МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ДЕПАРТАМЕНТ, НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Учебно-методическое пособие

Часть 1

Зерноград
2024

Об издании – *1*
Содержание

УДК 621.3 (075.8)

Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс]: учебно-методическое пособие. Часть 1. / Сост. О.Б. Забродина, А.М. Исупова, О.В. Кобзистый – Электрон. дан. – Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024. – 100 с. – Режим доступа: Локальная сеть Библиотеки Азово-Черноморского инженерного института ФГБОУ ВО Донской ГАУ.

Учебно-методическое пособие включает методические указания к выполнению лабораторных работ и решению индивидуальных задач по дисциплине «Теоретические основы электротехники», часть 1 и предназначено для студентов очного и заочного отделений, обучающихся по направлению подготовки 35.03.06 «Агроинженерия» профиль «Электрооборудование и электротехнологии»

Утверждено методической комиссией по направлению подготовки 35.03.06 и 35.04.06 Агроинженерия направленности «Электрооборудование и электротехнологии»

Рецензент: к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Эксплуатация энергетического оборудования и электрические машины» Гуляев П.В.

© Азово-Черноморский инженерный институт
ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2024 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ 4
1.1. Подготовка к лабораторным работам 4
1.2. Выполнение лабораторных работ 4
1.3. Основные правила техники безопасности при работе в электротехнической лаборатории 5
1.4. Составление отчета и его сдача 7
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1 8
«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ, ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И СМЕШАННЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ» 8
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 15
«ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ (СУПЕРПОЗИЦИИ) В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ» 15
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 20
«ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА» 20
Диаграмма сопротивлений электрической цепи по рис.3.6 27
Схема экспериментальной установки для изучения режимов работы 33
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 **«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШКИ И КОНДЕНСАТОРА»** 35
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 46
«ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ТРАНСФОРМАТОРА» 46
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 56
«ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА» 56
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ 68
ПРИЛОЖЕНИЕ 69
«ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ С ПРИМЕРАМИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ» 69
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 1 70
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 2 73
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 3 78
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 4 81
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 5 86
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 6 92
ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 7 96

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1.1. Подготовка к лабораторным работам

Лабораторные работы являются одним из видов практического обучения. Их целью является закрепление теоретических знаний, проверка на опыте некоторых положений теории и законов электротехники, приобретение практических навыков в сборке электрических цепей, в проведении эксперимента, обучение использованию простейших электроизмерительных приборов и аппаратов.

Вдумчивое отношение к лабораторным работам позволит студенту сделать правильные выводы, проанализировать результаты опытов, научиться решать некоторые несложные задачи исследовательского характера.

Чтобы качественно выполнить лабораторные работы, студенту необходимо подготовиться к ним. Для этого студент должен выполнить следующее:

- подготовить теоретический материал по конспекту и учебнику (см. список литературы);
- ознакомиться с описанием лабораторной работы. В специальной рабочей тетради записать номер и название работы, вычертить таблицы для записи показаний приборов и результатов расчетов, исследуемые схемы электрических цепей, а также подготовить миллиметровую бумагу, если потребуются графические построения;
- уяснив цель работы, четко представить себе поставленную задачу и способы ее достижения, продумать ожидаемые результаты опытов;
- сделать предварительные расчеты, если это необходимо согласно заданию, или только записать необходимые формулы;
- ответить устно или письменно на контрольные вопросы.

1.2. Выполнение лабораторных работ

Прежде чем приступить к сборке электрической цепи, следует выбрать необходимые приборы и аппараты. В описании каждой лабораторной работы приводится порядок проведения опыта и перечень необходимой аппаратуры. При выборе измерительных приборов следует учитывать их тип, предел измерений, род тока, класс точности.

Выбрав предел измерений прибора, необходимо определить цену деления и только тогда приступить к измерениям.

Одним из способов определения цены деления является подсчет частного от деления предела измерений, указанного на шкале или на переклю-

чателе многопредельного прибора на число делений, обозначенное цифрой в конце шкалы измерительного прибора:

$$C = \frac{A.}{N}.$$

Например, для вольтметра, имеющего N = 100 делений и пределы измерений 100 В и 30 В, цена деления на пределе измерений 100 В равна:

$$C = \frac{U_{н1}}{N} = \frac{100}{100} = 1\ В/дел\ ;$$

на пределе измерений 30 В

$$C = \frac{U_{н2}}{N} = \frac{30}{100} = 0,3\ \ В/дел\ .$$

Для амперметра, имеющего N =100 делений и предел измерений 5А,

$$C_I = \frac{I_н}{N} = \frac{5}{100} = 0,05\ А/дел\ .$$

Несколько сложнее дело обстоит с многопредельными ваттметрами. Так как мощность потребителя определяется по формуле $P=UI$, то цена деления прибора равна произведению пределов измерений напряжения и тока, деленному на число делений шкалы прибора

$$C_p = \frac{U_н \cdot I_п}{N}.$$

1.3. Основные правила техники безопасности при работе в электротехнической лаборатории

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) для помещений без повышенной опасности поражения током, к которым относится лаборатория теоретических основ электротехники, безопасным считается напряжение до 42 В.

Сопротивление тела человека определяется главным образом сопротивлением кожного покрова и может составлять 200...500 кОм. Увлажнение или повреждение кожи снижает сопротивление до 600..800 Ом (большое влияние на снижение сопротивления оказывает также общее состояние организма и нервной системы). Таким образом, при указанном напряжении через человека, находящегося в нормальном состоянии, протекает ток 0,1..0,3 мА. Известно, что ток в 50 мА может привести к травме, а в 100 мА - к смертельному исходу.

Следует иметь в виду, что при токе даже менее чем 50 мА мышцы кистей рук непроизвольно сокращаются, и токоведущая часть может оказаться зажатой в кулаке. В этом случае иногда не удается разжать руку и прервать ток через тело.

Приведем основные правила по технике безопасности при выполнении лабораторных работ в лаборатории теоретических основ электротехники:

1. Перед началом сборки электрической цепи следует убедиться в том, что автоматический выключатель на лабораторном столе находится в выключенном состоянии.
2. Не допускается использование приборов и аппаратов с неисправными клеммами, проводов с поврежденной изоляцией, неисправных реостатов, тумблеров и др.
3. Собранная электрическая цепь должна быть проверена преподавателем или лаборантом и может включаться только по его разрешению.
4. Не загромождать рабочее место оборудованием, не относящимся к выполнению лабораторной работы.
5. Перед включением электрической цепи убедиться, что никто не прикасается к оголенным токоведущим частям.
6. Все необходимые изменения в цепях нужно производить только при выключенном напряжении. Всякие изменения в электрической цепи должны быть проверены преподавателем.
7. Учащимся не разрешается производить какие-либо переключения на главном распределительном щите лаборатории.
8. Учащимся не разрешается находиться в верхней одежде в учебной лаборатории.
9. Если во время работы возникает аварийная ситуация, в результате чего появляется дым, специфический запах или накаляются проводники, следует немедленно выключить напряжение и сообщить преподавателю о случившемся.
10. Если кто-либо попадет под напряжение и не сможет сам оторваться от токоведущих частей цепи, не пытайтесь его оттащить – вы сами будете поражены током. **Немедленно отключите напряжение!** Сообщите о случившемся преподавателю.

11.Учащиеся допускаются к работам в лаборатории теоретических основ электротехники после ознакомления с настоящими правилами, что должно быть зафиксировано в журнале по технике безопасности.

1.4. Составление отчета и его сдача

Отчет по лабораторной работе является документом о проделанной работе, поэтому он должен иметь все необходимые сведения для проверки результатов опытов и расчетов. Составление отчета является индивидуальной работой каждого члена бригады. Отчет должен содержать название и номер лабораторной работы, цель ее, перечень приборов, оборудования, схемы электрических цепей, программу работы, расчетные формулы и сами расчеты, таблицы результатов измерений и расчетов, графики полученных зависимостей и выводы.

Отчеты выполняются с учетом действующих стандартов на оформление текстовых документов (ЕСКД).

Схемы, таблицы, графики и другие построения выполняются карандашом с помощью чертежных инструментов.

После выполнения лабораторной работы и подготовки отчета проводится его сдача. Учащиеся должны знать теорию по данной теме, уметь собрать цепь и рассказать ход лабораторной работы, пояснить, как проводились расчеты, анализировать полученные результаты и объяснить причины расхождения расчетных и опытных данных.

Сдача отчетов по лабораторным работам проводится систематически в определенное преподавателем время (как правило, в часы следующей лабораторной работы или в часы индивидуальной работы).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ, ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ И СМЕШАННЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ»

1.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Опытная проверка законов Ома и Кирхгофа и приобретение навыков расчета разветвленных электрических цепей.

1.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:

- аккумуляторная батарея на 12 В;
- вольтметры магнитоэлектрической системы с пределом измерений до 100 В – 2 шт.;
- амперметры магнитоэлектрической системы с пределом измерений 2 А – 2 шт.;
- резисторы – 3 шт.

1.3. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится 2 академических часа.

1.4. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Если к неразветвленной электрической цепи постоянного тока (рис.1.1) приложено напряжение U, то по этой цепи протекает ток I.

Согласно второму закону Кирхгофа для электрических цепей постоянного тока *алгебраическая сумма напряжений на ветвях, образующих контур, равна нулю*. Для приведенной схемы

$$U_1+U_2+U_3-U=0 \quad \text{или} \quad U=U_1+U_2+U_3. \qquad (1.1)$$

Схема последовательного соединения потребителей

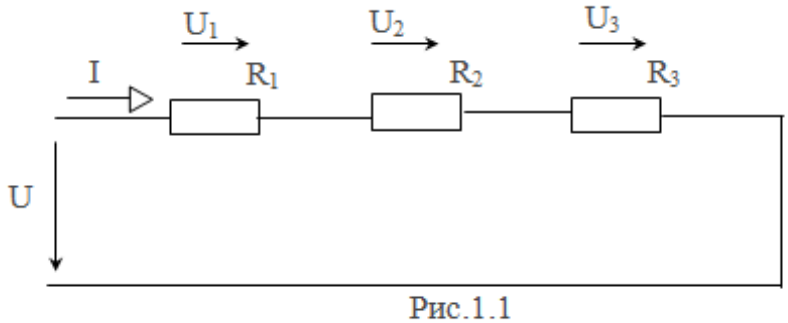


Рис.1.1

Отсюда напряжение на входе электрической цепи постоянного тока равно алгебраической сумме падений напряжения на отдельных ее участках.

Из закона Ома

$$U = I \cdot R_Э \; ; \quad U_1 = I \cdot R_1 \; ; \quad U_2 = I \cdot R_2 \; ; \quad U_3 = I \cdot R_3 \; . \qquad (1.2)$$

Подставив (1.2) в (1.1) и разделив обе части уравнения (1.1) на общий для всей цепи ток I , получим общее (эквивалентное) сопротивление электрической цепи при последовательном соединении потребителей:

$$R_Э = R_1 + R_2 + R_3. \qquad (1.3)$$

Следовательно, общее (эквивалентное) сопротивление всей электрической цепи равно сумме сопротивлений последовательно соединенных потребителей.

Из выражений (1.2) также следует, что наибольшим является падение напряжения на наибольшем из последовательно соединенных сопротивлений.

Если к разветвленной электрической цепи рис.1.2 приложено напряжение U, то ток I, генерируемый источником питания, разветвляется по параллельным ветвям. В результате в ветвях протекают токи I_1, I_2, I_3.

Схема параллельного соединения потребителей

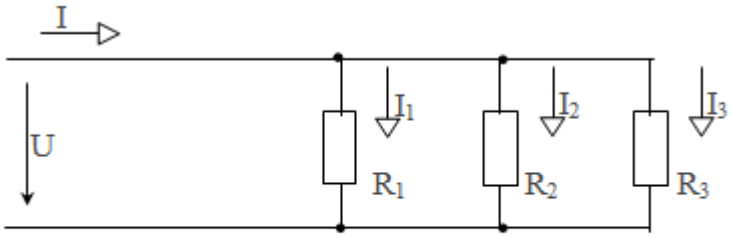


Рис.1.2

Согласно первому закону Кирхгофа для электрических цепей постоянного тока *алгебраическая сумма токов в ветвях, образующих узел, равна нулю*.

$$I - I_1 - I_2 - I_3 = 0 \qquad \text{или} \qquad I = I_1 + I_2 + I_3. \qquad (1.4)$$

Из закона Ома

$$I = \frac{U}{R_Э} \; , \qquad I_1 = \frac{U}{R_1} \; , \qquad I_2 = \frac{U}{R_2} \; , \qquad I_3 = \frac{U}{R_3}$$

или, если учесть, что

$$Y_Э = \frac{1}{R_Э}\ , \qquad Y_1 = \frac{1}{R_1}\ , \qquad Y_2 = \frac{1}{R_2}\ , \qquad Y_3 = \frac{1}{R_3}\ ,$$

то можно получить

$$I = U \cdot Y_Э\ , \quad I_1 = U \cdot Y_1\ , \quad I_2 = U \cdot Y_2\ , \quad I_3 = U \cdot Y_3\ . \qquad (1.5)$$

Подставив (1.5) в (1.4) и разделив обе части уравнения (1.4) на общее напряжение U, получим общую (эквивалентную) проводимость электрической цепи при параллельном соединении потребителей:

$$Y_Э = Y_1 + Y_2 + Y_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{R_Э}. \qquad (1.6)$$

Следовательно, общая (эквивалентная) проводимость всей электрической цепи равна сумме проводимостей параллельно соединенных потребителей.

Из выражения (1.5) также следует, что в силу обратной пропорциональности токов и сопротивлений в параллельных ветвях, наименьший ток протекает в ветви с наибольшим сопротивлением.

Для электрической цепи рис.1.3 со смешанным соединением потребителей можно составить уравнения как по первому, так и по второму законам Кирхгофа:

$$U_1 + U_2 - U = 0 \ \text{ или } \ U = U_1 + U_2;$$

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

Смешанное соединение потребителей

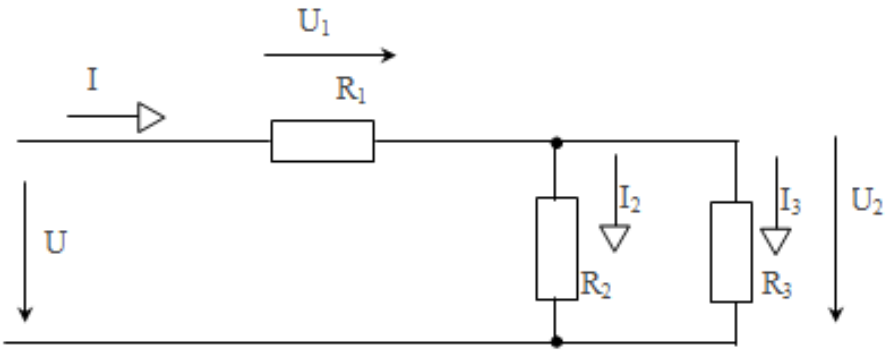


Рис.1.3

1.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы требуется соблюдать общие правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ в лаборатории ТОЭ.

1.6. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить разделы курса ТОЭ, в которых рассматриваются законы Ома и Кирхгофа для линейных электрических цепей.

2.Ознакомиться с приборами и оборудованием, записать их паспортные данные в табл. 1в.

3. Собрать электрическую цепь по схеме рис.1.4. После проверки ее преподавателем включить питание. Результаты измерений и вычислений записать в табл. 1.1. Убедиться в справедливости второго закона Кирхгофа для данной цепи.

Схема электрической цепи при экспериментальном исследовании последовательного соединения потребителей

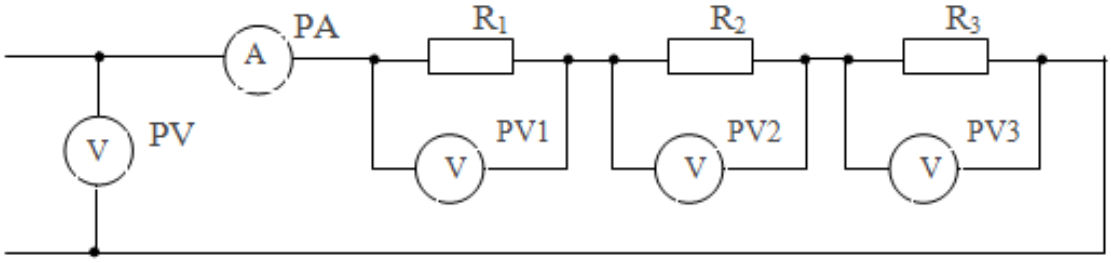


Рис.1.4

Таблица 1.1

Результаты измерений					Результаты вычислений					
U	U_1	U_2	U_3	I	R_1	R_2	R_3	$R_1+R_2+R_3$	$R=U/I$	$U=U_1+U_2+U_3$
В	*В*	*В*	*В*	*А*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*В*

4. Собрать электрическую цепь по схеме рис.1.5. Результаты измерений и вычислений записать в табл. 1.2. Убедиться в правильности первого закона Кирхгофа для данной цепи.

Схема электрической цепи при экспериментальном исследовании параллельного соединения потребителей

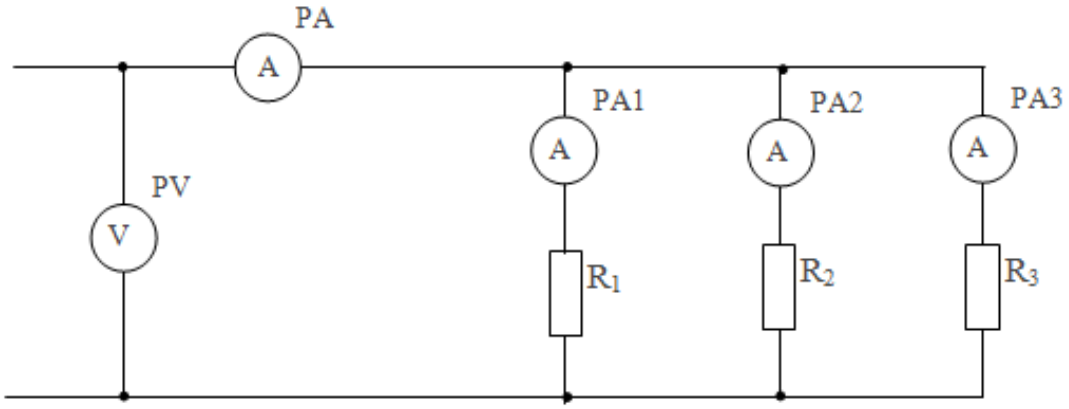


Рис.1.5

Таблица 1.2

Результаты измерений					Результаты вычислений					
U	I	I_1	I_2	I_3	R_1	R_2	R_3	I/U	$\frac{1}{R_э}=\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{1}{R_3}$	$I=I_1+I_2+I_3$
В	*А*	*А*	*А*	*А*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*См*	*См*	*А*

Проверить равенство проводимостей.

5. Собрать электрическую цепь по схеме рис.1.6. Результаты измерений и вычислений записать в табл.1.3. Убедиться в правильности законов Кирхгофа для данной цепи.

