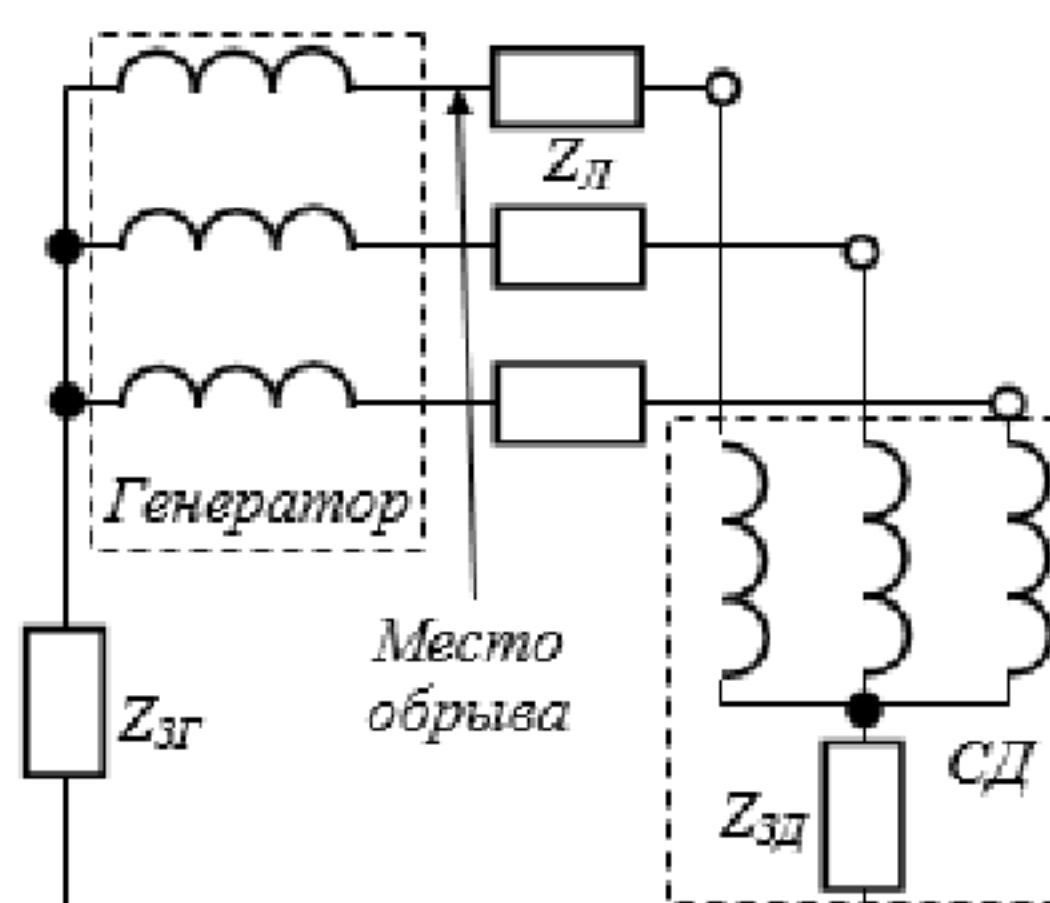


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

В конце линии (рис. 4.44) фаза A замкнулась на землю. Фазная ЭДС генератора $E = 20 \text{ кВ}$, сопротивления различных последовательностей: генератора $Z_{Г1} = j9 \text{ Ом}$, $Z_{Г2} = j1 \text{ Ом}$, $Z_{Г0} = j0,5 \text{ Ом}$; линии $Z_{Л1} = Z_{Л2} = j1 \text{ Ом}$, $Z_{Л0} = j2 \text{ Ом}$; нагрузки $Z_{НГ1} = j10 \text{ Ом}$, $Z_{НГ2} = j2 \text{ Ом}$; сопротивление заземления нулевой точки генератора $Z_N = j0,5 \text{ Ом}$. Определить:

- 1) токи во всех фазах генератора и нагрузки;
- 2) напряжения по отношению к земле зажимов генератора и нагрузки.

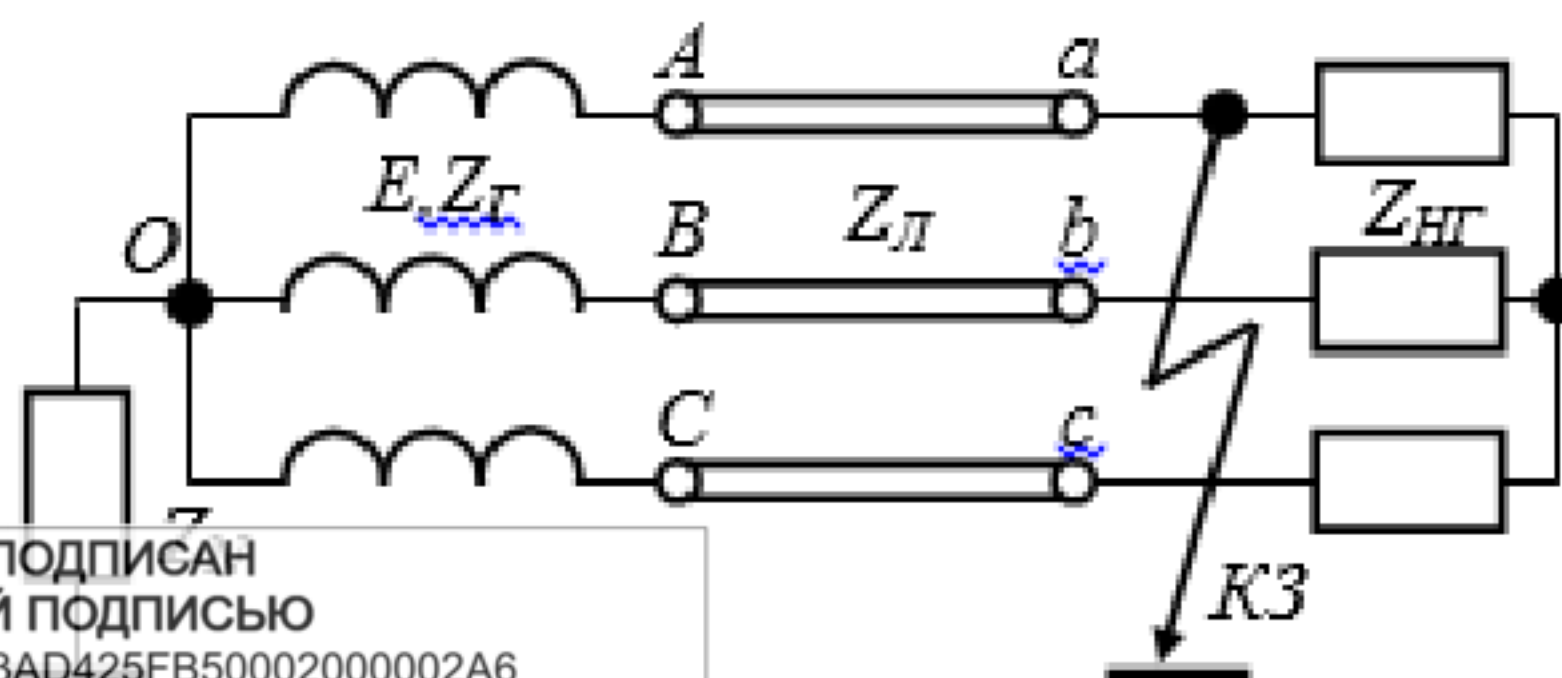


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Задание №5

От симметричного трёхфазного генератора питаются асинхронный и синхронный двигатели. Фазная ЭДС генератора $E = 220 \text{ В}$, сопротивления различных последовательностей: генератора $\underline{Z}_{G1} = j0,6 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{G2} = j0,1 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{G0} = j0,05 \text{ Ом}$; асинхронного двигателя $\underline{Z}_{Д1} = 3 + j0,4 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{Д2} = 0,05 + j0,1 \text{ Ом}$; синхронного двигателя $\underline{Z}_{C1} = 4 + j0,5 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{C2} = 0,1 + j0,2 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{C0} = 0,1 + j0,1 \text{ Ом}$; сопротивление заземления нулевой точки генератора и синхронного двигателя – $\underline{Z}_{NG} = \underline{Z}_{NC} = 0,1 \text{ Ом}$. Определить: токи двухфазного на землю металлического замыкания проводов B и C , суммарный ток короткого замыкания, напряжение на здоровой фазе A .