Таблица 1.3

Результат измерений						Результат вычислений						
U	U_1	U_2	I_1	I_2	I_3	U_1+U_2	I_1+I_2	R_1	R_2	R_3	$R_Э=U/I_1$	$R_{\text{экв}}=R_1+\frac{R_2\cdot R_3}{R_2+R_3}$
В	*В*	*В*	*А*	*А*	*А*	*В*	*А*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*

Схема электрической цепи при экспериментальном исследовании смешанного соединения потребителей

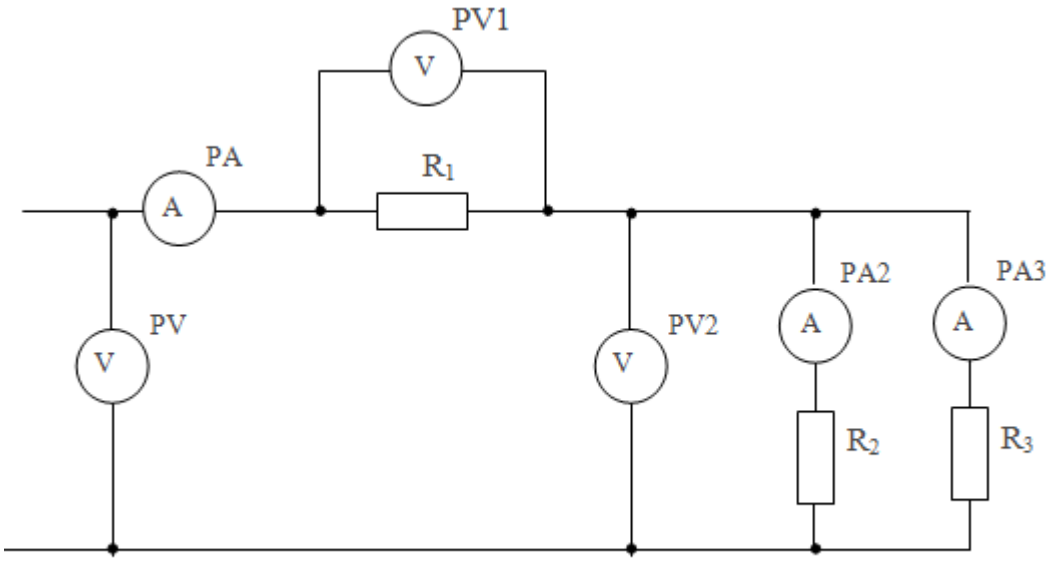


Рис.1.6

6. Выполнить индивидуальное задание № 1 (см. Приложение). Номер варианта принимается по заданию преподавателя.

1.7. ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

По данным каждого опыта вычислить сопротивления резисторов R_1, R_2, R_3. Проанализировать результаты каждого опыта – с помощью опытных данных подтвердить законы Ома и Кирхгофа.

1.8. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать: электрические схемы рассматриваемых цепей; таблицы приборов, опытных и расчетных данных; формулы для расчетов; уравнения по законам Кирхгофа и Ома; выводы (анализ результатов экспериментов). К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №1.

1.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему на практике получило преимущественное распространение параллельное подключение потребителей?

2. В которой из электрических цепей (рис.1.1, 1.2, 1.3) потребляется наибольшая мощность при одинаковых сопротивлениях и входном напряжении? Почему?

3. Какими соображениями необходимо руководствоваться при выборе пределов измерений амперметров и вольтметров в схемах рис.1.1, рис.1.2, рис.1.3?

4. Сформулируйте законы Кирхгофа. Составьте систему уравнений по законам Кирхгофа для схемы рис.1.3.

5. Сформулируйте закон Ома. Как с его помощью рассчитать сопротивления резисторов в схемах рис.1.1, 1.2, 1.3?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

«ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ (СУПЕРПОЗИЦИИ) В СЛОЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ»

2.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментальное подтверждение принципа наложения в линейных электрических цепях постоянного тока.

2.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:

- аккумуляторная батарея на 12 В;
- источник постоянной ЭДС на 20 В;
- амперметры магнитоэлектрической системы с пределом измерений 2А – 3 шт.;
- сопротивления на 5, 10 и 20 Ом.

2.3. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится 2 академических часа.

2.4. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для самых различных расчетов в электрических и магнитных цепях широко используется принцип наложения или, иначе, принцип суперпозиции. Он является прямым следствием общих свойств линейных уравнений и применяется в технике не только для расчета электрических и магнитных цепей. Например, в механике принцип наложения называется принципом независимого действия сил, согласно которому движение тела под действием нескольких сил можно рассматривать как результат сложения движений, вызываемых каждой силой в отдельности.

В линейных электрических цепях, согласно принципу наложения, ток в любой ветви сложной схемы, содержащей несколько источников ЭДС, можно рассматривать как алгебраическую сумму токов, создаваемых в этой ветви каждой ЭДС в отдельности. Следует подчеркнуть, что принцип наложения справедлив только для линейных электрических цепей.

На принципе наложения основан метод наложения, в котором расчеты выполняются в следующей последовательности:

- Приравниваются нулю все ЭДС, кроме одной. При этом все сопротивления, включая внутренние сопротивления всех ЭДС, остаются без изменения.

- Рассчитываются частичные токи во всех ветвях электрической цепи, создаваемые действием одной этой ЭДС.

- Аналогично поочередно рассчитываются частичные токи от всех остальных ЭДС, входящих в электрическую цепь.

- Действительные значения токов в отдельных ветвях электрической цепи определяются посредством алгебраического сложения частичных токов.

На рис. 2.1 показан пример расчета электрической цепи методом наложения. Электрическая цепь содержит два источника ЭДС, E_1 и E_2.

Схемы к примеру расчета электрической цепи методом наложения

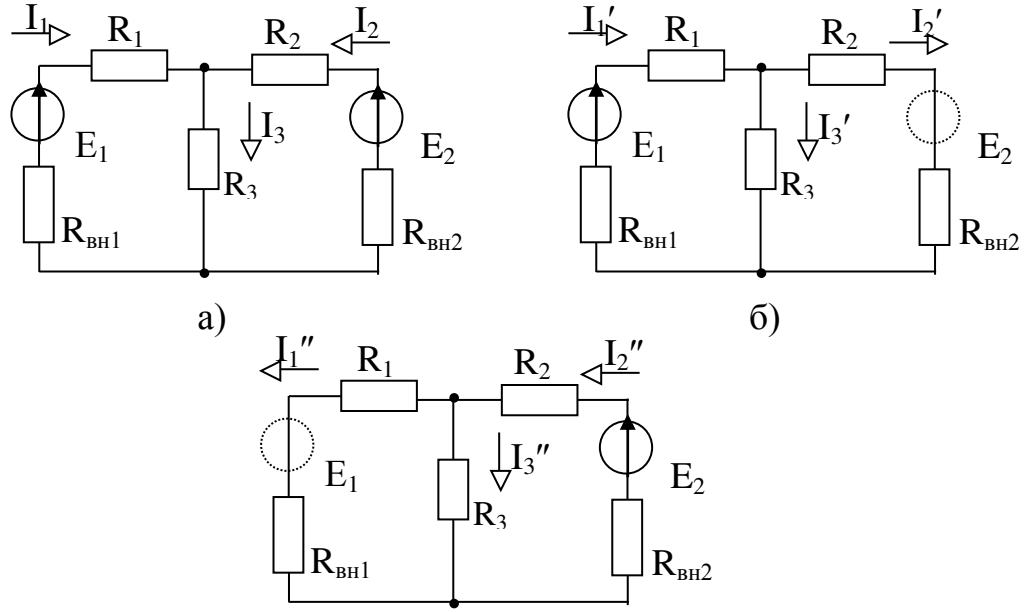


Рис.2.1

После исключения ЭДС E_2 электрическая цепь представляет собой смешанное соединение сопротивления (рис.2.1б) и частичные токи в ее ветвях будут равны:

$$I_1' = \frac{E_1}{R_1 + R_{вн1} + \dfrac{(R_2 + R_{вн2})R_3}{R_2 + R_{вн2} + R_3}};$$

$$I_2' = \frac{E_1 - I_1'(R_1 + R_{вн1})}{R_2 + R_{вн2}}; \qquad I_3' = \frac{E_1 - I_1'(R_1 + R_{вн1})}{R_3}.$$

Затем в исходной электрической цепи исключается ЭДС E_1 (рис.2.1в). Аналогично рассчитываются токи I_1'', I_2'', I_3'' при наличии только ЭДС E_2.

Действительные токи в электрической цепи с учетом их направлений в схеме (рис.2.1а) и направлений в схемах (рис.2.1б и 2.1в) будут определяться как

$$I_1 = I_1' - I_1''; \qquad I_2 = I_2'' - I_2'; \qquad I_3 = I_3' + I_3''.$$

Метод наложения часто используется в промежуточных доказательствах других методов расчета. Для практических расчетов он используется редко, так как при частичных токах, близких по величине и противоположных по направлению, расчет может привести к недопустимо большим погрешностям.

Следует обратить внимание на то, что метод наложения ***неприменим*** *к расчету мощностей, так как значения последних пропорциональны квадрату токов*.

2.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы требуется выполнять общие правила по технике безопасности при выполнении лабораторных работ по ТОЭ.

2.6. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть данной работы.
2. Записать паспортные данные электроизмерительных приборов в табл. 1в.
3. Измерить ЭДС E_1 и E_2 источников питания. Значения E_1 и E_2, а также значения сопротивлений R_1, R_2, R_3 записать в табл. 2.1.

Таблица 2.1

E_1	E_2	R_1	R_2	R_3
В	*В*	*Ом*	*Ом*	*Ом*

4. Собрать электрическую цепь по схеме рис.2.2.
5. С помощью переключателей *SA1* и *SA2* включить в цепь один источник ЭДС E_1. Измерить токи I_1', I_2', I_3' во всех ветвях (переключатель *SA1* в положение 1, переключатель *SA2* в положение 3) цепи при действии одного источника ЭДС E_1. Показания приборов записать в табл. 2.2.

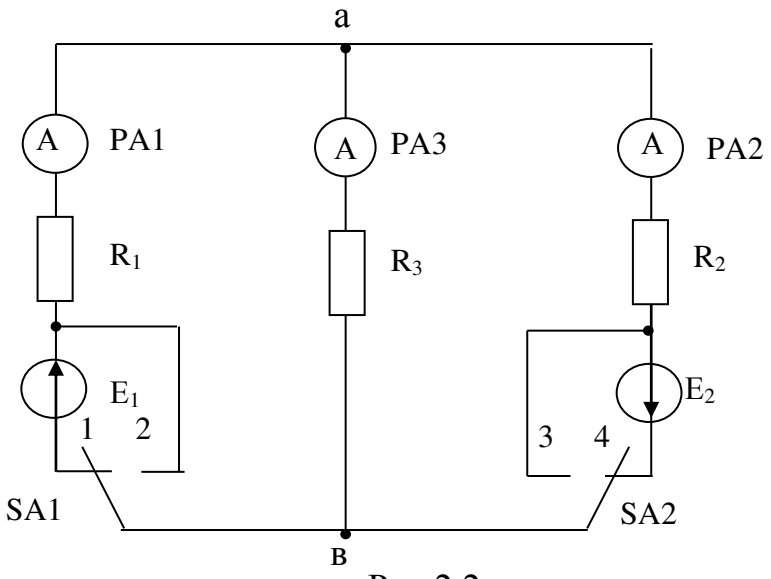


Рис.2.2

6. Отключить источник ЭДС E_1 (переключатель *SA1* перевести в положение 2, переключатель *SA2* перевести в положение 4). Включить в цепь источник ЭДС E_2. Измерить токи I_1'', I_2'', I_3'' во всех ветвях цепи при действии одного источника ЭДС E_2. Показания приборов записать в табл. 2.2.

7. Включить в цепь оба источника ЭДС E_1 и E_2. Измерить токи I_1 , I_2, I_3 во всех ветвях цепи. Результаты измерений записать в табл.2.2.

Таблица 2.2

Режим работы	Включен источник E_1			Включен источник E_2			Включены источники E_1 и E_2		
	I_1'	I_2'	I_3'	I_1''	I_2''	I_3''	I_1	I_2	I_3
	A	*A*	*A*	*A*	*A*	*A*	*A*	*A*	*A*
Эксперимент									
Расчет									

8. Используя заданные параметры цепи, рассчитать частичные токи и вычислить ток в каждой ветви, используя метод наложения. Сравнить полученные результаты с экспериментальными данными и сделать выводы по проделанной работе.

9. Выполнить индивидуальное задание № 2. Вариант задания определяется преподавателем.

2.7. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать: электрическую схему исследуемой цепи, таблицу паспортных данных приборов, таблицу опытных и расчетных данных, выводы по работе. К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание № 2. Таблицам присвоить наименование.

2.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как можно экспериментально определить сопротивление участка электрической цепи?
2. Какие электрические цепи можно рассчитывать методом наложения?
3. Как находятся токи и напряжения в сложных электрических цепях методом наложения?
4. Почему метод наложения не применим при определении мощности и энергии?
5. На каких основных законах базируется принцип наложения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3
«ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА»

3.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Определение параметров пассивного двухполюсника опытным путем на примере экспериментального определения электрических параметров катушки индуктивности.

3.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:

- вольтметры выпрямительной системы с пределом измерений 100В – 3 шт.;
- вольтметр постоянного тока с пределом измерений 100 В – 1 шт.;
- амперметр постоянного тока с пределом измерений 2А – 1 шт.;
- амперметр магнитоэлектрической системы с пределом измерений 2А – 1 шт.;
- ваттметр многопредельный – 1 шт.;
- катушка индуктивности – 1 шт.;
- магазин сопротивлений – 1 шт.

3.3. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится 2 академических часа.

3.4. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Двухполюсником называется любая электрическая цепь с двумя выделенными выводами. Двухполюсники подразделяются на два основных вида – пассивные и активные.

Пассивный двухполюсник не содержит источников энергии и может быть заменен эквивалентным по отношению к входным выводам входным (внутренним) сопротивлением $\underline{Z}_{вх}$.

Пассивный двухполюсник изображается прямоугольником с буквой «П» или вообще без всякого буквенного обозначения (рис.3.1а).

Активный двухполюсник содержит источник энергии и изображается в виде прямоугольника с буквой «А» (рис.3.1б).

Если пассивный двухполюсник включить в цепь синусоидального тока частотой f, то его входное сопротивление определяется выражением:

$$\underline{Z}_{вх} = R_{вх} + jX_{вх} = Ze^{j\varphi}.$$

Схемы замещения активного двухполюсника

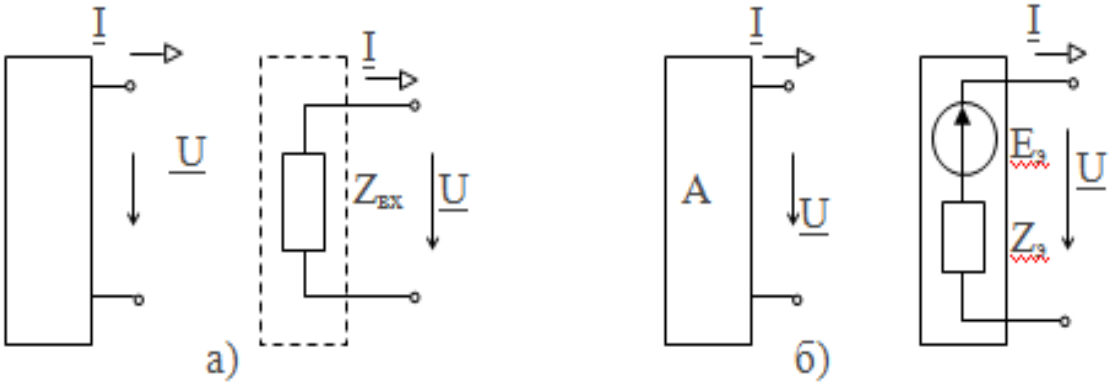


Рис. 3.1

Возможны три случая:

- если реактивное сопротивление двухполюсника $X_{вх} > 0$, то входное сопротивление имеет индуктивный характер;
- если $X_{вх} < 0$, то входное сопротивление имеет емкостный характер;
- если $X_{вх} = 0$, то входное сопротивление чисто активное.

Входное сопротивление может быть определено либо расчетным путем, если известна схема внутренних соединений двухполюсника и значения параметров, либо опытным путем.

В общем случае для экспериментального определения параметров пассивного двухполюсника может использоваться электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 3.2.

После снятия показаний измерительных приборов (при разомкнутом ключе SA) модуль полного эквивалентного сопротивления двухполюсника определяется по показаниям амперметра и вольтметра:

$$Z = \frac{U}{I}. \qquad (3.1)$$

В то же время полное эквивалентное сопротивление равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}. \qquad (3.2)$$

Схема экспериментального определения параметров
пассивного двухполюсника

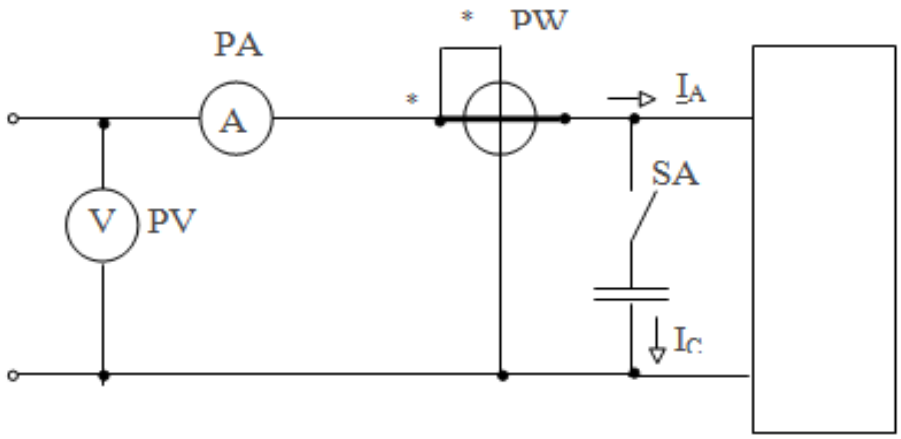


Рис.3.2

Эквивалентное активное сопротивление двухполюсника определяется как отношение активной мощности (показание ваттметра) к квадрату действующего значения тока (показание амперметра):

$$R = \frac{P}{I^2}. \qquad (3.3)$$

Коэффициент мощности всей цепи определяется отношением

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

Эквивалентное реактивное сопротивление двухполюсника определяется из формулы его полного сопротивления (3.2):

$$X = \pm\sqrt{Z^2 - R^2}\ . \qquad (3.4)$$

Активное и реактивное сопротивления также могут быть определены и через тригонометрические функции $cos\varphi$ и $sin\varphi$:

$$R = Z\,cos\varphi \quad \text{и} \quad X = Z\,sin\varphi.$$

Так как cos(-φ) = cosφ, то знак угла сдвига фаз между напряжением и током может быть положительный (реактивное сопротивление индуктивное) или отрицательный (реактивное сопротивление емкостное), поэтому проводится еще один опыт.

Для определения знака угла φ к зажимам двухполюсника путем замыкания ключа SA подключается небольшая емкость (рис. 3.2.). При этом ток в емкости IC опережает напряжение U на угол π/2 и, складываясь с основным током двухполюсника I, приводит либо к увеличению, либо к уменьшению показаний амперметра. Обозначим суммарный ток двухполюсника и конденсатора, протекающий через амперметр IA.

Из векторных диаграмм, изображенных на рис. 3.3, следует, что если показание амперметра I_A при подключении конденсатора (на векторной диаграмме обозначен штриховой линией) станет меньше, чем оно было при разомкнутом ключе, то угол φ положителен и входное сопротивление $\underline{Z} = Ze^{j\varphi}$ имеет индуктивный характер (рис. 3.3а). Если показание амперметра I_A при замыкании ключа станет больше, то угол φ отрицателен, и входное сопротивление имеет емкостный характер (рис. 3.3 б).

Векторные диаграммы пассивного двухполюсника
при параллельном подключении емкости

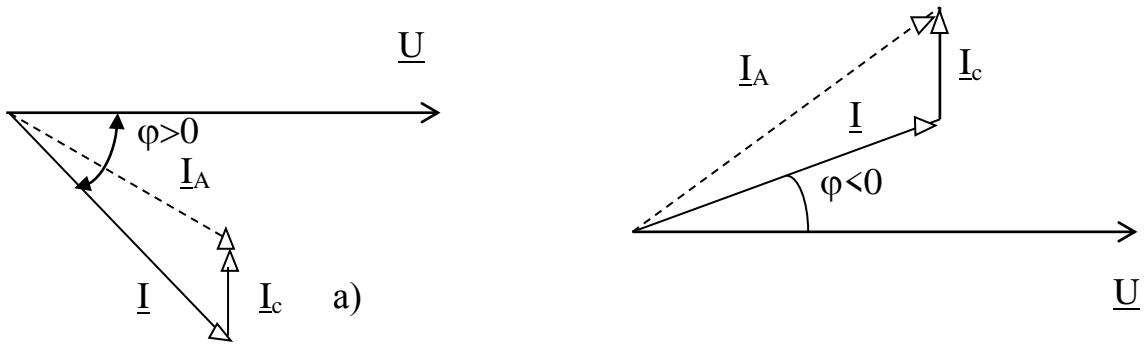


Рис. 3.3

В данной лабораторной работе в качестве двухполюсника рассматривается катушка индуктивности, параметры которой R и L могут быть определены тремя методами:

- методом амперметра и вольтметра;
- методом амперметра, вольтметра и ваттметра;
- методом трех вольтметров.

МЕТОД АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА

Если в цепь переменного тока частотой f1 включена катушка индуктивности (рис.3.4), то ее полное сопротивление Zк1 определяется уравнением

$$Z_{к1} = \frac{U}{I} = \sqrt{R_к^2 + (\omega_1 L)^2}, \qquad (3.5)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1$ - угловая частота;

$R_к$ - активное сопротивление катушки;

L - индуктивность катушки.

Схема экспериментального определения параметров катушки методом амперметра и вольтметра

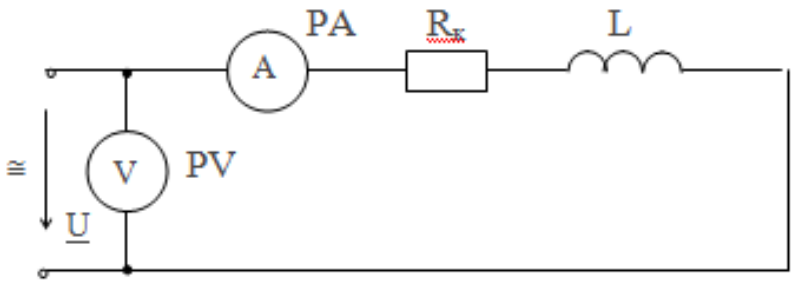


Рис.3.4

Включая ту же катушку в цепь переменного тока с частотой f_2, получим

$$Z_{к2} = \frac{U}{I} = \sqrt{R_к^2 + (\omega_2 L)^2}. \qquad (3.6)$$

Для медных и алюминиевых проводов малого сечения при низких частотах можно считать, что активное сопротивление R не зависит от частоты. Следовательно, решая уравнения (3.5) и (3.6) совместно, можно определить $R_к$ и L.

В данной работе используются две частоты: $f_1 = 0$ и $f_2 = 50$ Гц. При частоте $f_1 = 0$, то есть при постоянном токе, $X_{L1} = 2\pi f_1 L = 0$, тогда полное сопротивление $Z_{к1} = R_к$.

Включив катушку в цепь переменного тока с частотой $f_2 = 50$ Гц, определяем $Z_{к2}$:

$$Z_{к2} = \sqrt{R_к^2 + (\omega_2 L)^2}.$$

Зная $R_к$, можно определить индуктивное сопротивление X_L и индуктивность катушки L по формулам:

$$X_L = \sqrt{Z_{к2}^2 - R_к^2}\ ; \qquad L = \frac{X_L}{\omega_2} = \frac{X_L}{2\pi f_2}\ . \qquad (3.7)$$

МЕТОД АМПЕРМЕТРА, ВОЛЬТМЕТРА И ВАТТМЕТРА

При опытном определении параметров катушки данным методом используется подключение измерительных приборов к катушке по схеме рис. 3.5. При этом цепь подключается к источнику переменного тока.

Схема экспериментального определения параметров катушки методом амперметра, вольтметра и ваттметра

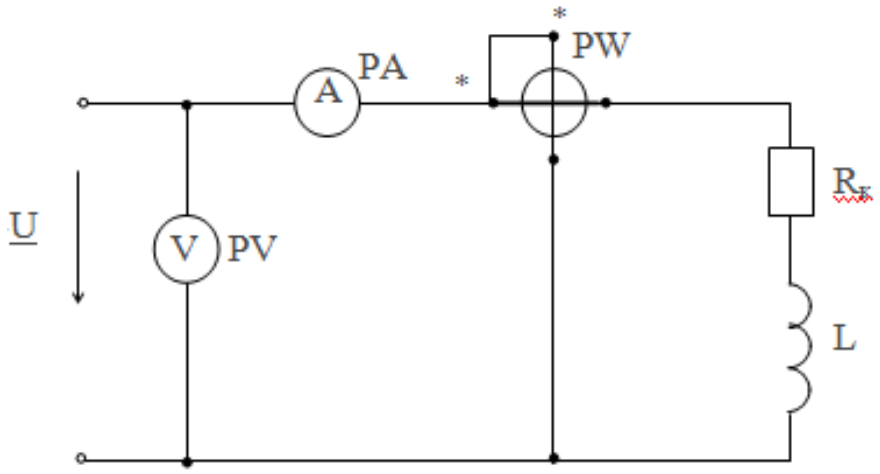


Рис.3.5

По показаниям амперметра и вольтметра можно определить модуль полного сопротивления катушки по формуле (3.1), по показаниям амперметра и ваттметра – активное сопротивление по формуле (3.3), а затем – индуктивное сопротивление X_L и индуктивность L из выражений (3.4) и (3.7).

Этот метод имеет преимущества по сравнению с методом амперметра и вольтметра в тех случаях, когда приходится учитывать зависимость активного сопротивления от частоты.

МЕТОД ТРЕХ ВОЛЬТМЕТРОВ

При определении параметров катушки этим методом в цепь необходимо включить дополнительный резистор, сопротивление которого $R_Д$ известно (рис.3.6.) и измерить напряжения на катушке $\underline{U}_к$, в сети $\underline{U}$ и на дополнительном резисторе $\underline{U}_R$.

Параметры катушки $R_к$ и L определяются из топографической диаграммы, которую строят по показаниям трех вольтметров (рис.3.7).

Для электрической цепи (рис.3.6) можно записать уравнение по второму закону Кирхгофа в виде: $\underline{U} = \underline{U}_к + \underline{U}_Д$. Векторы этих напряжений образуют замкнутый треугольник АВС.

Построение топографической диаграммы сводится к задаче построения треугольника АВС по трем сторонам. Напряжение на катушке $\underline{U}_к$, можно разложить на две составляющие – активную $\underline{U}_{ка}$ и реактивную $U_{кр}$, опустив перпендикуляр из точки С на направление тока $\underline{I}$ (отрезок СД на топографической диаграмме).

Схема экспериментального определения параметров катушки методом трех вольтметров

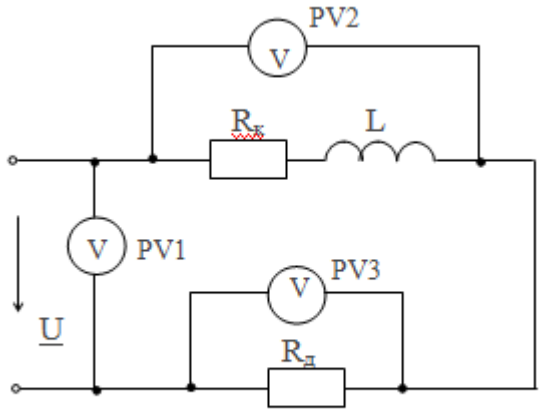


Рис.3.6

Построение векторной диаграмма токов и напряжений при определении параметров катушки методом трех вольтметров

Так как по всей цепи течет один и тот же ток, то треугольник напряжений подобен треугольнику сопротивлений (рис.3.8). Значит, отрезок АВ в масштабе сопротивлений представляет собой сопротивление $R_Д$, отрезок АС – полное сопротивление цепи Z, отрезок ВС – полное сопротивление катушки $Z_к$, отрезок ВД – активное сопротивление катушки $R_к$,
отрезок СД – индуктивное сопротивление катушки X_L.

Ток в цепи определяется по показаниям вольтметра PV3:

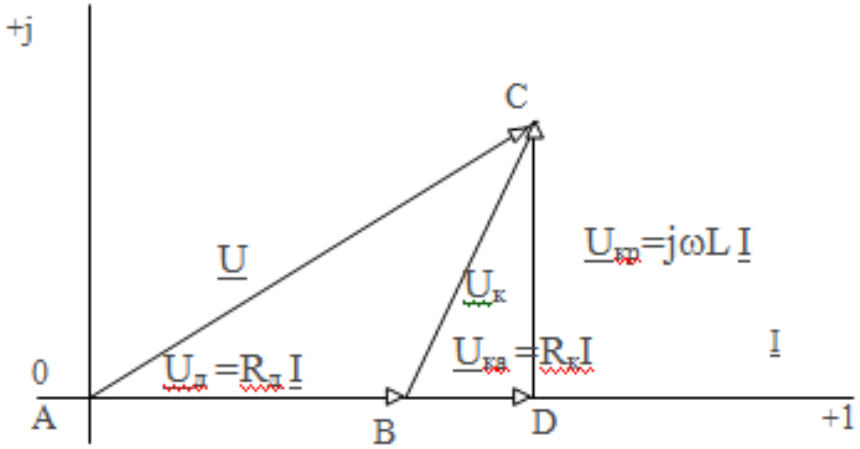


Рис.3.7

$$I = \frac{U_Д}{R_Д}.$$

Диаграмма сопротивлений электрической цепи по рис.3.6

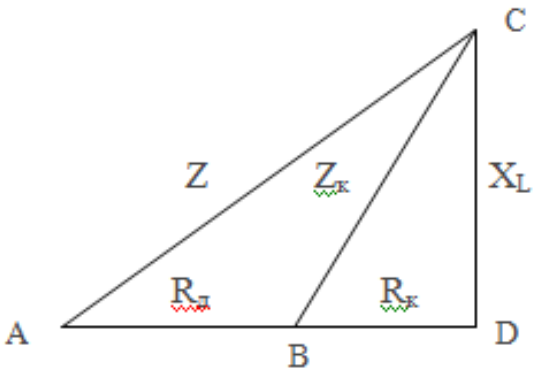


Рис.3.8

Параметры $R_к$ и L определяются либо непосредственно из топографической диаграммы, построенной в масштабе сопротивлений (рис.3.8.), либо из системы уравнений

$$\begin{cases} U_{кр}^2 = U_к^2 - U_{ка}^2 \\ U_{кр}^2 = U^2 - (U_{ка} + U_Д)^2. \end{cases}$$

Приравнивая правые части уравнений, определяем $U_{ка}$ и далее параметры катушки:

$$R_к = \frac{U_{ка}}{I};\ Z_к = \frac{U_k}{I};\ X_L = \sqrt{Z_к^2 - R_к^2};\quad L = \frac{X_L}{\omega}.$$

3.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы требуется выполнять общие правила по технике безопасности при выполнении лабораторных работ по ТОЭ.

3.6. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть данной работы.
2. Записать паспортные данные электроизмерительных приборов в таблицу 1.в.
3. Собрать электрическую цепь по схеме рис.3.4. Снять показания приборов на постоянном, а затем на переменном токе и вычислить параметры $R_к$ и L катушки первым методом. Результаты записать в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

Вид напряжения на входе цепи	Результаты измерений		Результаты вычислений			
	U	I	$R_к$	$Z_к$	X_L	L
	В	А	Ом	Ом	Ом	Гн
Постоянное						
Переменное						

4. Собрать цепь по схеме рис.3.5. Снять показания приборов, вычислить параметры $R_к$ и L катушки. Результаты измерений и вычислений занести в таблицу 3.2.
5.

Таблица 3.2

Результаты измерений			Результаты вычислений			
U	I	P	$Z_к$	$R_к$	X_L	L
В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн

6. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 3.6. Снять показания приборов и записать в табл. 3.3. По показаниям приборов в масштабе построить топографическую диаграмму для данной цепи и вычислить параметры $R_к$ и L катушки. Результаты записать в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Результаты измерений			Результаты вычислений			
U	$U_к$	$U_д$	I	$R_к$	X_L	L
В	В	В	А	Ом	Ом	Гн

6. Выполнить индивидуальное задание № 3. Вариант задания определяется преподавателем.

3.7. ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

По данным каждого опыта вычислить электрические параметры катушки индуктивности $R_к$ и L. Сравнить полученные результаты и сделать выводы по работе.

3.8. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать схемы электрических цепей, таблицу приборов, таблицы опытных и расчетных данных, все необходимые вычисления, топографическую векторную диаграмму, выводы. К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №3. Таблицам присвоить наименование.

3.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется двухполюсником?
2. Что представляет собой активный (пассивный) двухполюсник?
3. Как определяются параметры пассивного двухполюсника опытным путем?
4. Как определяется характер реактивного сопротивления ?
5. Как определить параметры катушки индуктивности с помощью амперметра и вольтметра?
6. Как определить параметры катушки индуктивности с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра?
7. Как определить параметры катушки индуктивности методом трех вольтметров?
8. Каковы преимущества и недостатки всех трех методов определения параметров катушки?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

«ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРА»

4.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Опытным путем проверить законы Ома и Кирхгофа для цепи с R,L,C. Приобрести навыки в построении векторных диаграмм. Исследовать особенности резонансной цепи.

4.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:

- вольтметры для измерений переменного напряжения с пределом измерений 100 В –3 шт.;
- амперметры для измерений переменного тока с пределом измерений 2 А – 1 шт.;
- катушка индуктивности;
- батарея конденсаторов.

4.3. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится 2 академических часа.

4.4. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Если к неразветвленной цепи (рис.4.1а), состоящей из активного сопротивления R , индуктивности L и емкости C приложено синусоидальное напряжение $u = U_m sin(\omega t + \psi_u)$, то по цепи пойдет синусоидальный ток $i = I_m sin(\omega t + \psi_i)$.

Согласно второму закону Кирхгофа мгновенное значение напряжения $u = u_R + u_L + u_c$ или в комплексной форме $\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C$.

Построим на комплексной плоскости векторную диаграмму (рис.4.1б), из которой следует, что напряжение на входе цепи представляет собой векторную сумму напряжений на отдельных участках:

$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$ или в комплексной форме $\underline{U} = \underline{U}_R + jU_L - jU_C$.

Разделив правые и левые части уравнений на ток, получим аналогичные уравнения и диаграмму для сопротивлений (рис.4.1в):

$$R = \sqrt{R_R^2 + (X_L - X_C)^2} \qquad \text{или} \qquad \underline{Z} = R + jX_L - jX_C .$$

Аналогично получим уравнения и диаграмму мощностей (рис.4.1г):

$$S = \sqrt{P_R^2 + (Q_L - Q_C)^2} \qquad \text{или} \qquad \underline{S} = P_A + jQ_L - jQ_C ,$$

или $\tilde{S} = P + jQ_L - jQ_C = P + j(Q_L - Q_C)$.

Схема электрической цепи при последовательном соединении активного сопротивления, индуктивности и емкости (а), векторная диаграмма токов и напряжений (б) и диаграммы сопротивлений (в) и мощностей (г)

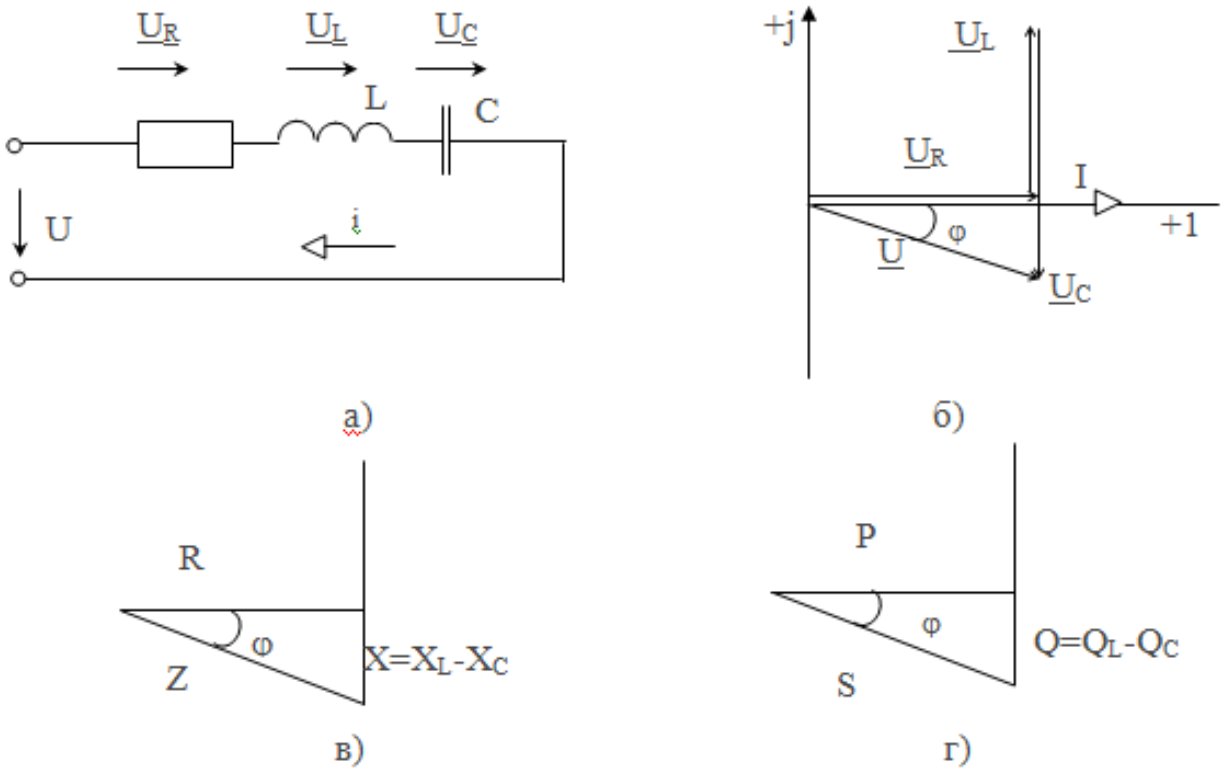


Рис. 4.1

Треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей подобны, следовательно, угол сдвига фаз может быть определен по уравнениям:

$$\varphi = arccos\frac{U_a}{U}; \qquad \varphi = arccos\frac{R}{Z}; \qquad \varphi = arccos\frac{P}{S}.$$

В зависимости от соотношения между реактивными сопротивлениями X_L и X_C угол φ может быть положительным, отрицательным и равным нулю.

Цепь, состоящая из последовательно соединенных активного сопротивления *R,* индуктивного *L,* емкостного *C*, представляет собой пассивный двухполюсник. Если пассивный двухполюсник содержит *R, L, C* и его суммарное реактивное входное сопротивление равно нулю, то такой двухполюсник находится в резонансном режиме.

Резонанс, в самом широком смысле, возникает в результате совпадения собственных и вынужденных колебаний той или иной системы. В электрической цепи при резонансе частота подведенного переменного напряжения *f* совпадает с собственной частотой контура f_0.

В цепи с последовательно соединенными элементами имеет место **резонанс напряжений**, так как он возникает при равенстве $U_L = U_C$, что возможно только при равенстве реактивных сопротивлений $X_L = X_C$. Так как

$X_L = 2\pi \cdot f \cdot L$, а $X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$, то при резонансе $2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC}$

или $4\pi^2 f^2 LC = 1$, отсюда определяется частота, которая и является частотой собственных колебаний контура:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Из этого выражения видно, что резонанс напряжений в рассматриваемой электрической цепи может быть получен путем изменения частоты входного напряжения или одного из параметров цепи (L или C).