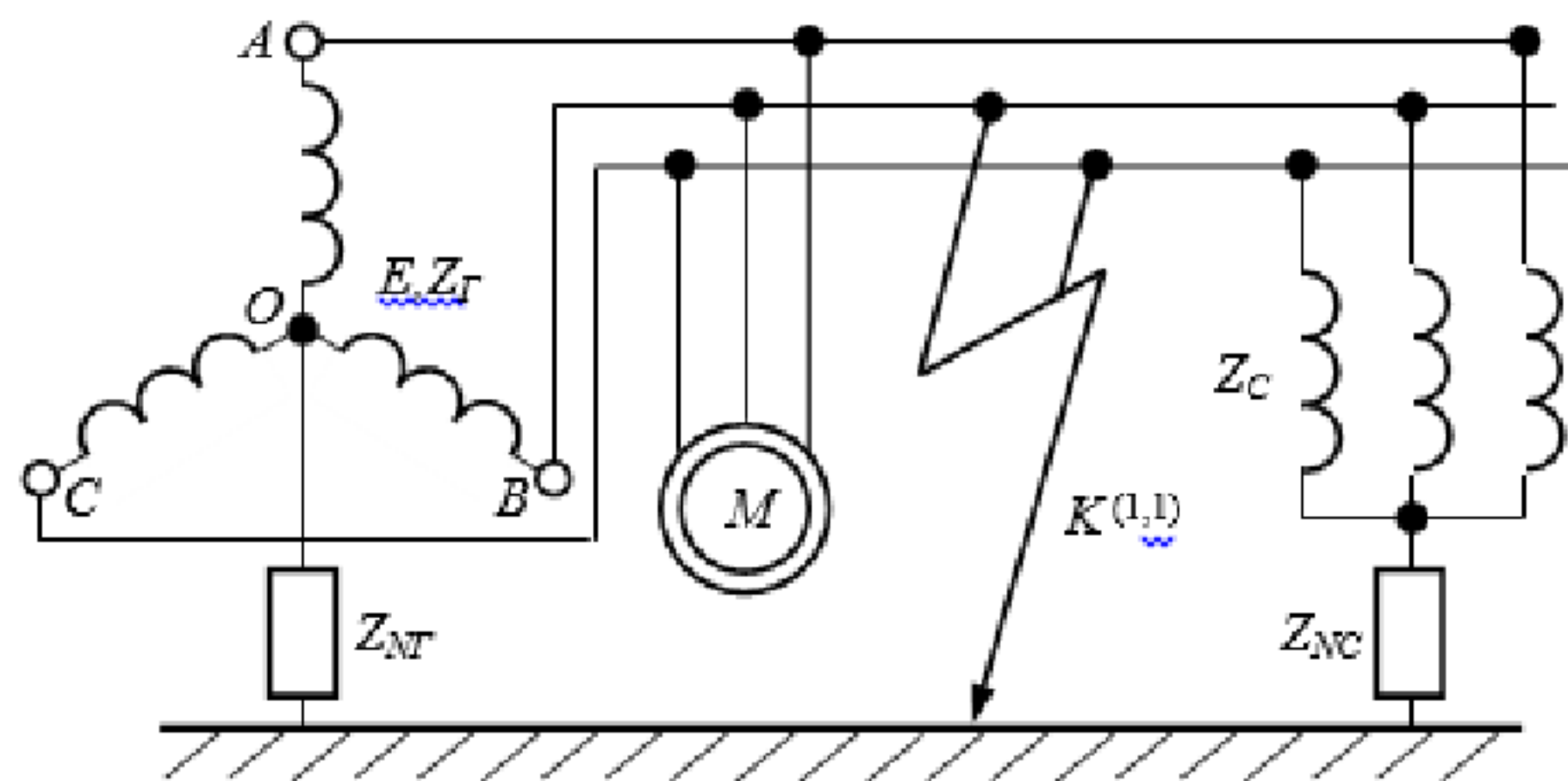
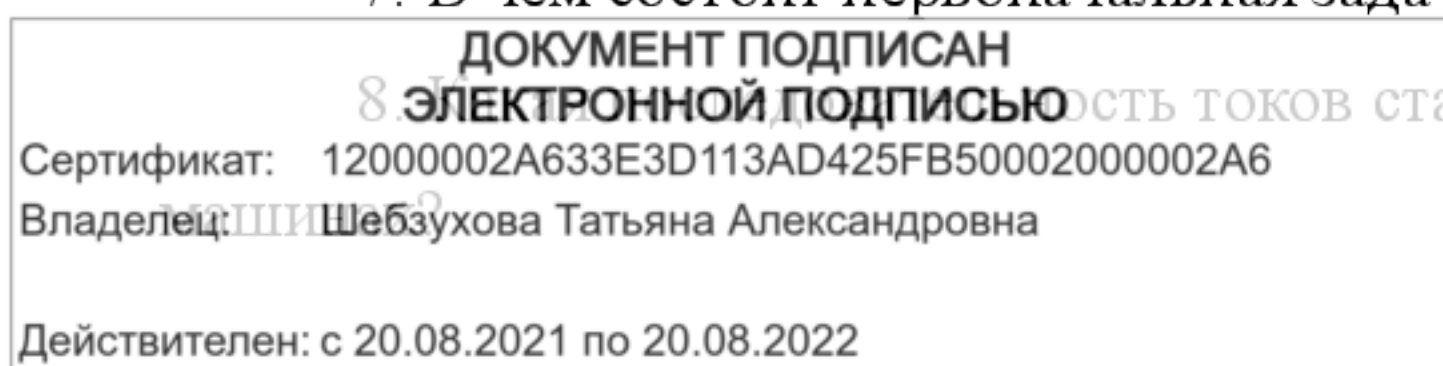


Рисунок 5 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. К чему приводят повреждения и аварии в энергетических системах?
2. На какие две группы делят несимметрию?
3. К чему позволяет привести задачу метод симметричных составляющих?
4. Из чего состоит система нулевой последовательности?
5. Любую ли несимметричную систему трёхфазных напряжений, токов, ЭДС можно представить как результат наложения систем прямой, обратной и нулевой последовательностей?
6. Если каким-либо образом найдены симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, можно ли определить исходные несимметричные напряжения и токи в трёхфазной цепи?
7. В чем состоит первоначальная задача метода наложения?