Из анализа приведенных выше уравнений и векторных диаграмм следует, что при резонансе напряжений:

- входное сопротивление двухполюсника чисто активное;
- ток и напряжение на входе цепи совпадают по фазе;
- ток в цепи достигает максимального значения;
- полная мощность равна активной мощности;
- коэффициент мощности цепи $\cos\varphi = 1$;
- при резонансе напряжения на индуктивности U_L и конденсаторе U_C могут значительно превышать входное напряжение U.

4.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы следует выполнять общие правила по технике безопасности при выполнении лабораторных работ по ТОЭ.

4.6. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть данной работы.
2. Записать паспортные данные измерительных приборов в таблицу 1в.
3. Собрать электрическую цепь по схеме рис.4.2. После проверки ее преподавателем или лаборантом включить питание.

Схема экспериментальной установки для изучения режимов работы последовательной R,L,C цепи

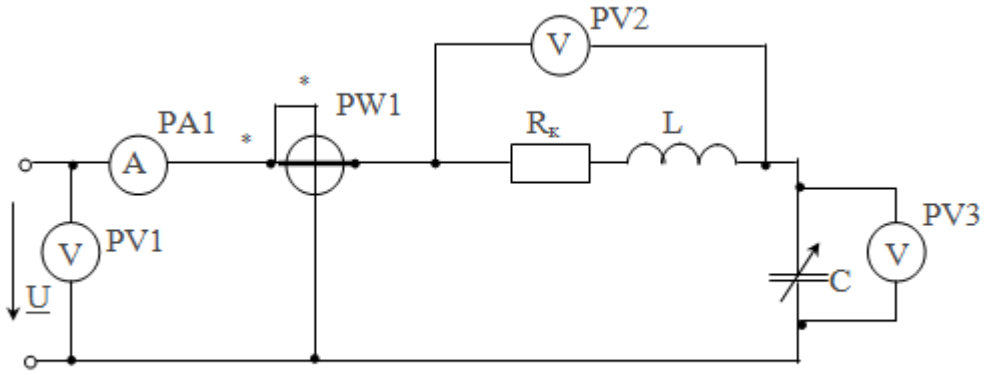


Рис.4.2

4. Постепенно увеличивая емкость конденсатора, начиная с нуля, проследить за изменением показаний приборов. Показания приборов (6-7 точек) записать в таблицу 4.1.

Таблица 4.1

№	Результаты измерений					Результаты вычислений										
	U_1	I	P	U_2	U_3	Z	Z_k	R_n	X_L	L	U_L	X_C	C	$cos\varphi$	S	Q
	В	А	Вт	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Гн	В	Ом	Ф	-	ВА	вар

5. Выполнить индивидуальное задание № 4, приведенное в приложении. Номер варианта получить у преподавателя.

4.7. ОБРАБОТКА ОПЫТНЫХ ДАННЫХ

1. Пользуясь показаниями приборов, провести расчеты по формулам:

$$Z = \frac{U}{I};\ Z_k = \frac{U_2}{I};\ R_k = \frac{P}{I^2};\ X_L = \sqrt{Z_k^2 - R_2^2};\ L = \frac{X_L}{\omega};\ U_L = I \cdot X_L;$$

$$X_C = \frac{U_3}{I}; \quad C = \frac{1}{\omega X_C}; \quad \cos\varphi = \frac{P}{UI}; \quad S = UI;$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} = UI\sin\varphi = I^2\left(X_L - X_C\right).$$

2. По данным таблицы 4.1 построить в масштабе векторные диаграммы для трех случаев:

а) до резонанса;

б) при резонансе;

в) после резонанса.

3. Из условия резонанса определить значение резонансной емкости.

4. На основании расчетов построить на одном рисунке графики:

$I = f(C)$; $U_L = f(C)$; $U_C = f(C)$.

4.8. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать электрическую схему исследуемой цепи, таблицы приборов, опытных и расчетных данных, векторные диаграммы и графики.

В конце необходимо провести анализ результатов и сделать выводы. К каждому отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №4.

4.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Как экспериментально определить параметры активного двухполюсника при помощи амперметра, вольтметра и ваттметра?

2. Что называется резонансом?

3. Какие параметры должна содержать резонансная электрическая цепь?

4. Как должны быть соединены элементы электрической цепи, чтобы был возможен резонанс напряжений?

5. Что является условием резонанса напряжений?

6. По какой из кривых $U_L(C)$; $U_C(C)$; $U_R(C)$; $I(C)$; $U_к(C)$ можно судить о наступлении резонанса напряжений?

7. Сформулируйте законы Кирхгофа для переменного тока в символической форме.

8. Напишите формулу для вычисления комплекса тока для электрической цепи с последовательным соединением элементов: *R,L,C; R,C; R,L.*

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 «**ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШКИ И КОНДЕНСАТОРА**»

5.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение явления резонанса токов, исследование особенностей резонансной цепи при параллельном соединении катушки индуктивности и емкости, приобретение навыков в построении векторных диаграмм, а также изучение способа увеличения коэффициента мощности цепи при помощи статических конденсаторов.

5.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:

- вольтметр выпрямительной системы с пределом измерений 100 В – 1 шт.;
- амперметр выпрямительной системы с пределом измерений 2А – 3 шт.;
- ваттметр электродинамической системы многопредельный – 1 шт.;
- катушка индуктивности;
- батарея конденсаторов.

5.3. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится 2 академических часа.

5.4. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Цепь, изображенная на рис.5.1а, состоит из двух параллельных ветвей. На вход цепи подано напряжение $u = U_m \sin \omega t$.

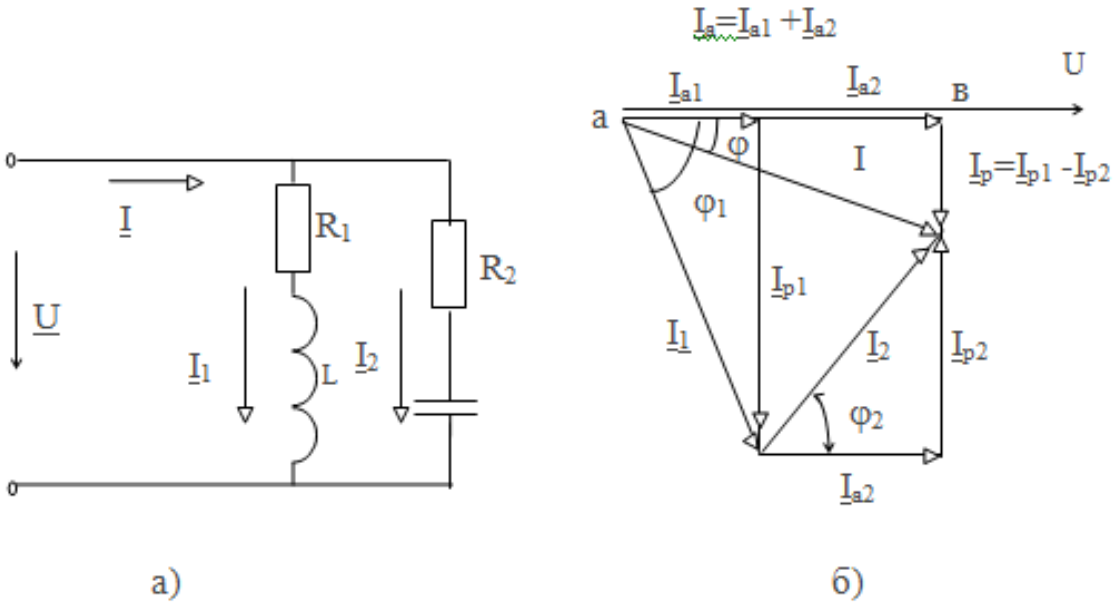
Первая ветвь источника питания является активно-индуктивной, а вторая активно-емкостной. Поэтому ток $\underline{I_1}$ отстает по фазе от напряжения $\underline{U}$ на угол φ_1, а ток $\underline{I_2}$ опережает это напряжение $\underline{U}$ на угол φ_2 (рис.5.1 б).

Токи в параллельных ветвях $i_1 = I_{m1} \sin(\omega t - \varphi_1)$, $i_2 = I_{m2} \sin(\omega t + \varphi_2)$.

Ток в неразветвленной части цепи по первому закону Кирхгофа равен:

$$i = i_1 + i_2 \quad \text{или} \quad \underline{I} = \underline{I_1} + \underline{I_2}.$$

Схема (а) и векторная диаграмма токов и напряжений
(б) при параллельном включении катушки и конденсатора



а) б)

Рис.5.1

Ток *I* в неразветвленной части цепи можно рассчитать двумя способами:

- используя векторную диаграмму;
- используя полную проводимость цепи.

1-й способ. Токи $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$ (рис.5.1б) можно разложить на активную и реактивную составляющие $\underline{I}_{a1}$, $\underline{I}_{a2}$; $\underline{I}_{p1}$ и $\underline{I}_{p2}$. Анализ векторной диаграммы показывает, что

$$I = \sqrt{I_a^2 + I_p^2}\,, \qquad (5.1)$$

где

$$\underline{I}_a = \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2.} \quad и \quad \underline{I}_p = \underline{I}_{p1} - \underline{I}_{p2}\,. \qquad (5.2)$$

Активные и реактивные составляющие токов $\underline{I}_1$, или $\underline{I}_2$ определяются следующим образом:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}};$$

$$I_{a1} = I_1 \cdot cos\,\varphi_1;$$

$$I_{p1} = I_1\, sin\,\varphi_1,$$

где $\cos\varphi_1 = \dfrac{R_1}{Z_1}$; $\sin\varphi_1 = \dfrac{\omega L_1}{Z_1}$.

Аналогично

$$I_2 = \frac{U}{Z_2} = \frac{U}{\sqrt{R_2^2 + (\omega C)^2}};$$

$$I_{a2} = I_2 \cdot cos\,\varphi_2;$$

$$I_{p2} = I_2\, sin\,\varphi_2,$$

где $\cos\varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}$; $\sin\varphi_2 = \frac{\omega L_2}{Z_2}$.

Активная мощность в первой ветви $P_1 = U \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1$;

во второй ветви $P_2 = U \cdot I_2 \cdot \cos\varphi_2$;

во всей цепи $P = \frac{1}{T}\int_0^T u \cdot i \cdot dt = UI\,cos\,\varphi$ или $P = P_1 + P_2$.

Реактивная мощность в первой ветви $Q_1 = U \cdot I_1 \cdot \sin\varphi_1$;

во второй ветви $Q_2 = U \cdot I_2 \cdot \sin\varphi_2$;

во всей цепи $Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$; $Q = Q_1 - Q_2$.

Соответственно полные мощности равны:

$$S_1 = UI_1; \qquad S_2 = UI_2; \qquad S = UI.$$

Рассмотренный способ расчета цепей при большом числе (больше двух) параллельных ветвей становится громоздким. Для расчета разветвленной цепи с большим числом ветвей обычно пользуются более простым методом проводимостей.

2-й способ. Известно, что проводимостью участка цепи называется величина, обратная его сопротивлению. Следовательно, если все элементы векторной диаграммы токов (рис.5.1б) поделить на значение напряжения на входе цепи, получится диаграмма проводимостей, подобная диаграмме токов (рис.5.2).

Из диаграммы проводимостей следует, что полная проводимость цепи

$$Y = \sqrt{q^2 + b^2} = \sqrt{(q_1 + q_2)^2 + (b_L - b_C)^2},$$

где Y - полная проводимость цепи;

q - активная проводимость;

b - реактивная проводимость.

Активная составляющая тока совпадает с напряжением на входе по фазе

$$I_{a1} = I_1 \cos\varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \frac{R_1}{Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2} = U q_1 .$$

Величина $q_1 = \frac{R_1}{Z_1^2}$ и есть активная проводимость первой ветви.

Аналогично, $q_2 = \frac{R_2}{Z_2^2}$ - активная проводимость второй ветви.

Активная проводимость всей цепи $q = q_1 + q_2$.

Диаграмма проводимостей

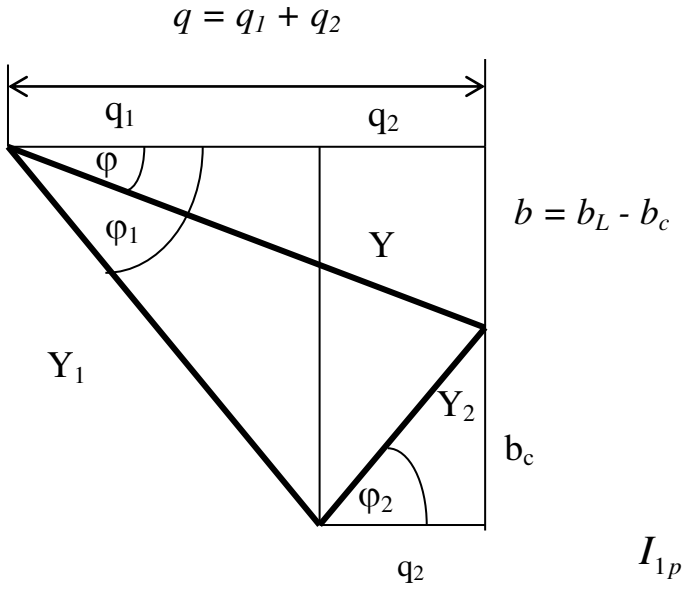


Рис. 5.2

Реактивная проводимость первой ветви b_L определена по реактивной составляющей тока. Реактивная составляющая тока сдвинута относительно напряжения на угол + π/2 (для емкостного сопротивления) или -π/2 (для индуктивного).

$$I_{1p} = I_1 \sin\varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \cdot \frac{X_L}{Z_1} = U \frac{X_L}{Z_1^2} = U \cdot b_L$$

,

то есть реактивная проводимость первой ветви

$$b_L = \frac{X_L}{Z_1^2} ,$$

реактивная проводимость второй ветви

$$b_C = \frac{-X_C}{Z_2^2} = -b_{C2} ,$$

отсюда полная реактивная проводимость цепи

$$b = b_L - b_C .$$

Угол сдвига фаз между напряжением на входе $\underline{U}$ и общим током $\underline{I}$ находится из соотношения

$$tg\varphi = \frac{b}{q} \quad \text{или} \quad \cos\varphi = \frac{q}{Y} \quad \text{или} \quad \sin\varphi = \frac{b}{Y}.$$

Итак, при использовании метода проводимостей для определения тока цепи нет необходимости определять токи в ветвях, а достаточно определить полную проводимость Y, тогда $I = UY$.

Активная мощность всей цепи $P = P_1 + P_2 = U^2 q$.

Реактивная мощность всей цепи $Q = Q_L - Q_C = U^2 b$.

Полная мощность всей цепи $S = U^2 Y$.

Явление резонанса.

В цепи с параллельно включенными катушкой индуктивности и конденсатором общий ток цепи может либо отставать на угол φ от напряжения при $I_{p1} > I_{p2}$, либо опережать его при $I_{p1} < I_{p2}$, либо совпадать по фазе при $I_{p1} = I_{p2}$.

В последнем случае имеет место резонанс токов. На рис.5.3 приведена векторная диаграмма при резонансе токов.

Векторная диаграмма электрической цепи при параллельном включении катушки и конденсатора при резонансе токов

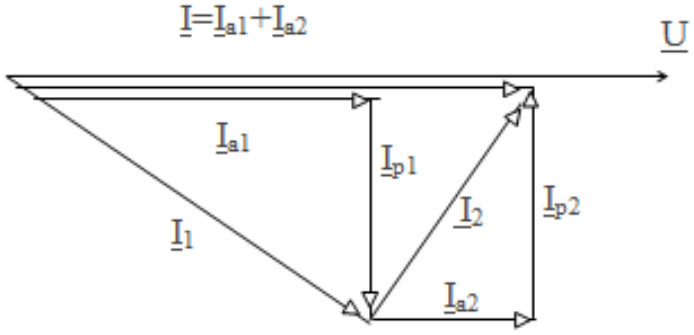


Рис.5.3

Активные составляющие токов в параллельных ветвях $\underline{I}_{a1}$ и I_{a2} совпадают по фазе с напряжением, а реактивные $\underline{I}_{p1}$ и $\underline{I}_{p2,}$ сдвинутые на 180^0, полностью компенсируют друг друга.

Поэтому общий ток цепи $\underline{I} = \underline{I}_{a1} + \underline{I}_{a2}$.

При этом угол сдвига фаз общего тока цепи и напряжения равен нулю.

Так как $I_{p1} = Ub_L$, а $I_{p2} = Ub_C$, то при резонансе $Ub_L = Ub_C$ или $b_L = b_C$.

Реактивная проводимость всей цепи

$$b = b_L - b_C = \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} - \frac{1/\omega C}{R_2^2 + (\frac{1}{\omega C})^2} = 0.$$

Если это уравнение решить относительно частоты, то получим

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}}.$$

Из уравнения видно, что резонансная частота ω_p зависит не только от L и C, но и от активных сопротивлений R_1 и R_2. В частном случае, когда активные сопротивления малы и ими можно пренебречь, или при $R_1 = R_2$ резонансная частота $\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$, то есть совпадает с частотой резонанса напряжений. При резонансе полная проводимость цепи имеет наименьшее значение. Полное сопротивление цепи $Z = 1/Y$ становится наибольшим. При максимальном сопротивлении общий ток становится наименьшим (рис.5.4), он совпадает по фазе с напряжением на входе цепи, $\varphi = 0$, $\cos\varphi = 1$ (см. рис.5.3).

Характер зависимости полного сопротивления и тока всей цепи от частоты показан на рис.5.4.

Зависимость силы тока и полного сопротивления цепи от значения емкости при ее параллельном подключении к катушке

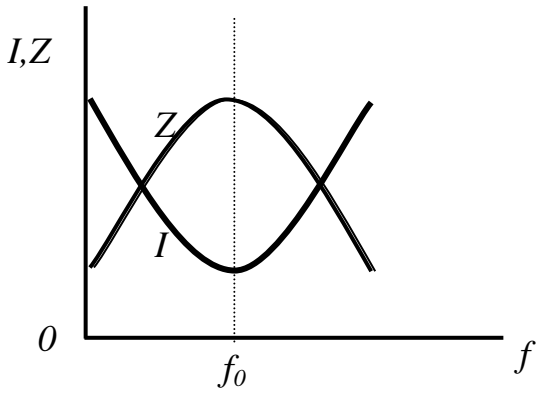


Рис.5.4

При резонансе токи I_1 и I_2 могут быть значительно больше I. Это объясняется тем, что реактивные составляющие токов $\underline{I}_1$ и $\underline{I}_2$ взаимно уравновешиваются и поэтому не влияют на ток в неразветвленной части цепи.

Общий ток в цепи в большей степени зависит от активных сопротивлений цепи ветвей R_1 и R_2. С уменьшением этих сопротивлений уменьшается активная мощность $P_1 = I_1^2 R_1$ и $P_2 = I_2^2 R_2$. Если сопротивления $R_1 = R_2 = 0$, то имеет место идеальный колебательный контур, у которого $I_{a1} = I_{a2} = 0$, $I = 0$, $Z \to \infty$.

В таком контуре между индуктивностью и конденсатором происходит обмен электромагнитной энергии без потерь, и такой колебательный контур называется незатухающим. Однако в реальных электрических цепях всегда имеют место активные сопротивления и, следовательно, колебательные контуры называются затухающими.

При резонансе реактивная мощность всей цепи равна нулю $Q_L = Q_C$, а $Q_L - Q_C = 0$.

Использование резонанса токов позволяет улучшить коэффициент мощности электрических установок промышленных предприятий. Кроме того, резонанс токов широко используется в радиотехнических цепях.

5.5. СПОСОБЫ УЛУЧШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ

Улучшить коэффициент мощности можно двумя способами – **естественным и искусственным.**

Способы повышения коэффициента мощности, связанные с правильным выбором оборудования, называются **естественными**.

Электродвигатели и трансформаторы нужно выбирать по требуемой мощности, не допускать их недогрузки и особенно работы вхолостую, поскольку при этом их коэффициент мощности ниже номинального.

Во многих случаях естественные способы повышения $\cos\varphi$ дополняются **искусственными**. При одном из них параллельно нагрузке подключаются статические конденсаторы (компенсационная установка) (рис.5.5а). Векторная диаграмма такой цепи показана на рис. 5.5б).

Ток нагрузки приемника $\underline{I}_н$ отстает от напряжения на угол $\varphi_н$, а ток конденсатора $\underline{I}_c$ опережает это же напряжение на угол 90^0. Общий ток цепи $\underline{I}$ равен геометрической сумме токов $\underline{I}_н$ и $\underline{I}_c$.

Таким образом, реактивная составляющая тока нагрузки частично или полностью компенсируется током конденсатора $\underline{I}_c$.

Для определения емкости конденсаторов компенсационной установки реактивную мощность выразим через неизменную активную мощность P нагрузки.

До включения конденсаторов реактивная мощность цепи

$$Q_н = P \cdot tg\varphi_н ,$$

Схема и векторные диаграммы цепи при повышении коэффициента мощности

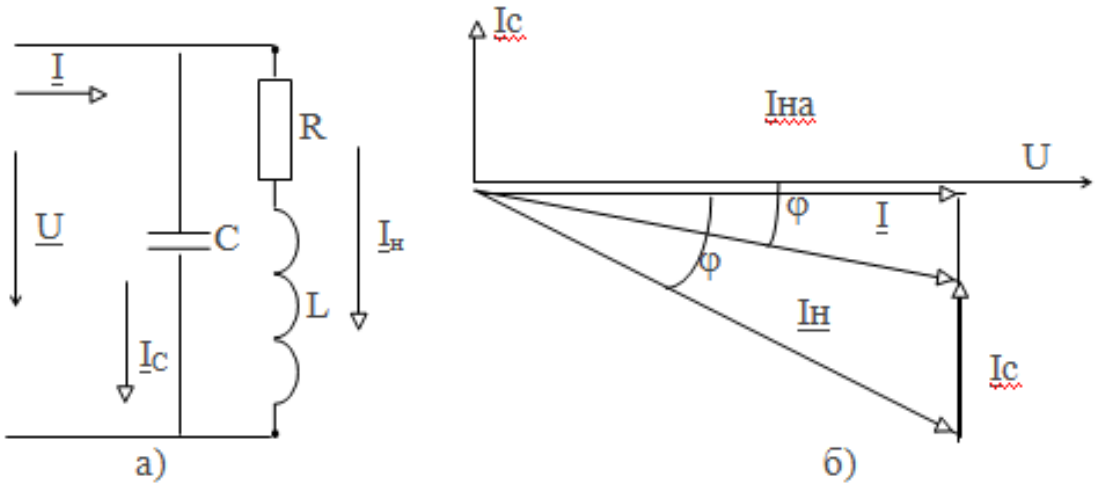


Рис.5.5

а после их подключения

$$Q = P \cdot tg\varphi .$$

Реактивная мощность статических конденсаторов

$$Q_c = Q_n - Q = P(tg\varphi_н - tg\varphi).$$

Эту же мощность выразим через напряжение сети U и проводимость конденсаторов:

$$Q_c = U^2 bc = U^2 \omega G = U^2 2\pi fC.$$

Следовательно, $P(tg\varphi_н - tg\varphi) = U^2 2\pi fC$. Отсюда емкость конденсаторов, необходимую для повышения коэффициента мощности до значения $cos\varphi_н$, можно вычислить из выражения

$$C = \frac{P(tg\varphi_н - tg\varphi)}{U^2 2\pi f}.$$

При полной компенсации φ = 0, отсюда

$$C = \frac{P \cdot tg\varphi_н}{U^2 2\pi f}.$$

Однако для полной компенсации реактивной составляющей тока требуется значительная емкость конденсаторов, что в ряде случаев экономически невыгодно, поэтому чаще делают частичную компенсацию, т.е. улучшают коэффициент мощности до некоторого заданного значения.

5.6. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы требуется соблюдать общие правила по технике безопасности при выполнении лабораторных работ по ТОЭ.

5.7. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть данной работы.
2. Записать паспортные данные электроизмерительных приборов в таблицу 1в.
3. Собрать электрическую цепь по схеме рис.5.6.
4. Постепенно увеличивая емкость от нуля, проследить за изменением показаний приборов. Для 6-7 точек записать показания приборов в таблицу 5.1.

Схема лабораторной установки

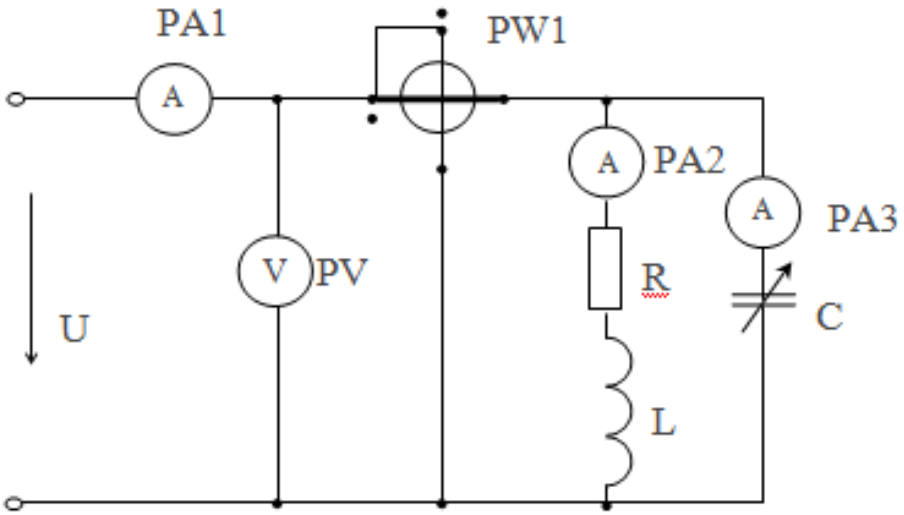


Рис.5.6

Таблица 5.1

Результаты измерений					Результаты вычислений												
U	I_1	I_2	I_3	P	Z_Z	R_K	X_R	L	$Cos\varphi_k$	X_c	C	$Cos\varphi$	q	b	Y	S	Q
В	А	А	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	-	Ом	мкФ	-	См	См	См	ВА	вар

5. Выполнить индивидуальное задание № 5, приведенное в Приложении. Номер варианта индивидуального задания получить у преподавателя.

5.8. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

1. Пользуясь показаниями приборов, рассчитать параметры цепи, коэффициентов мощности катушки и цепи.

2. На основании опытов и расчетов построить в одних координатах зависимости: $I_1 = f_1(C)$; $I_2 = f_2(C)$ и $I_3 = f_3(C)$.

3. Из графика $I = f_1(C)$ определить значение резонансной емкости.

4. По данным таблицы 5.1 построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжений для трех случаев: до резонанса; при резонансе; после резонанса.

5. Выполнить индивидуальное задание № 5, приведенное в приложении. Номер варианта получить у преподавателя.

5.9. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать электрическую схему исследуемой цепи, таблицу приборов, опытных и расчетных данных, результаты расчетов, векторные диаграммы, графики и выводы.

В выводах по работе обратить внимание на особенности исследуемой цепи, компенсацию фазового сдвига, фактическое использование явления резонанса тока. К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №5. Таблицам присвоить наименование.

5.10. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется резонансом?

2. Что такое резонанс токов и каковы особенности цепи, в которой возможно это явление?

3. Какие параметры должна содержать резонансная электрическая цепь?

4. Что является условием резонанса токов?

5. Что такое компенсация сдвига фаз?

6. Чему равны активная и реактивная мощности параллельной цепи при резонансе?

7. Как вычислить полную проводимость электрической цепи при параллельном соединении катушки и реального конденсатора?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6
«ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ТРАНСФОРМАТОРА»

6.1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Опытное определение параметров трансформатора без ферромагнитного сердечника.

6.2. ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

- воздушный трансформатор – 1 шт.;
- вольтметры с пределом измерений до 100В – 2 шт.;
- амперметры с пределом измерений 2А – 2 шт.;
- ваттметр электродинамической системы – 1 шт.;
- реостат или магазин сопротивлений – 1 шт.

6.3. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится 4 академических часа.

6.4. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Воздушным трансформатором называется трансформатор без ферромагнитного сердечника.

Такие трансформаторы служат для преобразования переменного напряжения и применяются в измерительных устройствах при низких и высоких частотах переменного тока.

Трансформатор имеет две или несколько индуктивно связанных катушек. В настоящей работе исследуется простейший двухобмоточный воздушный трансформатор (без ферромагнитного сердечника). Схематическое изображение его показано на рис.6.1.

Если к одной из обмоток трансформатора подвести переменное напряжение, то по ней пойдет переменный ток. Магнитное поле этого тока в соответствии с законом электромагнитной индукции наведет в другой обмотке переменную ЭДС. Обмотка трансформатора, к которой подводится напряжение, называется первичной, а обмотка, с которой снимается преобразованное напряжение, вторичной.

Один из выводов каждой обмотки трансформатора называют началом, а другой – ее концом. Начало каждой обмотки на схеме электрической цепи обозначают звездочкой (*) или точкой (●).

Упрощенная схема замещения воздушного трансформатора

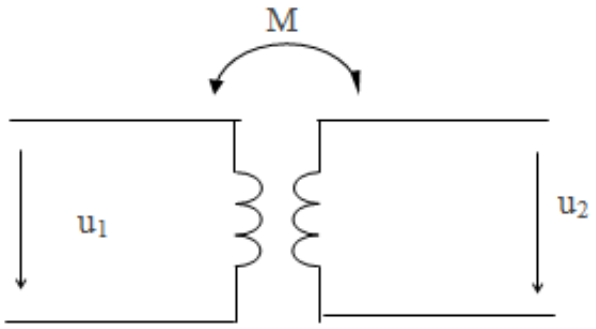


Рис.6.1

Для выяснения, какие выводы двух обмоток следует считать одноименными, руководствуются следующим: при одинаковом относительно одноименных зажимов направлении токов в каждой обмотке созданные этими токами магнитные потоки имеют одинаковое направление (рис.6.2).

Направления магнитных потоков при согласном включении катушек

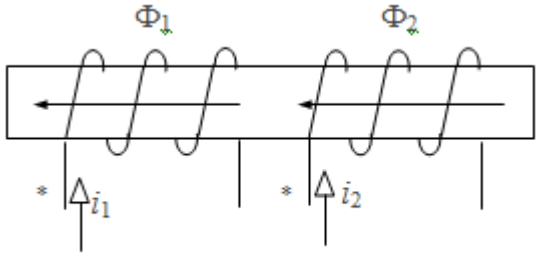


Рис.6.2

При наличии переменного тока i_1 в первичной обмотке внутри нее создается переменный магнитный поток Φ_1. Все витки первичной w_1 и часть витков вторичной w_2 обмоток сцепляются с ним. Потокосцепление первичной обмотки, пропорциональное току первичной обмотки, называют потокосцеплением самоиндукции:

$$\psi_{11} = w_1 \cdot \Phi_{11} = L_1 \cdot i_1 .$$

Потокосцепление вторичной обмотки, также пропорциональное току первичной обмотки, называют потокосцеплением взаимной индукции:

$$\psi_{21} = w_2 \cdot \Phi_{21} = M_{21} \cdot i_1 .$$

Аналогично, если переменный ток будет протекать по вторичной обмотке i_2, то созданный в результате этого переменный магнитный поток Φ_2 будет сцепляться с витками вторичной и первичной обмоток. В этом случае потокосцепление самоиндукции равно:

$$\psi_{22} = w_2 \cdot \Phi_{22} = L_2 \cdot i_2 ,$$

а потокосцепление взаимной индукции

$$\psi_{12} = w_1 \cdot \Phi_{12} = M_{12} \cdot i_2 .$$

Коэффициенты пропорциональности L_1, L_2, $M_{12} = M_{21} = M$ называются соответственно: собственными индуктивностями первичной L_1 и вторичной L_2 обмоток и взаимной индуктивностью M двух обмоток.

Чем больше взаимная индуктивность M обмоток, тем сильнее их индуктивная связь. Обычно о степени индуктивной связи двух обмоток судят по так называемому коэффициенту связи k:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} . \qquad (6.1)$$

Коэффициент связи всегда меньше единицы из-за наличия рассеяния магнитных потоков. Чем он ближе к единице, тем сильнее магнитная связь катушек.

Созданные токами i_1 и i_2 магнитные потоки индуктируют в обеих обмотках ЭДС самоиндукции e_{L1} и e_{L2} и ЭДС взаимоиндукции e_{M1} и e_{M2}:

$$e_{L1} = -L_1 \cdot \frac{di_1}{dt}; \qquad e_{L2} = -L_2 \cdot \frac{di_2}{dt};$$

$$e_{M1} = -M \cdot \frac{di_2}{dt}; \qquad e_{M2} = -M \cdot \frac{di_1}{dt}.$$

Эти ЭДС в символической (комплексной) форме записываются так:

$$\underline{E}_{L1} = -j\omega L_1 \cdot \underline{I}_1; \qquad \underline{E}_{L2} = -j\omega L_2 \cdot \underline{I}_2;$$

$$\underline{E}_{M1} = -j\omega M \cdot \underline{I}_2; \qquad \underline{E}_{M2} = -j\omega M \cdot \underline{I}_1.$$

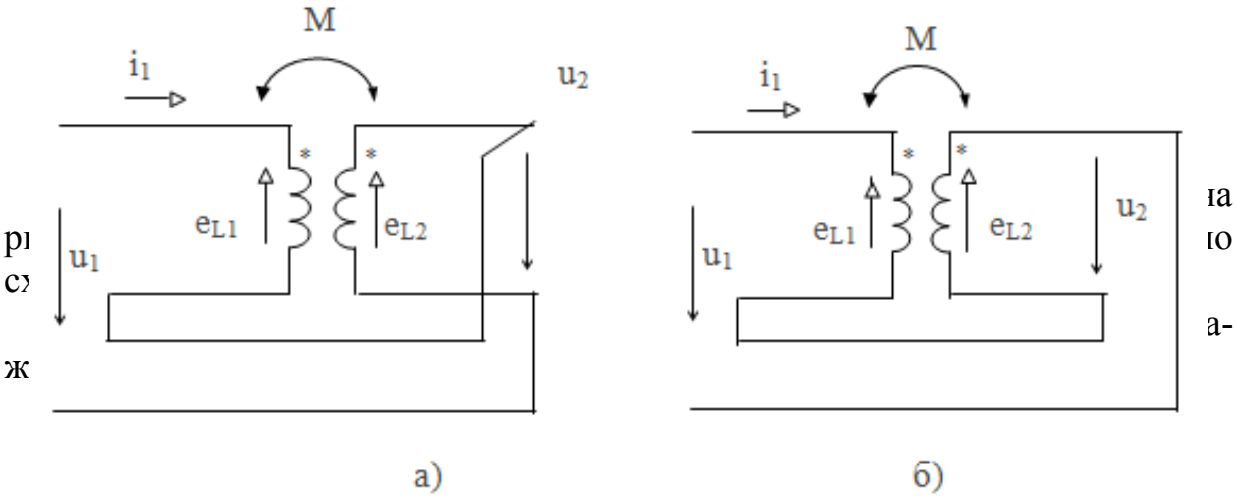
Параметры $\omega L_1 = X_1$, $\omega L_2 = X_2$, $\omega M = X_M$ называют соответственно индуктивными сопротивлениями первичной X_1 и вторичной X_2 обмоток трансформатора и сопротивлением взаимной индукции X_M.

Выражения для ЭДС самоиндукции и взаимоиндукции дают способ определения начал и концов обеих обмоток (или способ разметки зажимов

трансформатора). Созданный током I_1 магнитный поток будет индуктировать в обеих обмотках ЭДС, направленные к одноименным зажимам. Следовательно, если соединить обмотки трансформатора последовательно, то их ЭДС или будут складываться, если в точке соединения находятся разноименные выводы обмоток (рис.6.3а), или вычитаться, если в точке соединения находятся одноименные зажимы (рис.6.3б).

Подключив по вольтметру к выводам каждой обмотки, а третий вольтметр к несоединенным выводам разных обмоток, можно по их показаниям судить, какими выводами – одноименными или разноименными – соединены обмотки.

Схема опыта для определения начала и концов магнитосвязанных катушек



а) б)

Рис.6.3

Схема замещения воздушного трансформатора

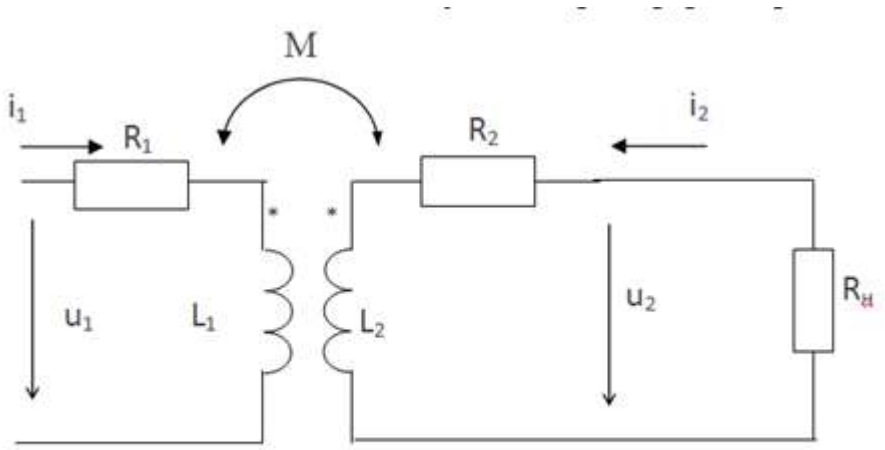


Рис.6.4

Для такой электрической цепи в символической форме могут быть записаны следующие уравнения по второму закону Кирхгофа:

$$\begin{cases} R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2 = \underline{U}_1; \\ R_2 \underline{I}_2 + jX_2 \underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 + R_н \underline{I}_2 + jX_н \underline{I}_2 = 0, \end{cases} \tag{6.2}$$

где R_1 и R_2 - активные сопротивления обмоток.

Исключив из этих уравнений ток $\underline{I}_2$, получим

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{\left[R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_н)^2 + (X_2 + X_н)^2}(R_2 + R_н)\right] + j\left[X_1 + \frac{-\omega^2 M^2}{(R_2 + R_н)^2 + (X_2 + X_н)^2}(X_2 + X_н)\right]}.$$

Обозначив

$$\begin{cases} R_{вн} = \dfrac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_н)^2 + (X_2 + X_н)^2} \cdot (R_2 + R_н)^2 \\ X_{вн} = \dfrac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_н)^2 + (X_2 + X_н)^2} \cdot (X_2 + X_н)^2, \end{cases} \tag{6.3}$$

приходим к более простому выражению первичного тока $\underline{I}_1$:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{(R_1 + R_{вн}) + j(X_1 + X_{вн})}. \tag{6.4}$$

Сопротивления $R_{вн}$ и $X_{вн}$ называются вносимыми (из вторичной цепи первичную) активным и реактивным сопротивлениями или параметрами.

Последнее выражение для первичного тока позволяет также упростить схему замещения воздушного трансформатора (рис.6.5).