**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Практическая работа №13. Расчет и анализ линейных при периодических несинусоидальных напряжениях и токах

Цель: Приобрести практические навыки разложения периодической функции в ряд Фурье

Основы теории:

Всякая периодическая функция (например, напряжение $u(t)$) с периодом T , отвечающая условиям Дирихле, может быть разложена в тригонометрический ряд вида:

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (U'_k \cdot \sin(k\omega t) + U''_k \cdot \cos(k\omega t)) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (U_{mk} \cdot \sin(k\omega t + \psi_k))$$

коэффициенты которого определяются выражениями:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d(\omega t),$$

$$U'_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(k\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \sin(k\omega t) d\omega t,$$

$$U''_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(k\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cos(k\omega t) d\omega t,$$

$$U_{mk} = \sqrt{(U'_k)^2 + (U''_k)^2}, \quad \operatorname{tg}(\psi_k) = U''_k / U'_k, \quad \omega = 2\pi / T.$$

Действующее значение периодической функции (напряжения):

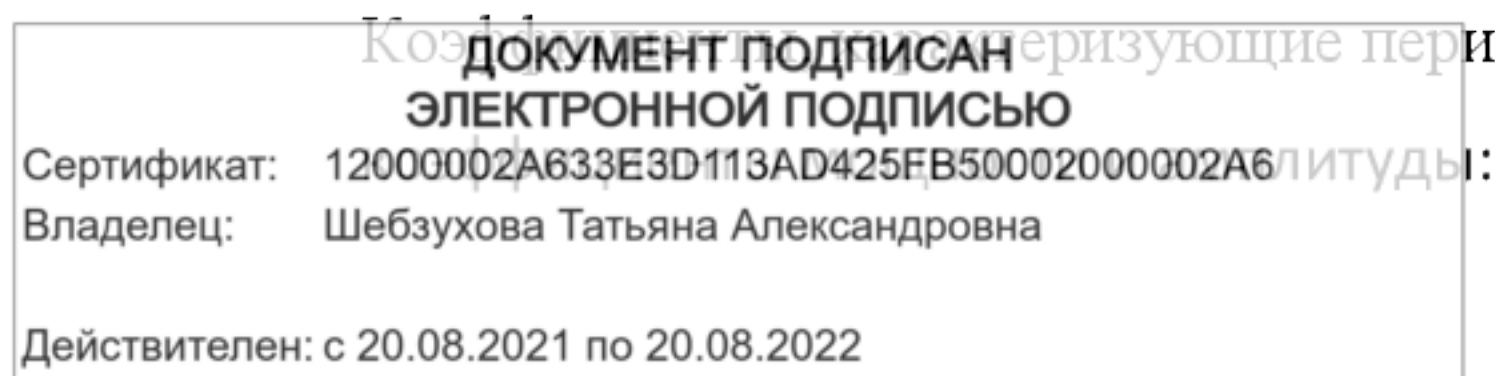
$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [u(t)]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [u(\omega t)]^2 d\omega t} = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} (U_k)^2}.$$

Мощности периодического тока (активная, реактивная, полная, мощность искажения):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos(\varphi_k), \quad Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin(\varphi_k),$$

$$S = UI = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 \sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}, \quad S^2 > P^2 + Q^2, \quad T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}.$$

Коэффициенты разложения периодических несинусоидальных функций:



$$\chi = \frac{P}{U \cdot I}; \quad k_a = \frac{I_{max}}{I};$$

коэффициенты гармоник и искажения:

$$k_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (I_k)^2}}{I_1}, \quad k_u = \frac{I_1}{I}.$$

Для характеристики выпрямителя часто применяют *коэффициент схемы*, являющийся отношением постоянной составляющей напряжения (на выходе выпрямителя) к действующему значению напряжения источника питания (на входе выпрямителя): $k_{cx} = U_0/U$.

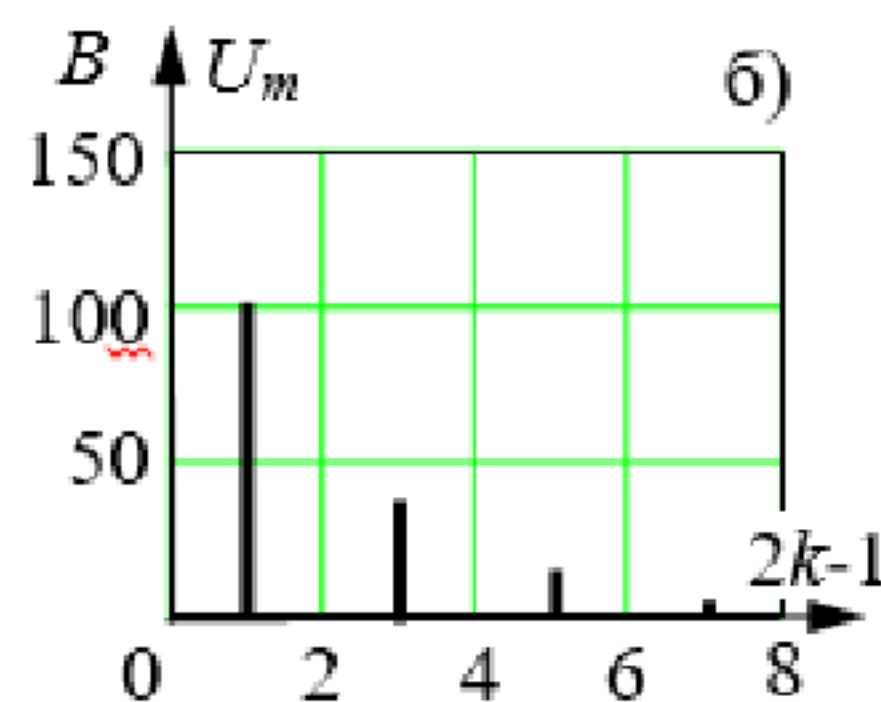
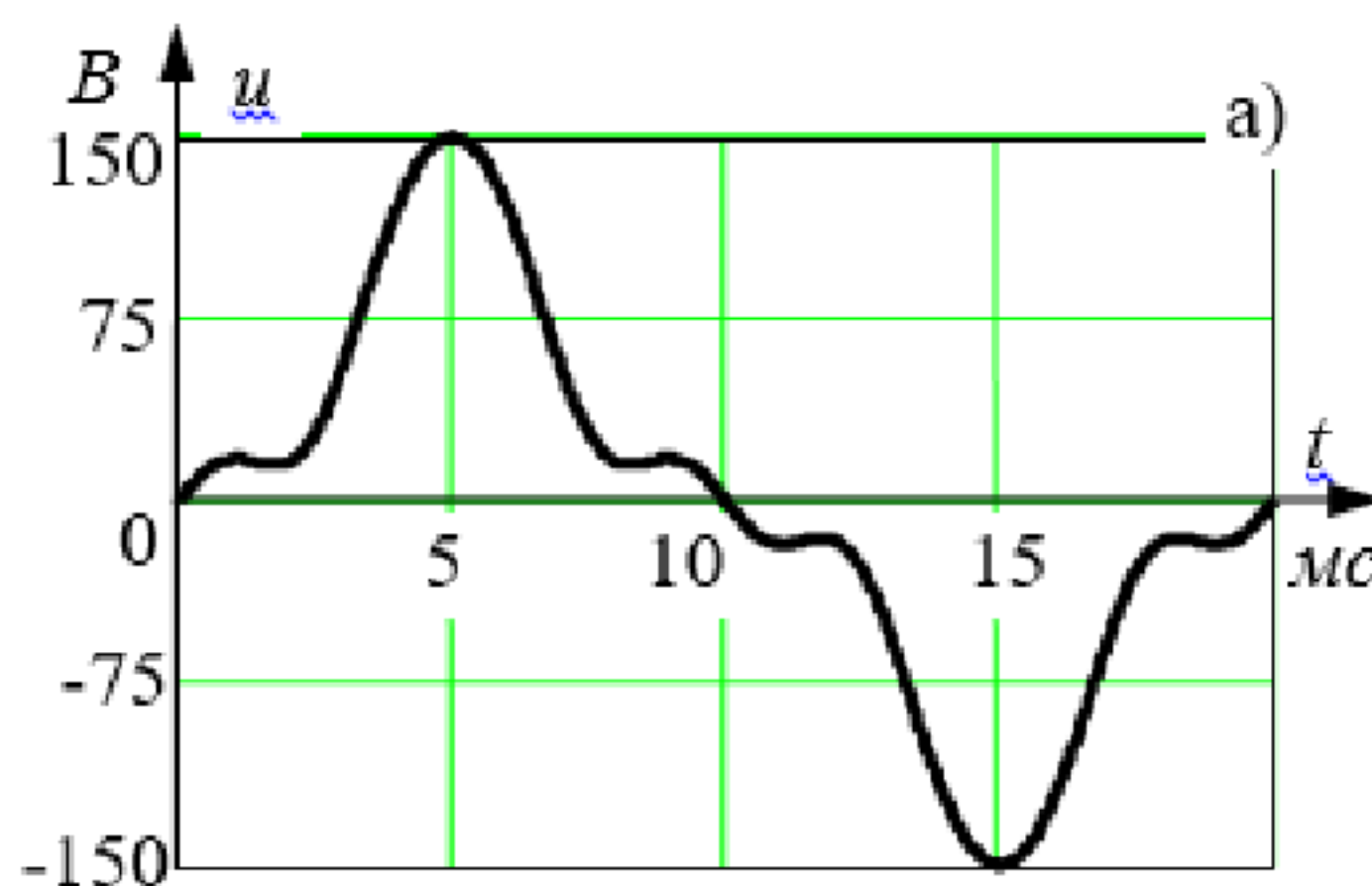
Задания:

Задание №1

Зависимость $u(t)$, показанная на рис. и заданная табл. (для первой четверти периода), имеет симметрию относительно начала координат (нечетная) и относительно оси абсцисс при совмещении двух полупериодов: $u(t) = -u(-t) = -u(t+T/2)$. Разложить зависимость $u(t)$ в ряд Фурье и построить ее линейный спектр частот.

Таблица – Значения функции $u(t)$ для первой четверти периода при $\Delta t = 0,5 \text{ мс}$

$t, \text{ мс}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$u_n, \text{ В}$	12,35	17,53	15,89	16,09	28,15	54,93	89,78	121,7	142,7	149,8
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10



Периодическое пилообразное напряжение, описываемое на интервале $0 < \omega t < 2\pi$

функцией: $u(\omega t) = \frac{\omega t}{2\pi}$, представьте разложением в ряд Фурье.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Задание №3

Синусоидальное напряжение с амплитудой U_m , у которого “срезаны” нижние полу-волны (рис. 6.3,а), представить разложением в тригонометрический ряд.

Задание №4

Напряжение на выходе однофазного мостового выпрямителя, описываемое функцией $u(t) = |U_m \cdot \sin(\omega t)|$, представить разложением в тригонометрический ряд.

Контрольные вопросы:

1. Что такое схема замещения?
2. Что такое эквивалентная схема?
3. Что называют симметричной системой нулевой, прямой и обратной последовательности (токов)?
4. Почему в схеме замещения обратной последовательности отсутствует ЭДС генератора?

Практическая работа №14. Расчет и анализ однофазных цепей несинусоидального тока

Цель: Освоить расчет и анализ однофазных цепей несинусоидального тока.

Основы теории:

На практике в большинстве случаев в электрических цепях действуют несинусоидальные переменные напряжений и токи. Даже при синусоидальном питании цепей с нелинейными элементами в ветвях будут действовать несинусоидальные токи. Несинусоидальными будут также напряжения и токи при питании цепи от источников энергии с разной частотой. Во многих устройствах несинусоидальный режим является обычным нормальным.

Эти составляющие называются гармониками. Затем на основе известных методов расчёта определить токи и напряжения от каждой гармоники и просуммировать результаты. На рисунке 7.1 показана периодическая несинусоидальная функция времени $f(t) = f(t + T)$ с периодом T .

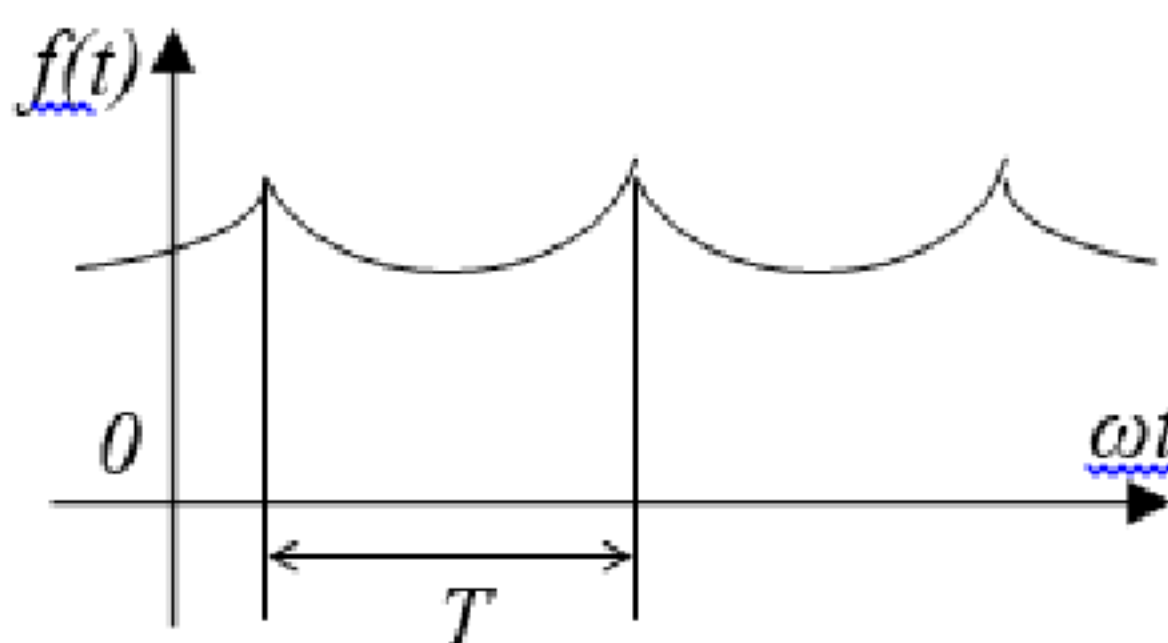


Рисунок 7.1 – Периодическая несинусоидальная функция

Известно, что периодическая несинусоидальная функция может быть представлена в виде бесконечного ряда – ряда Фурье.

Введём обозначение $\omega_1 = 2\pi/T$ – основная угловая частота. Синусоидальная и косинусоидальная составляющие с угловой частотой ω_1 образуют основную гармонику. Составляющие с более высокими угловыми частотами – высшие гармоники.

Гармонический ряд в тригонометрической форме имеет вид:

$$f(t) = a_0 / 2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t)$$

Рассмотрим несколько видов симметричных функций.

Функция $f(t)$ симметрична относительно оси ординат (рисунок 7.2).