Схема замещения первичной цепи
воздушного трансформатора напряжения

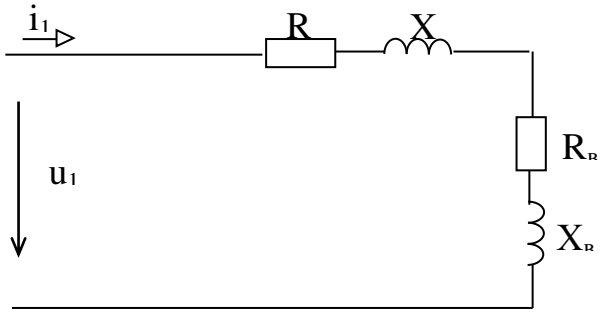


Рис. 6.5

Вносимые сопротивления представляют собой такие сопротивления, которые следовало бы «внести» в первичную цепь (включить последовательно с R_1 и X_1), чтобы учесть влияние нагрузки вторичной цепи трансформатора на ток в его первичной цепи.

6.5. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы требуется соблюдать общие правила по технике безопасности при выполнении лабораторных работ в лаборатории 225.

6.6. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием и записать их паспортные данные в табл. 1в.

2. Произвести разметку зажимов воздушного трансформатора по методу согласного и встречного включения (рис.6.6). Начертить схему трансформатора с обозначенными одноименными зажимами (началами обмоток).

Схема разметки зажимов воздушного трансформатора

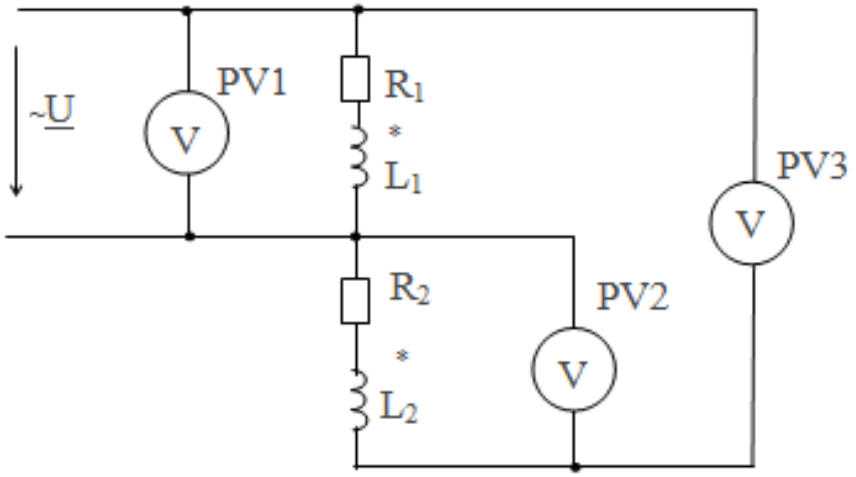


Рис.6.6

3. Определить параметры трансформатора R_1, L_1, R_2, L_2, M и коэффициент связи k. Для определения R_1, L_1, R_2, L_2 провести опыты холостого хода со стороны низшего и высшего напряжений по схемам рис.6.7а и 6.7б. Результаты измерений и вычислений записать в табл.6.1. (Обработку результатов измерений см. в лабораторной работе № 3).

Схемы проведения опыта холостого хода

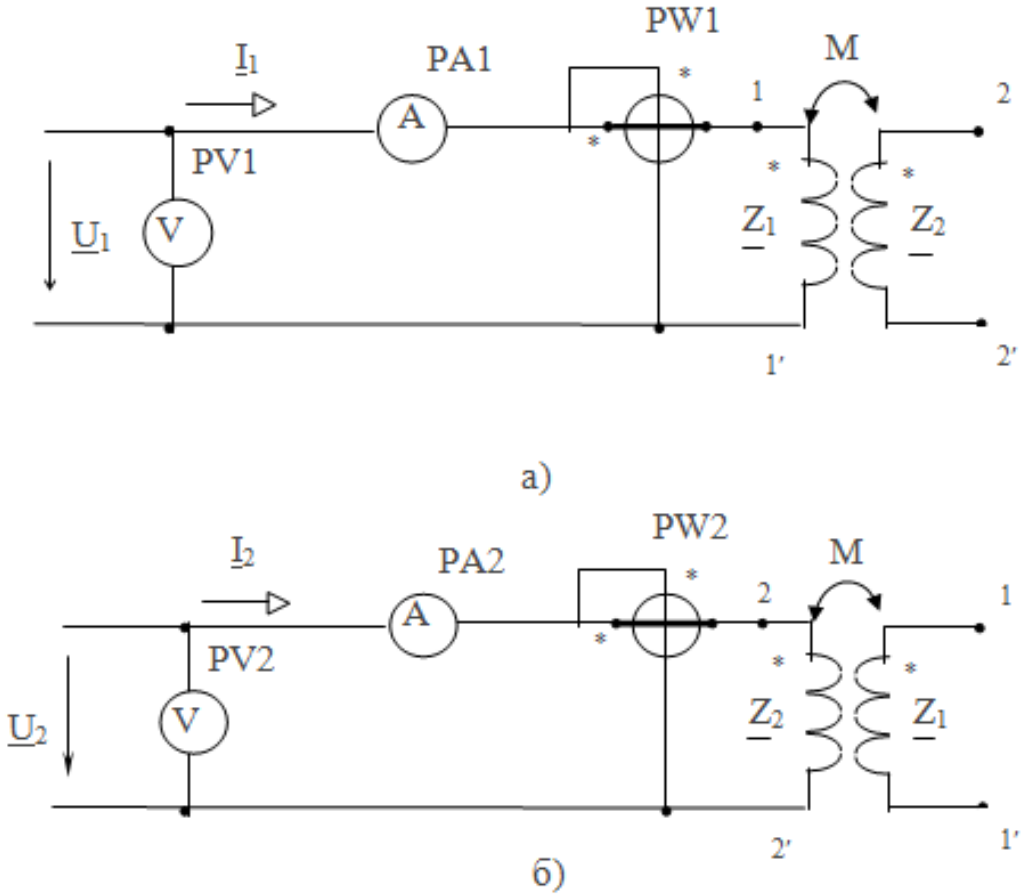


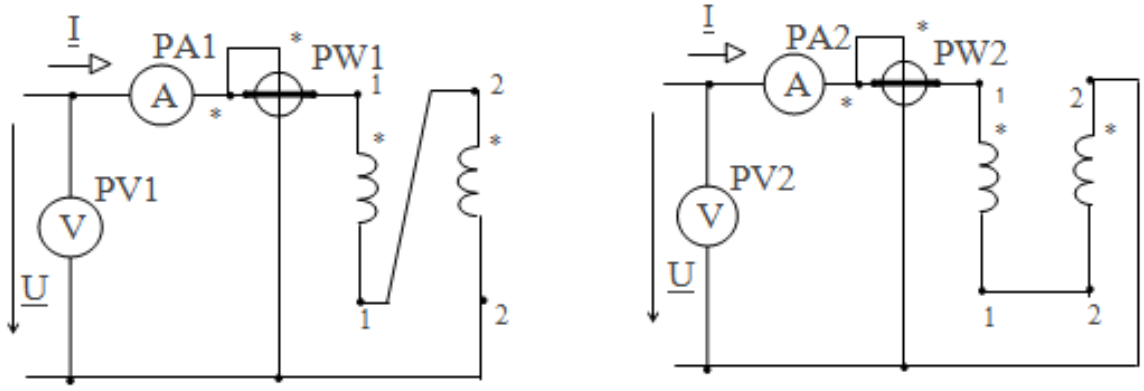
Рис. 6.7

Таблица 6.1 - Результаты определения параметров трансформатора

Для схемы рис.6.7а						Для схемы рис.6.7б					
Результаты измерений			Результаты вычислений			Результаты измерений			Результаты вычислений		
U_1	I_1	P_1	Z_1	R_1	X_1	U_2	I_2	P_2	Z_2	R_2	X_2
В	*А*	*Вт*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*В*	*А*	*Вт*	*Ом*	*Ом*	*Ом*

4. Для определения параметра *M* провести опыты согласного последовательного соединения обмоток трансформатора по схеме рис.6.8а и встречного соединения по схеме рис.6.8б. Результаты измерений и вычислений записать в табл.6.2.

Схемы опыта для определения взаимной индуктивности



а) б)

Рис.6.8

Таблица 6.2 - Результаты определения взаимной индуктивности М

Согласное соединение обмоток						Встречное соединение обмоток						$X_м$	M
Результаты измерений			Результаты вычислений			Результаты измерений			Результаты вычислений				
U_1	I_1	P_1	$Z_{согл}$	$R_{согл}$	$X_{согл}$	U_2	I_2	P_2	$Z_{встр}$	$R_{встр}$	$X_{встр}$		
В	*А*	*Вт*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*В*	*А*	*Вт*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*мГн*
…													

Взаимная индуктивность рассчитывается с использованием формул:

$$Z = \frac{U}{I}; \qquad R = \frac{P}{I^2}; \qquad X = \sqrt{Z^2 - R^2};$$

$$X_м = \frac{X_{согл} - X_{встр}}{4}; \qquad M = \frac{X_м}{\omega}.$$

5. Снять зависимости $I_1(I_2)$, $P_1(I_2)$, $U_2(I_2)$, $P_2(I_2)$, $\eta_2(I_2)$ при $\cos\varphi_2 = 1$ и $U_1 = const$. Для этого провести опыт нагрузки трансформатора по схеме рис.6.9. Результаты измерений и вычислений записать в табл. 6.3.

Схема опыта нагрузки воздушного трансформатора

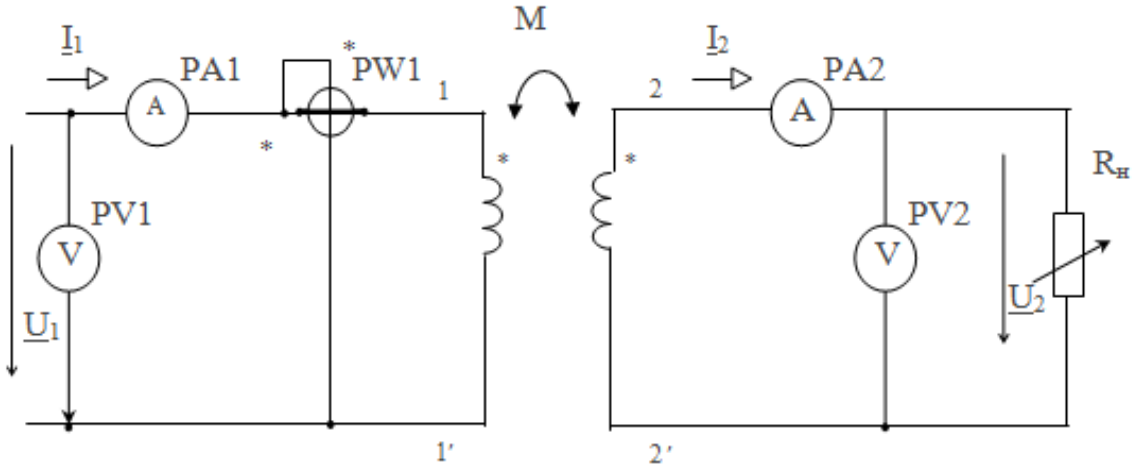


Рис.6.9

Таблица 6.3- Результаты опыта нагрузки

№	Результаты измерений					Результаты вычислений			
	U_1	I_1	P_1	U_2	I_2	P_2	$\cos\varphi_1$	η	R_H
	B	*A*	*Вт*	*B*	*A*	*Вт*	-	%	*Ом*
1 2 3 4 5 6									

При вычислениях используются следующие формулы:

$$R_н = \frac{U_2}{I_2}; \qquad P_2 = \frac{U_2^{\,2}}{R_н} = I_2^{\,2} \cdot R_н;$$

$$\cos\varphi_1 = \frac{P_1}{U_1 \cdot I_1}; \qquad \eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%.$$

6. Построить графики зависимостей, полученных экспериментально в пункте 5.

7. При каждых значениях тока I_2, полученных в опыте нагрузки, вычислить вносимые сопротивления $R_{вн}$ и $X_{вн}$ (учитывая, что $Xн = 0$), а через них и ток I_1. Сравнить вычисленный ток I_1 с полученным в опыте. Результаты вычислений занести в табл. 6.4.

Таблица 6.4- Сравнение результатов измерений с данными ы опыта нагрузки

№ опыта	Результаты измерений		Результаты вычислений		
	I_1	I_2	$R_{вн}$	$X_{вн}$	I_1
	А	*А*	*Ом*	*Ом*	*А*
1 2 3 4 5 6					

8. Выполнить индивидуальное задание № 6, приведенное в Приложении. Номер вариант задания определяет преподаватель.

6.7. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать: схемы электрических цепей, исследуемых в работе; таблицы приборов, опытных и расчетных данных; графики; расчетные формулы; анализ результатов экспериментов; выводы. К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №6. Таблицам присвоить наименование.

6.8. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие электрические цепи называются индуктивно связанными?
2. Какие зажимы индуктивно связанных катушек называют одноименными?
3. Какое соединение индуктивно связанных катушек называют согласным, какое – встречным?
4. Какой трансформатор называют воздушным трансформатором?
5. Как определить взаимную индуктивность М двухобмоточного воздушного трансформатора?
6. Какие сопротивления схемы замещения воздушного трансформатора называют вносимыми? Почему? Как они определяются?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7
«ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

7.1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Ознакомление с методами расчета и исследования электрических цепей с нелинейными сопротивлениями.

7.2 ПРИБОРЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

Для выполнения лабораторной работы используются следующие приборы и оборудование:

- вольтметр магнитоэлектрической системы с пределом измерений до 100 В – 1шт.;
- амперметр магнитоэлектрической системы с пределом измерений до 2 А – 1шт.;
- нагрузочное сопротивление R = 200 Ом;
- лампа накаливания с номинальным напряжением $U_н$ = 26 В – 1шт.;
- реостат – потенциометр.

7.3. ВРЕМЯ, ОТВОДИМОЕ НА РАБОТУ

На выполнение данной работы отводится два академических часа.

7.4. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Расчет многих электрических цепей постоянного тока выполняется на основании закона Ома $I = \frac{U}{R}$, который устанавливает прямую зависимость между током I и напряжением U, приложенным к зажимам электроприемника.

Такие электротехнические цепи, в которых сопротивление R отдельных элементов не зависит от силы тока или напряжения, называются линейными, и сами сопротивления также носят название линейных.

Однако в электрических цепях, наряду с линейными сопротивлениями, могут быть и такие электроприемники, сопротивление R которых является функцией значения и направления протекающего тока I или приложенного напряжения U, т.е. $R\,f(I)$ или $R= f(U)$.

Такие сопротивления, а также электрические цепи, в которые они входят, называются нелинейными.

Расчет нелинейных электрических цепей значительно сложнее расчета линейных цепей.

Основной характеристикой электрической цепи, позволяющей судить о ее свойствах, является вольтамперная характеристика, представляющая собой зависимость протекающего тока I от напряжения U, приложенного к входным зажимам цепи, т.е. $I=f(U)$.

Нелинейные элементы, входящие в электрическую цепь, в зависимости от типа вольтамперной характеристики могут быть симметричными или несимметричными.

У симметричных нелинейных элементов (электрические лампы накаливания, термосопротивления и т.п.) сопротивление R не зависит от направления тока или напряжения, а определяется лишь их абсолютными значениями, вследствие чего вольтамперная характеристика располагается симметрично в системе координат (рис.7.1а), т.е. представляет нечетную функцию $I=f(U)= -f(-U)$.

Несимметричные нелинейные элементы (полупроводники, электрическая дуга и т.п.) характерны тем, что их сопротивление зависит не только от значения протекающего тока или приложенного напряжения, но и от направления их действия. Поэтому их вольтамперные характеристики располагаются в координатной системе несимметрично (рис.7.1б), так, что $|f(U)| \neq |f(-u)|$.

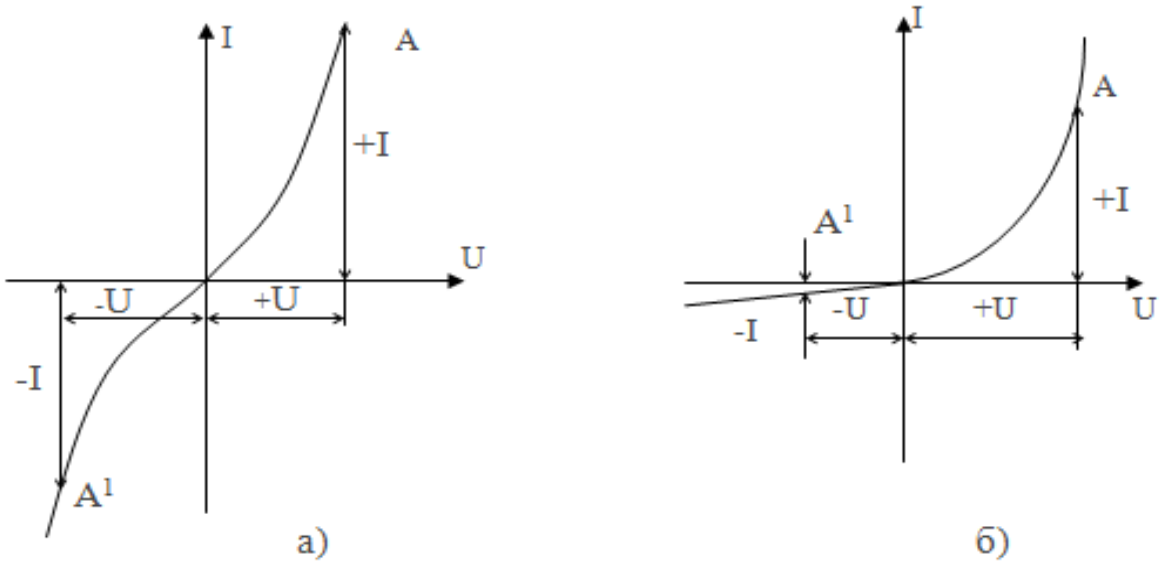


Рис.7.1

Из рис.7.1б видно, что у несимметричных нелинейных сопротивлений ток, текущий в прямом направлении, во много раз превышает ток в обратном направлении.

Нелинейные сопротивления также подразделяются на управляемые и неуправляемые.

В управляемых нелинейных сопротивлениях вольтамперные характеристики изображаются семейством кривых, а в неуправляемых – одной.

К управляемым нелинейным сопротивлениям относятся полупроводниковые триоды, тиристоры и т.п., к неуправляемым нелинейным сопротивлениям относятся – лампы накаливания, полупроводниковые диоды, термосопротивления, фотодиоды, термисторы, позисторы, варисторы, стабилитроны и т.д.

Простые нелинейные цепи постоянного тока рассчитываются, как правило, графическим методом. При этом за основу берут вольтамперную характеристику нелинейных элементов, входящих в схему.

К простым нелинейным цепям относятся цепи с последовательным, параллельным и последовательно-параллельным соединением элементов.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

Рассмотрим, как определяются токи и напряжения на отдельных участках электрической цепи при последовательном соединении двух нелинейных элементов (рис.7.2). Поскольку нелинейные элементы соединены последовательно, ток в них один и тот же, а напряжения на участках на основании второго закона Кирхгофа связаны уравнением

$$E = U = U_{нс1} + U_{нс2} \ . \qquad (7.1)$$

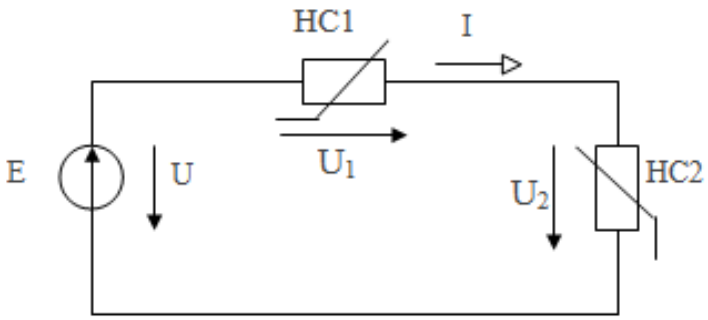


Рис.7.2

ПОРЯДОК РАСЧЕТА:

1. Выбрав одинаковый масштаб, построим в общей системе координат вольтамперные характеристики каждого элемента цепи (рис.7.3), причем $I_1(U)$ – вольтамперная характеристика первого нелинейного элемента НЭ1 и $I_2(U)$ – вольтамперная характеристика второго нелинейного элемента.