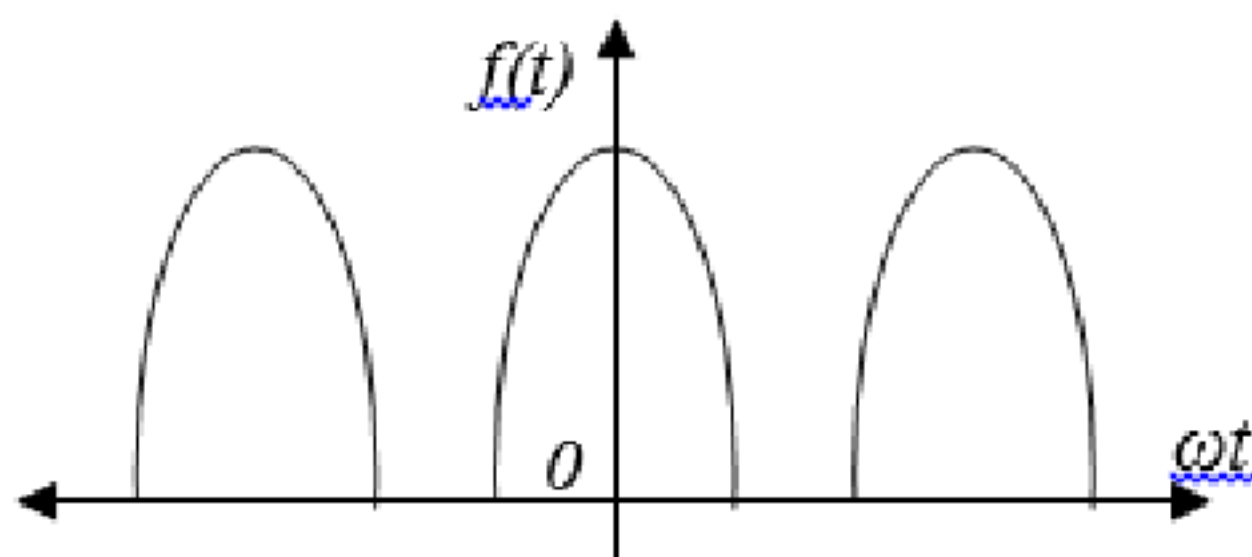


Рисунок 7.2 – Симметричная периодическая функция

Такие функции называют чётными. В эту функцию не входят синусоиды, т.к. они являются нечётными функциями. Поэтому при данном виде симметрии ряд представляется функцией:

$$f(t) = a_0 / 2 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t$$

т.е. четная функция содержит только косинусоиды и постоянную составляющую.

Функция $f(t)$ симметрична относительно начала координат (рисунок 7.3).

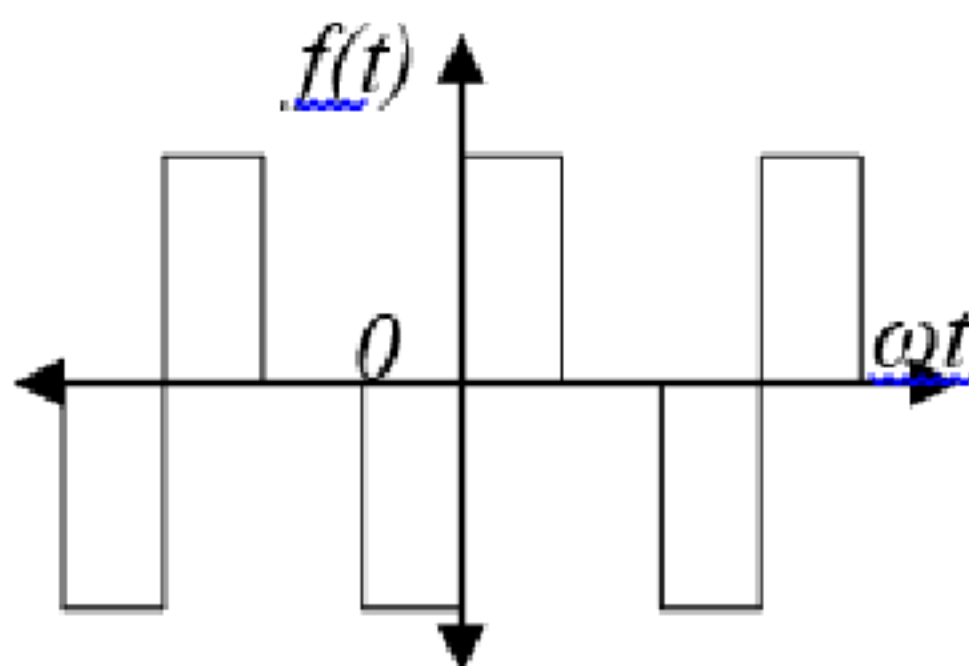


Рисунок 7.3 – Симметричная нечётная функция

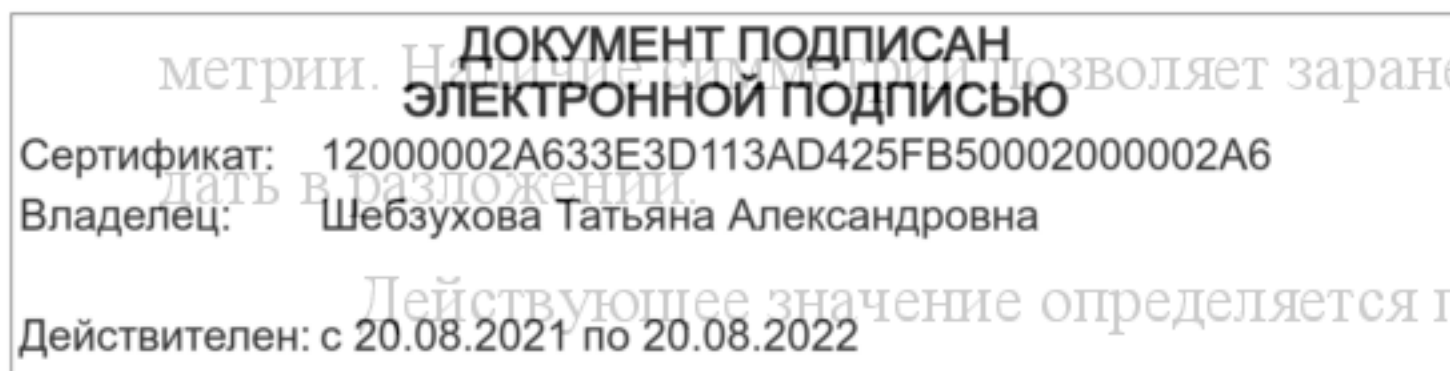
Такие функции называют нечётными. Поскольку постоянная составляющая и косинусоида не удовлетворяют функциям нечётности, то они отсутствуют в ряде и ряд принимает вид:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_1 t$$

Таким образом, раскладывая периодическую несинусоидальную функцию в ряд, следует предварительно выяснить не обладает ли заданная функция каким-либо видом сим-

метрии. Наличие симметрии позволяет заранее предсказать, какие гармоники следует ожидать в разложении.

Действующее значение определяется по формуле:



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

После разложения функции в ряд и подстановки в данное выражение получим:

$$F = \sqrt{\left(\frac{a_0}{2}\right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_n^2}{2}}$$

Отсюда следует, что действующее значение функции, представляющую собой сумму гармоник разных частот, не зависит от фаз этих гармоник, а определяется их действующими значениями. Например, для тока

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

Действующие значения могут быть измерены с помощью электроизмерительных приборов: электромагнитной, электродинамической и др. систем.

Активная мощность равна среднему значению мощности:

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

Если u, i выразить через тригонометрический ряд, то интеграл разложится на ряд интегралов, дающих в результате сумму произведений постоянных составляющих напряжения и тока и средних значений напряжений и токов гармоник одного и того же порядка. Остальные интегралы будут равны нулю. Итак:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n$$

Для реактивной мощности:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n$$

Задания:

Задание №1

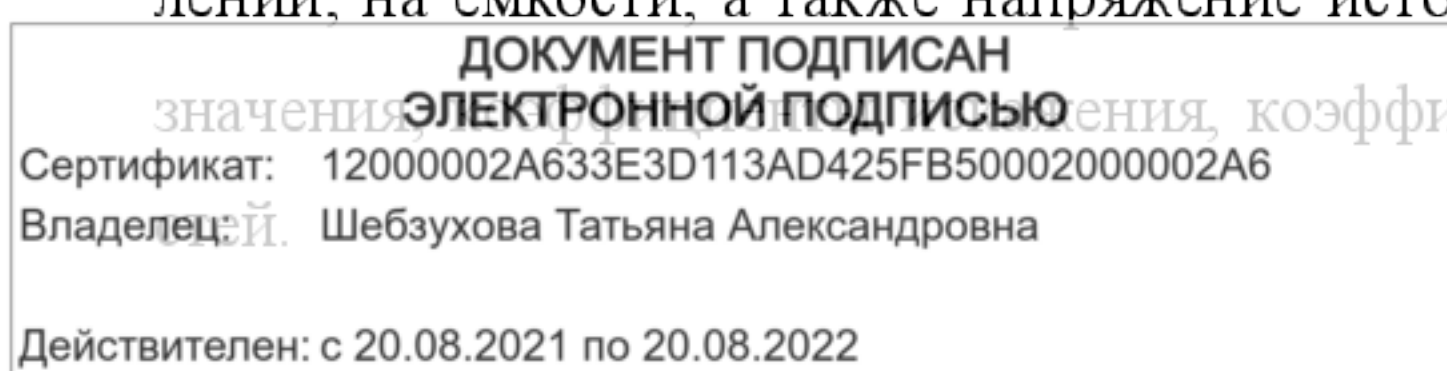
К последовательной цепи $r = 40 \text{ Ом}$ и $C = 40 \text{ мкФ}$ приложено напряжение, изменяющееся по закону (см. задачу 6.1):

$$u(t) = Um^{(1)} \sin(\omega t) + Um^{(3)} \sin(3\omega t) + Um^{(5)} \sin(5\omega t) + \dots,$$

где $Um^{(1)} = 100 \text{ В}$, $Um^{(3)} = -40 \text{ В}$, $Um^{(5)} = 15 \text{ В}$, $Um^{(7)} = 5 \text{ В}$, $Um^{(9)} = -0,19 \text{ В}$.

В общей системе координат построить графики напряжений на активном сопротивлении, на емкости, а также напряжение источника питания. Определить их действующие

значения, коэффициенты гармоник, проверить баланс мощно-



Задание №2

Входное напряжение действует на последовательную цепь $r = 1000 \text{ Ом}$ и $L = 3 \text{ Гн}$. Выполнить расчет амплитуд гармонических составляющих напряжений на активном сопротивлении и индуктивности. Построить амплитудные спектры этих напряжений, напряжения источника питания, сделать выводы относительно распределения высших гармоник.

Задание №3

В цепи на частоте основной гармоники $\omega_1 = 9600 \text{ с}^{-1}$ имеет место резонанс токов, а на третьей гармонике наступает резонанс напряжений. Определить индуктивности катушек L_1 и L_2 , если $r_1 = 10 \text{ Ом}$, $r_2 = 5 \text{ Ом}$, $C = 2,5 \text{ мкФ}$.

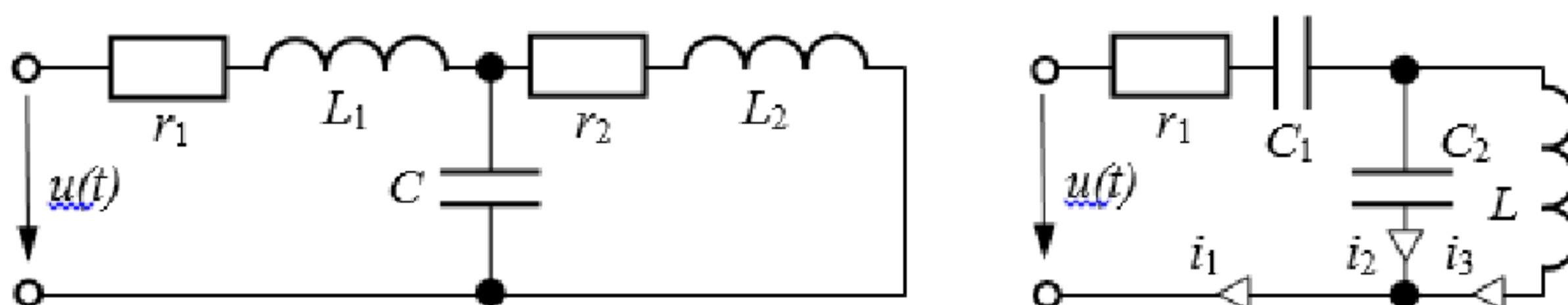


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

Напряжение $u = 50 + 200\sin(\omega t + 45^\circ) + 100\sin(3\omega t - 60^\circ) \text{ В}$ подано на вход цепи. Сопротивления элементов цепи токам основной гармоники, соответственно, равны $r_1 = r_2 = r_3 = 8 \text{ Ом}$;

$$\frac{1}{\omega C_1} = 15 \text{ Ом}; \quad \omega L_2 = 3 \text{ Ом}; \quad \frac{1}{\omega C_3} = 15 \text{ Ом}$$

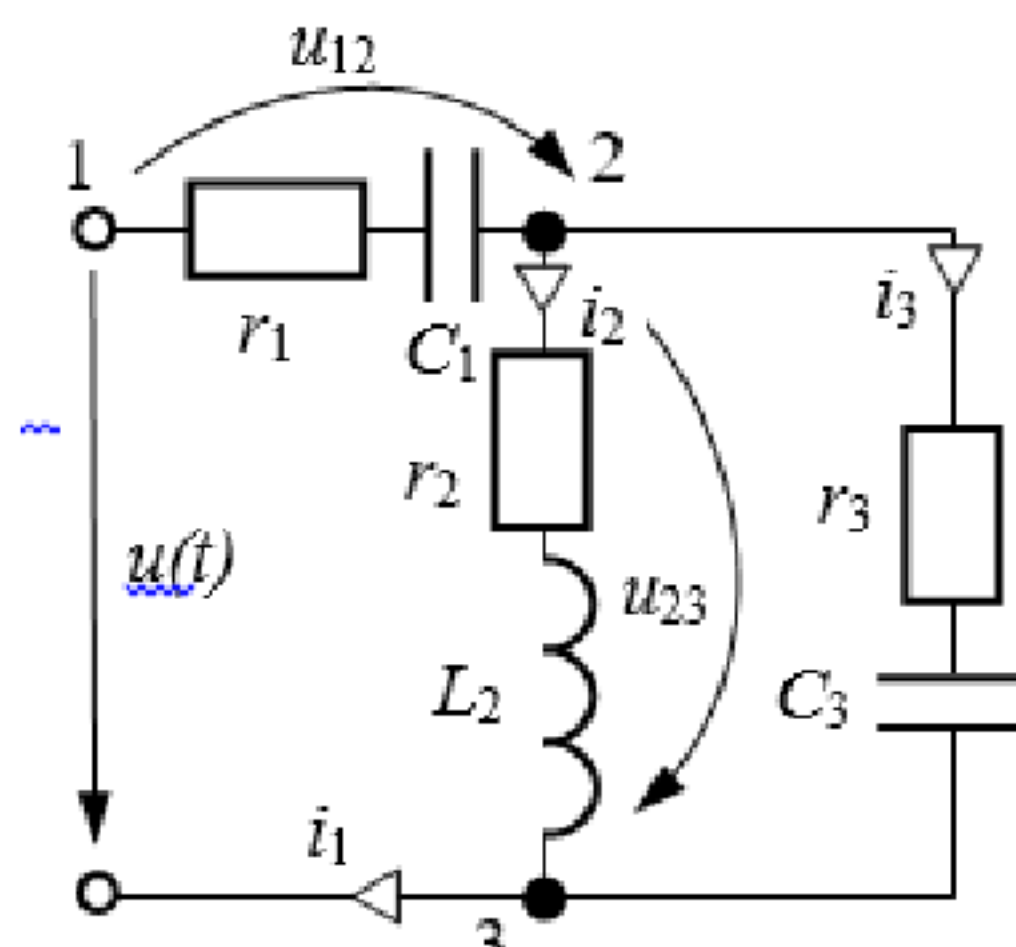


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Что является причиной появления несинусоидальных токов и напряжений в электрических цепях?
2. Изложите алгоритм разложения в ряд Фурье периодических несинусоидальных напряжений и токов.
3. Какие гармонические отсутствуют в спектрах кривых, симметричных относительно: 1) оси абсцисс; 2) оси ординат; 3) начала системы координат?
4. Какие величины и коэффициенты характеризуют периодические несинусоидальные переменные?
5. Как определяются действующие значения периодических несинусоидальных величин?
6. Изложите порядок расчета линейных электрических цепей при несинусоидальных напряжениях и токах.
7. Приведите формулы для определения всех видов мощностей для несинусоидальных напряжений и токов.
8. В чем разница результатов расчетов тока цепи, выполненных для мгновенных и действующих значений?
9. Достаточно ли для определения величины полной мощности в цепи несинусоидального тока наличие информации об активной и реактивной мощностях?
10. Для каких цепей справедлива методика расчета цепей несинусоидального тока, основанная на разложении ЭДС и токов источников в ряды Фурье?