2. По вольтамперным характеристикам $I_1(U)$ и $I_2(U)$ построим общую вольтамперную характеристику $I(U)$. Для этого, выбрав произвольное значение тока I_1, найдем точки А’ и А’’ на вольтамперных характеристиках $I_1(U)$ и $I_2(U)$, ординаты которых выражают ток I' и, сложив абсциссы этих точек, получим точку А, абсцисса которой, согласно уравнению 4-1, равна напряжению на входе цепи.

Задаваясь другими значениями тока I'', I''' и т.д., найдем точки В, С, D и т.д., через которые проходит общая вольтамперная характеристика.

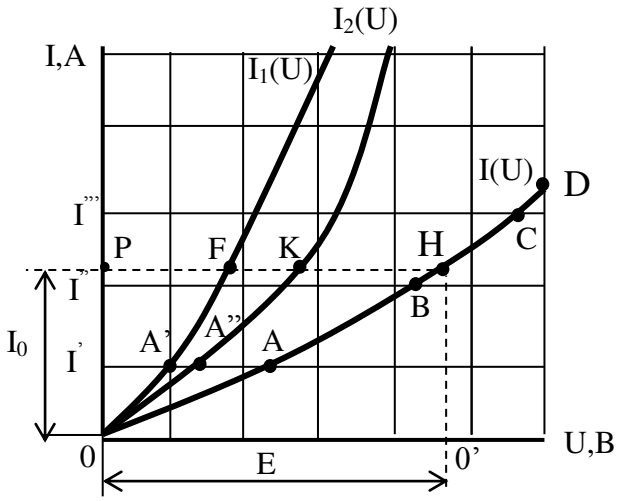


Рис.7.3

3. Пользуясь построенными характеристиками, можно решить различные задачи:

- по заданному току можно определить напряжение на входе цепи и на каждом ее элементе;
- по заданному напряжению можно определить ток в цепи и напряжение на каждом ее элементе.

Например, заданы вольтамперные характеристики $I_1(U)$, $I_2(U)$ и ЭДС E. Требуется определить ток и напряжение на линейных элементах.

Чтобы найти ток, отложим на оси абсцисс отрезок $00'$, выражающий в выбранном масштабе ЭДС. Обозначим точку пересечения перпендикуляра, восстановленного в точке $0'$, с вольтамперной характеристикой $I_1(U)$ буквой Н. Ордината $0'$Н выражает общий искомый ток I_0, а отрезки PF и PK – соответственно напряжения на первом и втором элементах U_1 и U_2. Таким образом $I_0 = m_A \cdot 0'$Н; $U_1 = m_B \cdot$PF; $U_2 = m_B \cdot$PK, где m_A и m_B – масштабы тока и напряжения.

Если, наоборот, задан ток, то, отложив по оси ординат отрезок, пропорциональный току, аналогично определим общее напряжение и напряжения на отдельных участках цепи.

Для определения тока и падения напряжения на элементах цепи, состоящей из двух элементов, можно применить другой метод расчета – так называемый метод опрокинутой характеристики или зеркального отражения.

Для этого рассмотрим зависимость изменения тока I цепи, во-первых, от напряжения U, и во-вторых, от разности $U - U_2$. В первом случае эта зависимость определяется собственной характеристикой первого элемента $I_1(U)$, во втором случае при построении характеристики $I(U - U_2)$ для каждого значения тока I необходимо из постоянной абсциссы вычесть абсциссу характеристики $I_2(U)$ второго элемента. Это равносильно построению опрокинутой характеристики второго элемента $I_2(U)_{опр.}$ от точки 0’ соответствующей напряжению U на входе цепи (рис.7.4а).

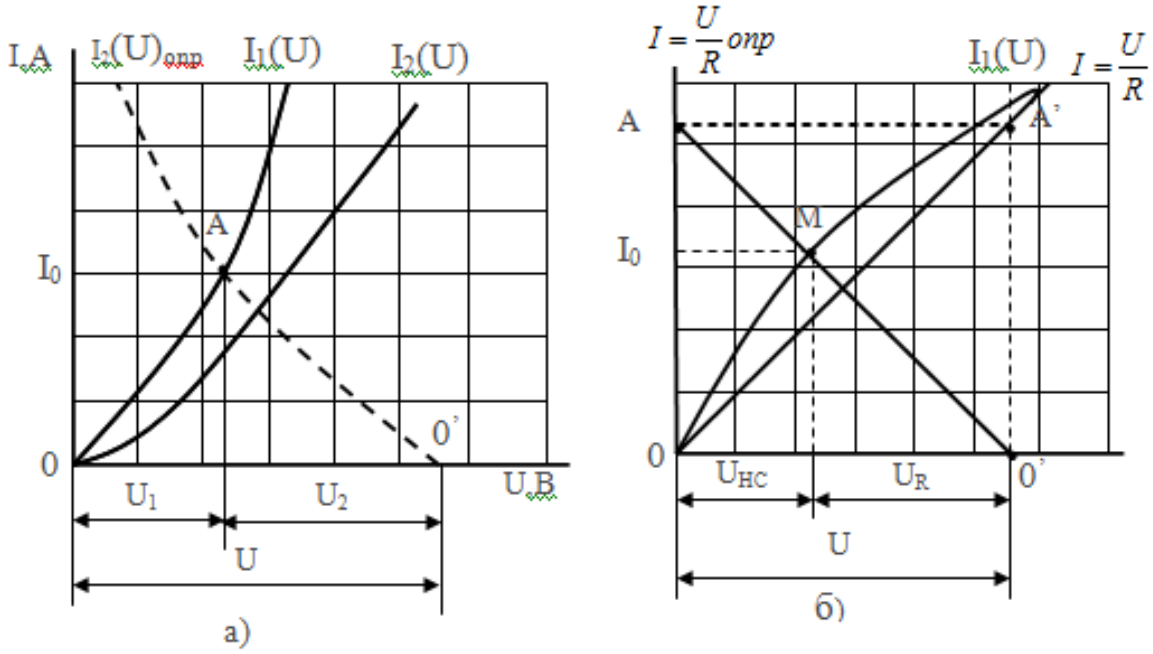


Рис.7.4

Особенно удобно применять метод опрокинутой характеристики в том случае, когда один из элементов цепи линейный. В этом случае вольтамперная характеристика линейного элемента прямая линия ОА’, а следовательно, и опрокинутая характеристика это прямая О’А (рис.7.4б).

Точка М пересечения опрокинутой характеристики линейного элемента и характеристики нелинейного элемента и является решением задачи.

ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ

При параллельном соединении двух нелинейных элементов (рис.7.5а) с заданными вольтамперными характеристиками в виде кривых $I_1(U)$ и $I_2(U)$

(рис.7.5,) напряжение U одинаково для обеих ветвей, а ток в неразветвленной части цепи равен сумме токов в ветвях $I = I_1 + I_2$.

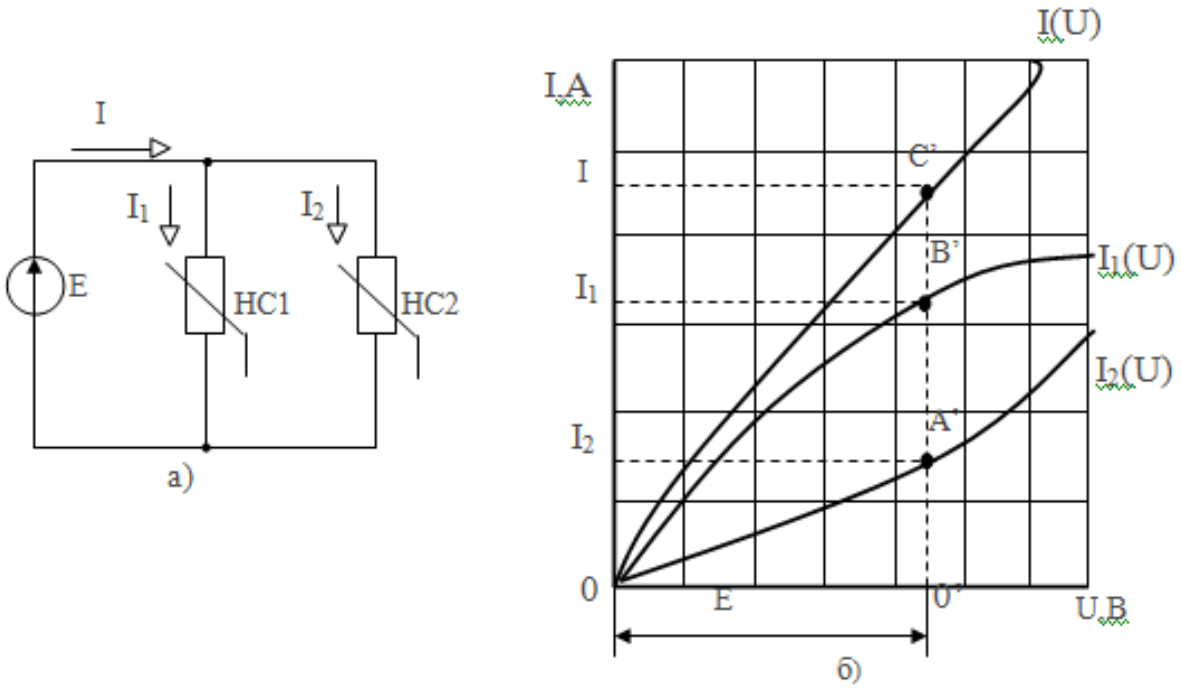


Рис.17.5

Поэтому для получения общей характеристики $I(U)$ достаточно для произвольных значений напряжения U на рис.7.5б) просуммировать ординаты характеристик отдельных элементов.

Пользуясь этими характеристиками, как и в предыдущем случае, по заданному напряжению U можно найти все токи I, I_1, I_2.

Пусть, например, задано значение ЭДС Е. На оси абсцисс откладываем отрезок 00', равный в масштабе m_B ЭДС Е. Из точки 0' проводим прямую, параллельную оси ординат. Отрезки 0'A' , 0'B' и 0'C' в масштабе m_I определяют искомые токи I_2, I_1 и I.

Аналогично можно определить любые три величины при заданной четвертой.

СМЕШАННОЕ СОЕДИНЕНИЕ

На рис. 7.6 представлена схема цепи со смешанным соединением трех нелинейных сопротивлений НС1, НС2 и НС3.

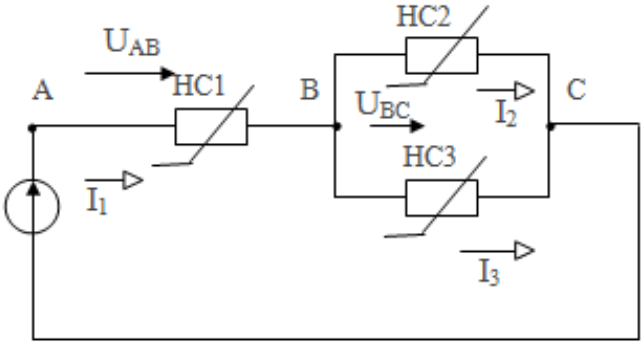


Рис.7.6

Сопротивление НС1 соединено последовательно с участком цепи ВС, который представляет собой параллельное соединение сопротивлений НС2 и НС3.

Для расчета токов в ветвях и напряжений на участках, в осях координат в выбранном масштабе строим вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений $I_1(U_{AB})$, $I_2(U_{BC})$ и $I_3(U_{BC})$ (рис.7.7). Так как сопротивления НС2 и НС3 соединены параллельно, то, используя первый закон Кирхгофа, строим суммарную вольтамперную характеристику $I_1(U_{BC})$ участка ВС путем сложения ординат характеристик при разных значениях напряжения. Сопротивление НС1 и участок ВС образуют последовательную цепь с током I_1 , следовательно, используя второй закон Кирхгофа, можно построить суммарную вольтамперную характеристику всей цепи $I_1(U_{AC})$, путем сложения абсцисс характеристик $I_1(U_{AB})$ и $I_1(U_{BC})$.

Полученная вольтамперная характеристика дает возможность определить значения токов в ветвях и напряжения на участках цепи.

Например, задана ЭДС E (U_{AC}) и вольтамперные характеристики $I_1(U_{AB})$, $I_2(U_{BC})$ и $I_3(U_{BC})$. Определить токи I_1 ,I_2 , I_3 и напряжения U_{AB} и U_{BC} (рис.12.7).

Из точки А проводим ординату до пересечения с характеристикой $I_1(U_{AC})$ в точке А’. Из точки А’ проводим прямую, параллельную оси абсцисс, до пересечения с осью ординат в точке С’. Отрезок ОС’ в масштабе m_I равен I_1. Прямая А’С’ пересекает характеристику $I_1(U_{BC})$ в точке В’. Из точки В’ опускаем перпендикуляр В’В на ось абсцисс, который пересекает характеристики $I_2(U_{BC})$ и $I_3(U_{BC})$ в точках К’ и М’.Проекции этих точек на ось ординат определяют в масштабе m_I и токи I_2 и I_3 . Точка В делит напряжение U_{AC} на два отрезка ВС и АВ, которые в масштабе m_V соответствуют напряжениям U_{BC} и U_{AB}.

Решение данной задачи может быть произведено и без построения общей вольтамперной характеристики $I_1(U_{AC})$. Для этого достаточно через точку А построить опрокинутую характеристику нелинейного сопротивле-

ния НС1. Опрокинутая характеристика пересекается с характеристикой $I_1(U_{BC})$ в точке В', что позволяет определить искомые величины.

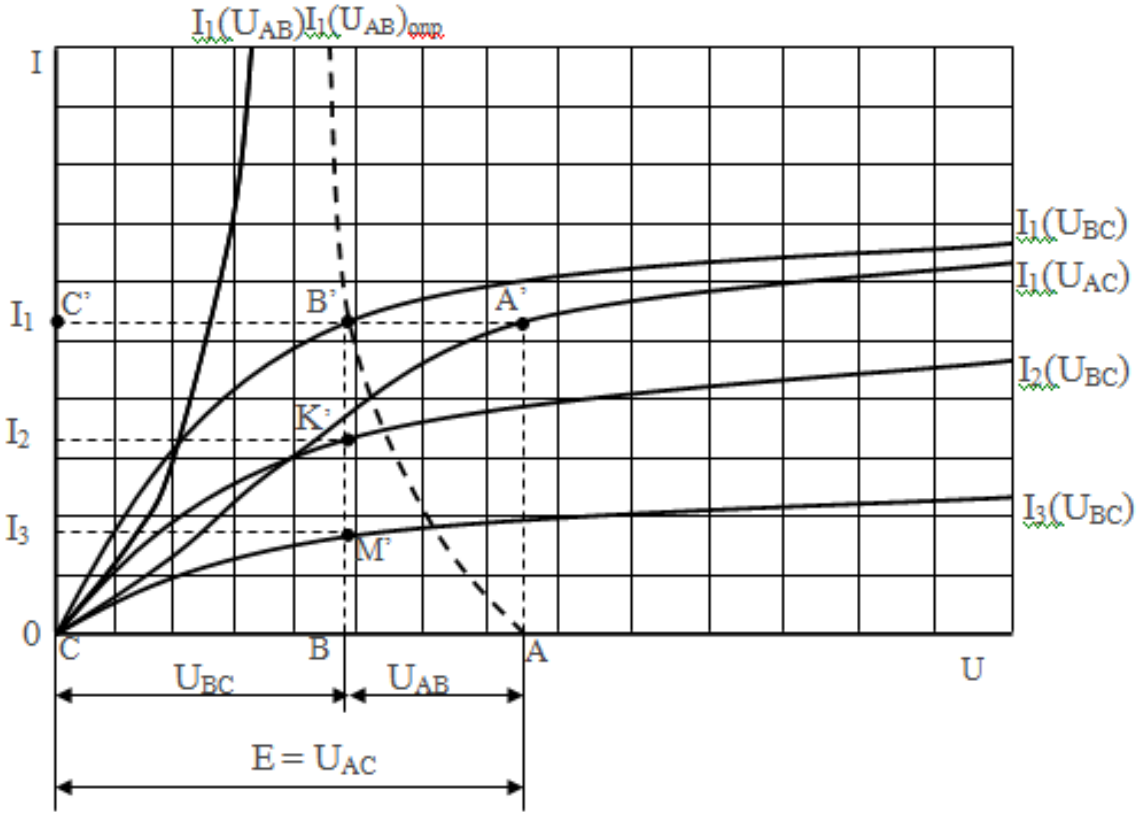


Рис.7.7

Графический метод расчета нелинейных цепей является универсальным, т.е. он дает возможность определить искомые величины при любых видах вольтамперных характеристик нелинейных сопротивлений.

Однако, в том случае, когда участок криволинейной характеристики приближенно можно считать прямолинейным, то расчет можно производить аналитически с заменой нелинейной цепи эквивалентной схемой с линейными элементами. При таких расчетах пользуются понятием статического и дифференциального сопротивления или проводимости нелинейного элемента.

На рис.13.8 а) и б) приведены наиболее типичные вольтамперные характеристики, отдельные участки которых могут входить в вольтамперные характеристики разнообразных нелинейных элементов.

Статическое сопротивление в точке А этих характеристик пропорционально тангенсу угла наклона α к оси ординат луча, проведенного из начала координат через заданную точку А характеристики

$$R_{cm} = \frac{U}{I} = \frac{m_u AK}{m_I OK} = m_R \cdot tg\alpha$$

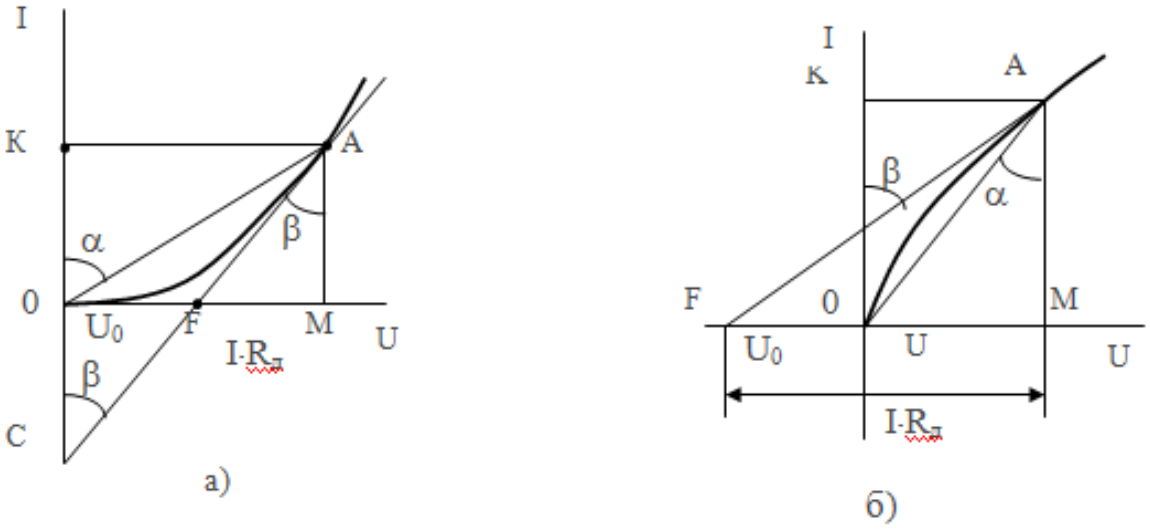


Рис.7.8

Дифференциальным сопротивлением $R_д$ нелинейного элемента называется величина, равная отношению приращения напряжения ΔU к приращению тока ΔI, когда ΔU и ΔI величины бесконечно малые.

$$R = \lim_{\Delta I \Rightarrow 0} \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{dU}{di} = m_R \cdot tg\beta .$$

Дифференциальное сопротивление пропорционально тангенсу угла β наклона касательной в данной точке характеристики к оси ординат.

Участки характеристик (рис.13.8 а и б) для тока $I > m_I$OK можно считать линейными и составить для них линейные уравнения.

На рис. 13.8а напряжение на линейном участке кривой состоит из постоянной составляющей $U_0 = m_U \cdot$OF и переменной составляющей U_{FM}, значение которой в масштабе m_U выражается отрезком F_M и представляет собой произведение тока на дифференциальное сопротивление.

$$U_{FM} = m_U \cdot FM = m_U \cdot MA \cdot tg\beta = m_U \frac{I}{m_I} \cdot tg\beta = \mathrm{Im}_r \cdot tg\beta$$

$$\text{или} \quad U_{FM} = I \cdot R_д$$

Таким образом, можно составить уравнение $U = U_0 + I \cdot R_д$, т.е. напряжение на рассматриваемом участке равно постоянной составляющей напряжения, отсекаемой касательной на оси напряжения, и падению напряжения на дифференциальном сопротивлении.

Рассуждая аналогично, для прямолинейного участка (рис.13.8б), получим уравнение $U = -U_0 + I \cdot R_\partial$.

Таким образом, каждый из двух рассматриваемых нелинейных элементов может быть заменен эквивалентной схемой, удовлетворяющей соответствующему уравнению напряжений.

7.5.ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении лабораторной работы требуется выполнять общие требования по технике безопасности при выполнении лабораторных работ по ТОЭ.

7.6. ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Изучить теоретическую часть данной работы.
2. Записать паспортные данные приборов и оборудования в таблицу 1в.
3. Собрать электрическую цепь по схеме рис.7.9. К зажимам *а-в* основной цепи подключить линейное сопротивление R. Снять вольт - амперную характеристику. Показания снимать через 3 В от 0 до 24 В. Отсчет показаний приборов производить через 15-20 с после установки заданного режима. Данные измерений занести в таблицу 7.1.

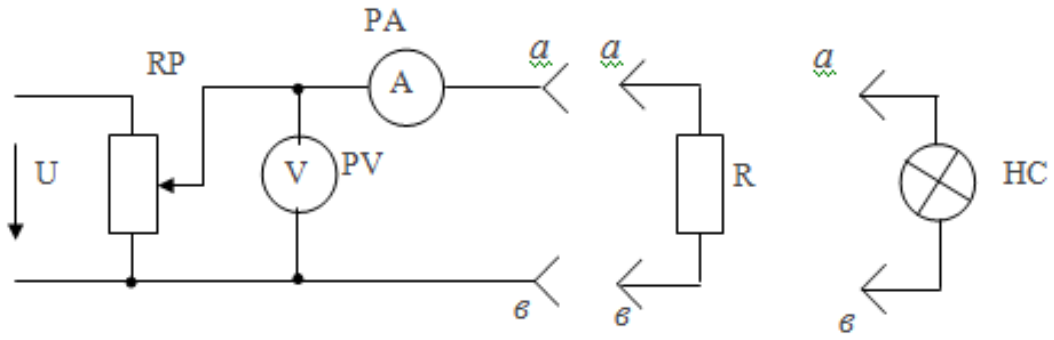


Рис. 7.9

Таблица 13.1

№ п\п	Линейный элемент		Нелинейный элемент	
	U,B	*I,A*	*U,B*	*I,A*
….				

4. Аналогично снять вольтамперную характеристику нелинейного элемента НС.

5. Снять результирующую вольтамперную характеристику цепи с последовательным соединением линейного и нелинейного элементов. Измерения производить с выдержкой времени 15-20с и с интервалом по напряжению 3В. Данные измерений занести в таблицу 7.2.

6. Снять результирующую вольтамперную характеристику цепи с параллельным соединением линейного и нелинейного элементов по той же методике. Измерения выполнять с выдержкой времени 15-20 с. Напряжение изменять с интервалом 3В. Данные измерений занести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2

№ п\п	Последовательное соединение		Параллельное соединение	
	U,B	*I,A*	*U,B*	*I,A*
….				

7.7. ОБРАБОТКА ДАННЫХ

1. По данным пунктов 4 и 5 построить в одних координатах *(U,I)* вольтамперные характеристики линейного и нелинейного элементов и их результирующую вольтамперную характеристику, полученную графическим суммированием и опытным путем для случая последовательного соединения элементов. Рядом начертить схему цепи.

2. То же самое сделать для цепи с параллельным соединением элементов.

3. Пользуясь вольтамперными характеристиками, построенными в пунктах 2 и 3, определить графически:

- ток I и напряжения на линейном U_1 и нелинейном U_2 сопротивлениях по заданному преподавателем значению входного напряжения U в цепи с последовательным соединением элементов;
- напряжение U на входе цепи и токи в линейном I_1 и нелинейном I_2 элементах по заданному преподавателем значению входного тока I цепи при параллельном соединении элементов. Заданные преподавателем и соответствующие им напряжения и токи, определенные графически, занести в таблицу 7.3.

4. По результатам обработки опытных данных сделать выводы.

5. Выполнить индивидуальное задание № 13. Номер варианта принимается по заданию преподавателя.

Таблица 7.3

Последовательное соединение				Параллельное соединение			
U,B	I,A	U_1,B	U_2,B	I,A	U,B	I_1,A	I_2,A

7.8. УКАЗАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать электрическую схему исследуемой цепи, таблицы, графики. К отчету прилагается выполненное индивидуальное задание №7. Таблицам присвоить наименование.

7.9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие цепи называются линейными, а какие нелинейными и почему?
2. Что называется вольтамперной характеристикой и какой она имеет вид для линейного и нелинейного сопротивлений?
3. Какое сопротивление нелинейного элемента называется статическим и какое - дифференциальным? Как определяются эти сопротивления при помощи вольтамперных характеристик?
4. Как осуществляется графический расчет последовательной и параллельной цепей постоянного тока, состоящих из линейного и нелинейного сопротивлений?
5. Как осуществляется графический расчет разветвленной цепи постоянного тока, состоящей из линейных и нелинейных элементов?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белецкий А.Ф.Теория линейных электрических цепей [Электронный ресурс] : учебник - 3-е изд. Санкт-Петербург : Лань, 2017. — 544 с. — ISBN 978-5-8114-0905-1. Лань : электронно-библиотечная система. — Режим доступа: https://e.lanbook.com/book/91910

2. Башарин С..А.Теоретические основы электротехники : учебник для студ. учреждений высш. проф. образования / С. А. Башарин, В.В.Федоров. — 5-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательский центр «Академия», 2013. — 384 с. — (Сер. Бакалавриат).

ПРИЛОЖЕНИЕ

«ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ С ПРИМЕРАМИ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ»

ЧАСТЬ 1

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 1

Рассчитать электрическую цепь со смешанным соединением сопротивления при постоянном входном напряжении (рис.П.1.1).

Требуется:

1. Определить токи в ветвях электрической цепи и падения напряжения на ее участках.
2. Составить баланс мощностей электрической цепи.

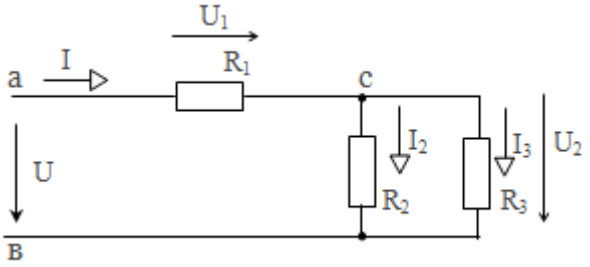


Рис. П.1.1

3. Построить потенциальную диаграмму для контуров цепи.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

№ вар.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R_1	*Ом*	1	4	7	10	3	6	12	15	5	8	20	15	11	13	25
R_2	*Ом*	2	5	8	12	5	8	15	20	10	11	10	5	22	24	20
R_3	*Ом*	3	6	9	14	7	10	20	25	15	16	30	10	28	32	10
U	*В*	10						60						55		
U_1	*В*		5						12						16	
U_2	*В*			8						20						10
I_1	*А*				1						2					
I_2	*А*					2						3,5				
I_3	*А*						3						1,5			
№ вар.		16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
R_1	*Ом*	1	4	7	10	3	6	10	15	5	8	20	15	11	13	25
R_2	*Ом*	2	5	8	12	5	8	15	20	10	11	10	5	22	24	20
R_3	*Ом*	3	6	9	14	7	10	20	25	15	16	30	10	28	32	10
U	*В*				40						25					
U_1	*В*					25						18				
U_2	*В*						30						24			
I_1	*А*	2						1,8						3		
I_2	*А*		4						3						2,5	
I_3	*А*			2,6						4						2

Пример выполнения индивидуального задания

Исходные данные:

U	R_1	R_2	R_3
В	*Ом*	*Ом*	*Ом*
70	10	15	20

Решение

1. Определение токов I_1, I_2, I_3 и напряжений U_1, U_2.

$$I_1 = \frac{U}{R_Э}.$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_Э = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 10 + \frac{15 \cdot 20}{15 + 20} = 10 + 8{,}57 = 18{,}57 Ом;$$

$$I_1 = \frac{70}{18{,}57} = 3{,}77\,A;$$

$$U_2 = I_1 \cdot R_{23} = 3{,}77 \cdot 8{,}57 = 32{,}31 В;$$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{32.31}{15} = 2{,}15\,A;$$

$$I_3 = \frac{U_2}{R_3} = \frac{32{,}31}{20} 1{,}62\,A.$$

Проверка: согласно первому закону Кирхгофа:

$$I_1 = I_2 + I_3; \quad 3{,}77 = 2{,}15 + 1{,}62; \quad 3{,}77 = 3{,}77.$$

Напряжение на сопротивлении R_1

$$U_1 = I_1 R_1 = 3{,}77 \cdot 10 = 37{,}7\ В.$$

Проверка: согласно второму закону Кирхгофа:

$$U = U_1 + U_2; \quad 70 = 37{,}7 + 32{,}31; \quad 70 = 70.$$

2. Баланс мощностей $\sum_{k=1}^{n} E_k I_k = \sum_{k=1}^{m} I_k^2 R_k$,

где k - номер ветви;

I_k - ток в k-ой ветви;
R_k- сопротивление k-ой ветви;
E_k - алгебраическая сумма ЭДС – k-ой ветви;
n - число ветвей в ЭДС;
m - число сопротивлений в электрической цепи.

$$UI_1 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3.$$

Так как ЭДС источника питания равна напряжению питания $E=U$, то

$$70 \cdot 3{,}77 = 3{,}77^2 \cdot 10 + 2{,}15^2 \cdot 15 + 1{,}62^2 \cdot 20;$$
$$263{,}9 = 142{,}13 + 69{,}34 + 52{,}49;$$
$$263{,}9\ Вт \approx 263{,}96\ Вт.$$

3. Построение потенциальной диаграммы цепи.
Примем потенциал точки «в», равный нулю:

$\varphi_в = 0$; тогда $\varphi_a = \varphi_в + U = 70\ В$;

$\varphi_c = \varphi_a - I_1 R_1 = 70 - 37{,}7 = 32{,}3\ В$;

$\varphi_в = \varphi_c - I_2 R_2 = 32{,}3 - 2{,}15 \cdot 15 = 0.$

Потенциальная диаграмма строится в координатах $\varphi = f(R)$

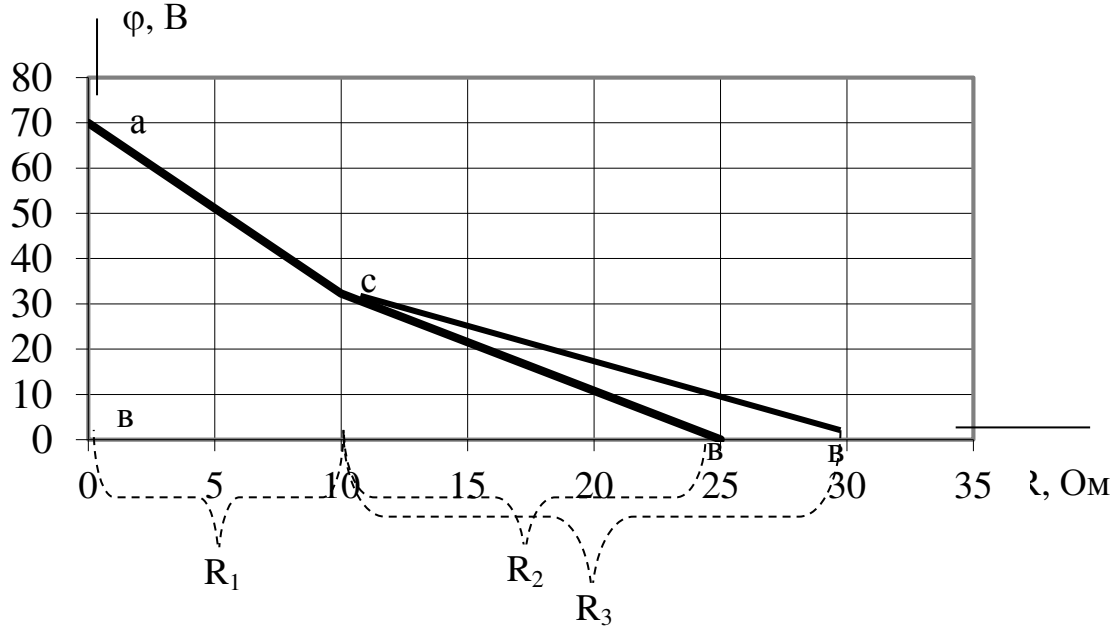


Рис. П.1.2

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 2

Рассчитать токи I_1, I_2, I_3 в электрической цепи (рис.П.2.1) методом наложения (суперпозиции).

Значения ЭДС, сопротивлений и схему соединений сопротивлений на участке 2-3 цепи (ограниченного штриховой линией) взять из таблицы, согласно заданию преподавателя.

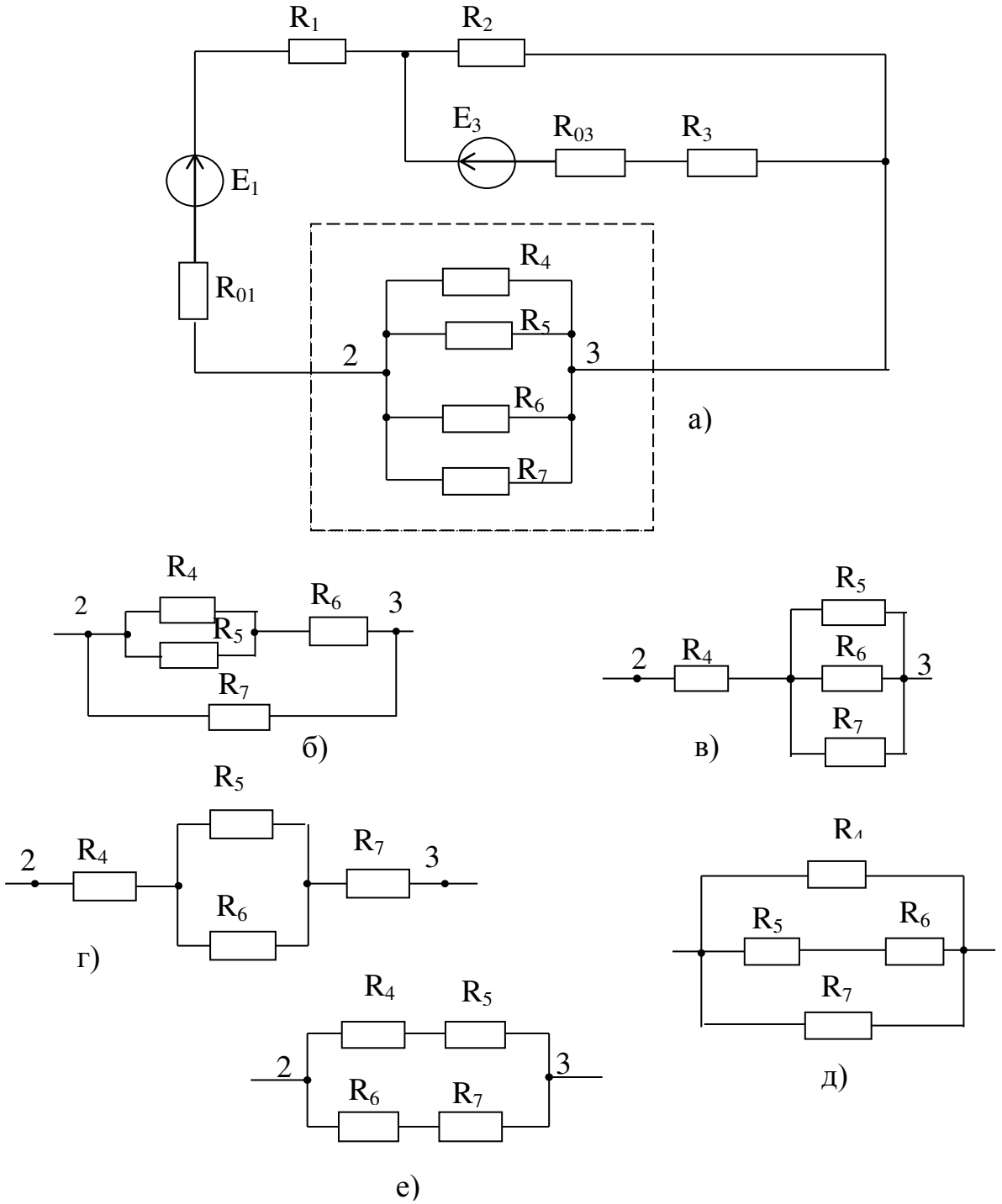


Рис. П.2.1

Вели-чина	Варианты индивидуального задания № 2														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
E1,В	90	100	60	120	110	50	90	140	60	120	80	160	120	50	70
E3,В	40	60	120	70	60	90	30	80	130	60	30	100	80	100	140
$R_{0,1}$, Ом	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4	0,2	0,4	0,1
$R_{0,2}$,Ом	0,1	0,1	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1
R1,Ом	3,9	5,3	4,9	3,4	4,8	2,9	2,7	2,4	3,8	3,9	2,8	1,6	2,8	4,6	2,4
R2,Ом	6	8	5	10	8	6	10	12	5	10	4	10	8	6	5
R3,Ом	4,3	3,4	4,8	3,9	2,3	4,8	2,8	2,4	5,6	4,8	2,3	4,8	2,6	4,3	2,4
R4,Ом	10	12	16	20	24	2	10	12	4	16	8	12	10	6	24
R5,Ом	10	6	12	20	20	2	10	8	6	24	3	2	2	2	8
R6,Ом	10	8	16	16	12	1	3	1,2	2,6	2,4	5	4	3	4	4
R7,Ом	10	12	12	12	16	2	8	6	5	12	8	12	10	6	24
Схема	а					б					в				
Вели-чина	Варианты индивидуального задания														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
E1,В	110	90	60	130	50	140	100	110	140	40	90	120	100	110	120
E3,В	40	30	120	70	100	70	160	60	80	90	50	60	60	50	70
$R_{0,1}$, Ом	0,2	0,4	0,2	0,4	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1
$R_{0,2}$,Ом	0,2	0,2	0,1	0,4	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4	0,2	0,1
R1,Ом	2,8	1,6	2,8	4,6	2,4	3,9	5,3	4,9	3,4	4,8	2,9	2,7	2,4	3,8	3,9
R2,Ом	4	10	8	6	5	6	5	10	8	10	12	10	8	10	12
R3,Ом	4,8	2,8	2,4	5,6	4,8	4,3	3,4	4,8	3,9	2,3	2,3	4,8	2,6	4,3	2,4
R4,Ом	6	12	8	10	6	5	4	5,5	5	4	4	2	3	6	3
R5,Ом	4	4	1	2	2	