Практическая работа №15. Расчет и анализ трехфазных цепей несинусоидального тока

Цель: Освоить навыки расчет трехфазных цепей несинусоидального тока

Основы теории:

Гармонический анализ и разложение функций

На практике часто встречаются несинусоидальные периодические ЭДС и токи, которые изменяются во времени по не гармоническому закону, но значения которых регулярно повторяются через равные промежутки времени, называемые периодом - T , как это показано на рисунке 7.

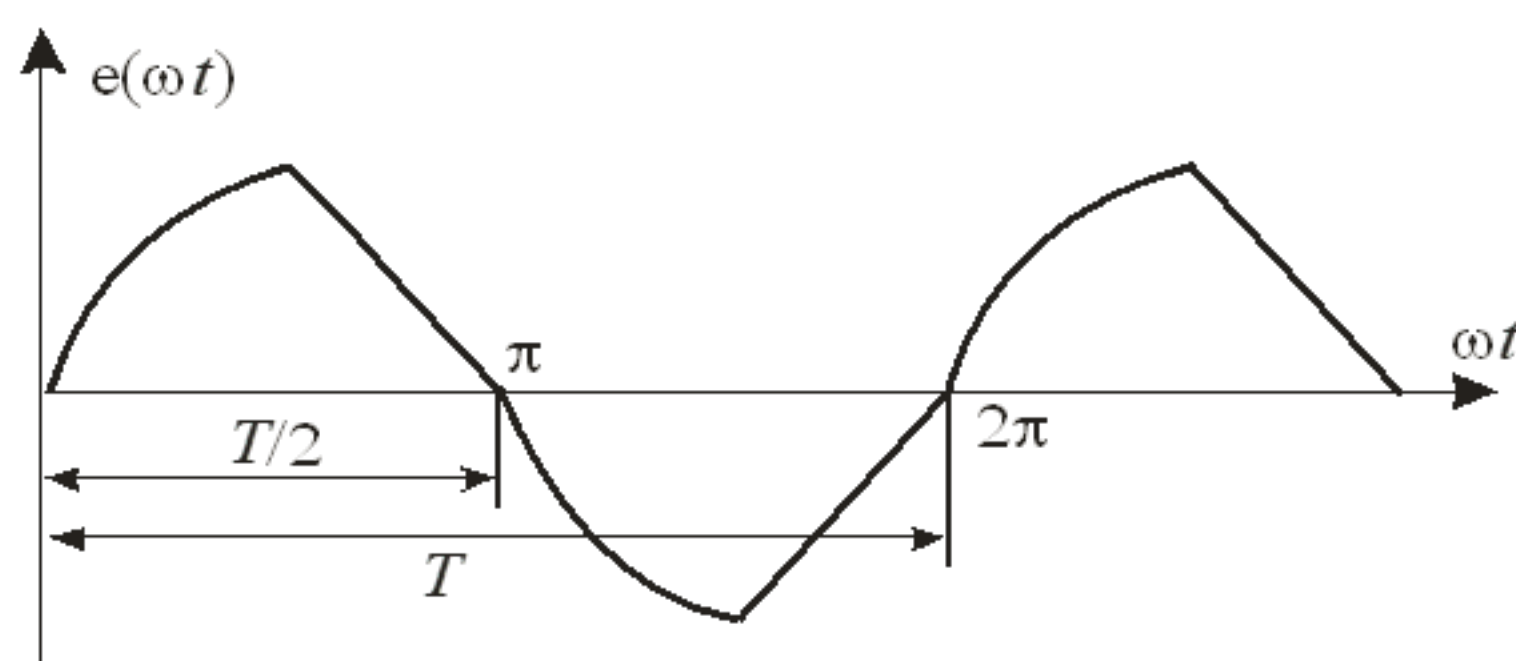


Рисунок 7 Несинусоидальные периодические ЭДС

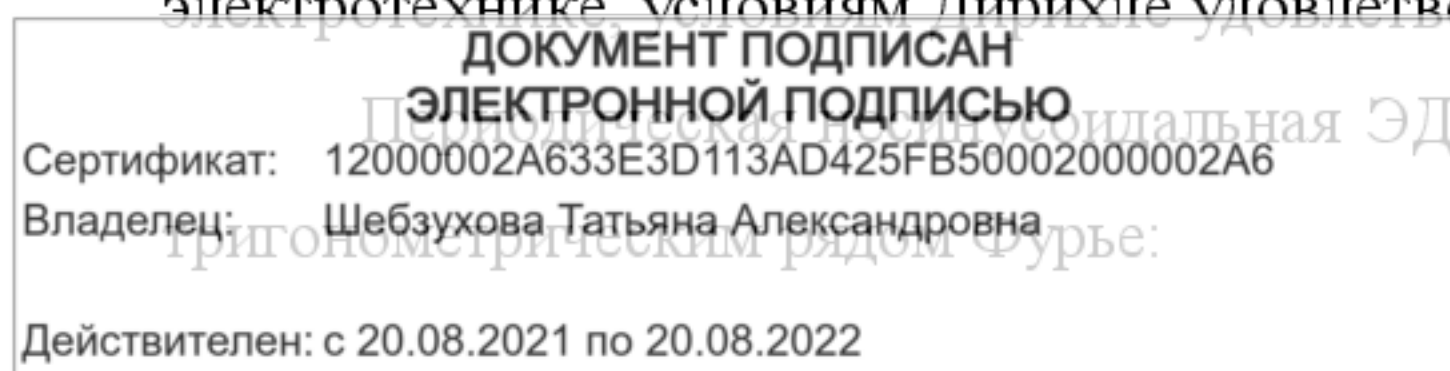
Несинусоидальные ЭДС и токи возникают в следующих случаях:

- а) при включении в цепь переменного тока элемента с насыщенным стальным (ферромагнитным) сердечником;
- б) при наличии нелинейных сопротивлений в цепи;
- в) если источник ЭДС или источник тока выдаёт несинусоидальное напряжение или ток.

Далее рассмотрим анализ линейных электрических цепей, на входе которых действуют периодические несинусоидальные ЭДС и токи.

Из курса высшей математики известно, что любая периодическая функция $f(t)$ с периодом $2 \cdot \pi$, удовлетворяющая условиям Дирихле (то есть имеющая на конечном интервале $f(t)$ конечное число максимумов, минимумов и разрывов первого рода), может быть разложена в ряд Фурье. Практически все периодические функции, используемые в электротехнике, условиям Дирихле удовлетворяют.

Несинусоидальная ЭДС в общем случае может быть представлена тригонометрическим рядом Фурье:



$$e(t) = E_{(0)} + E_{(1)m} \sin(\omega t + \psi_{(1)}) + E_{(2)m} \sin(2\omega t + \psi_{(2)}) + \dots + E_{(k)m} \sin(k\omega t + \psi_{(k)}) = \\ = E_{(0)} + \sum_{k=1}^{\infty} E_{(k)m} \sin(k\omega t + \psi_{(k)})$$

где $E_{(0)}$ - постоянная составляющая;

$E_{(1)} \sin(\omega t + \psi_{(1)})$ - первая (основная) гармоническая составляющая, имеющая частоту

$$\omega = 2 \cdot \pi / T ;$$

$E_{(k)m} \sin(k\omega t + \psi_{(k)})$ - при $k \geq 2$ высшие гармонические составляющие (гармоники);

$E_{(k)m}$ - амплитуда k -й гармоники;

$\psi_{(k)}$ - начальная фаза k -й гармоники.

k - номер гармоники.

Совокупность постоянной составляющей, основной гармоники и высших гармонических составляющих называется спектром несинусоидальной величины.

Действующее и среднее значения несинусоидальных величин

Периодическую несинусоидальную величину (например, ток) обычно характеризуют следующими значениями: максимальным ($I_{\max}$), действующим (I), средним по модулю ($I_{\text{ср.мод.}}$) и постоянной составляющей ($I_{(0)}$). Действующее значение несинусоидального тока определяется его среднеквадратическим (эффективным) значением за период:

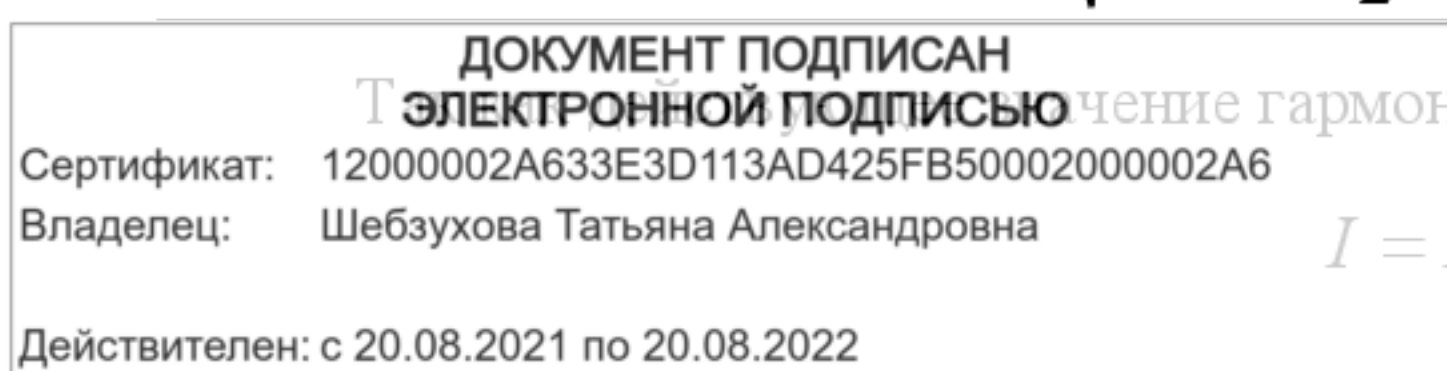
$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t)^2 dt} . (6)$$

Если ряд Фурье для тока ограничить конечным числом членов

$$i = I_{(0)} + I_{(1)m} \cdot \sin(\omega t + \psi_{(1)}) + I_{(2)m} \cdot \sin(2\omega t + \psi_{(2)}) + \dots + I_{(k)m} \cdot \sin(k\omega t + \psi_{(k)}),$$

то выражение (6) после интегрирования принимает вид:

$$I = \sqrt{I_{(0)}^2 + \frac{I_{(1)m}^2}{2} + \frac{I_{(2)m}^2}{2} + \dots + \frac{I_{(k)m}^2}{2}} . (7)$$



$$I = I_m / \sqrt{2} , \text{ то:}$$

$$I = \sqrt{I_{(0)}^2 + I_{(1)}^2 + I_{(2)}^2 + \dots + I_{(k)}^2}, \quad (8)$$

где $I_{(0)}$ - постоянная составляющая,

$I_{(1)}, I_{(2)}, I_{(k)}$ - действующие значения гармоник тока.

Аналогичное выражение имеет действующее значение напряжения:

$$U = \sqrt{U_{(0)}^2 + U_{(1)}^2 + \dots + U_{(k)}^2}. \quad (9)$$

Таким образом, действующее значение несинусоидальной электрической величины равно корню квадратному из суммы квадратов постоянной составляющей и действующих значений всех гармоник. Оно не зависит от начальных фаз гармоник.

Наряду с действующим значением в электротехнике используют понятие среднего по модулю значения функции. Оно, например, для тока, выражается интегралом вида:

$$I_{\text{ср.мод.}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |i(t)| dt.$$

Постоянная составляющая представляет собой среднее значение функции за период:

$$I_{(0)} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) dt.$$

Особенности расчета линейной электрической цепи с несинусоидальными источниками

Расчет цепей, в которых действует один или несколько несинусоидальных источников периодических ЭДС и токов, раскладывается на три этапа;

1) Разложение ЭДС и токов источников на постоянную и синусоидальные составляющие (при этом ограничиваемся некоторым числом гармоник);

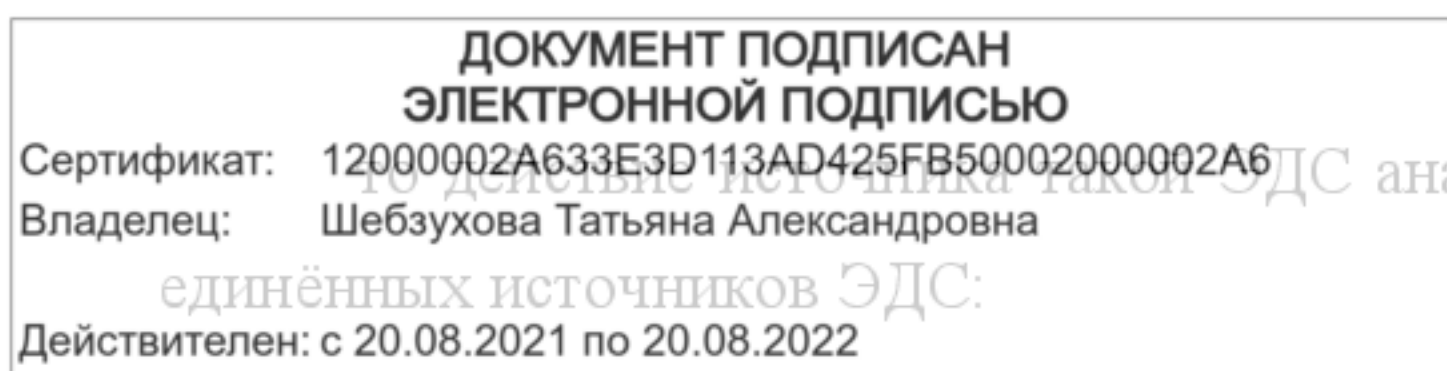
2) Применение принципа наложения и расчет токов и напряжений в цепи для каждой из составляющих в отдельности при этом, учитываем что структура цепи сохраняется, а сопротивления и проводимости реактивных элементов изменяются с изменением частоты гармоники;

3) Совместное рассмотрение решений, полученных для каждой из составляющих.

Рассмотрим каждый из этих этапов подробнее.

1) Если ЭДС изменяется по закону

$$e = E_0 + E_{1m} \sin(\omega_1 t + \psi_1) + E_{2m} \sin(\omega_2 t + \psi_2), \quad (10)$$



аналогично действию трёх последовательно со-
единённых источников ЭДС: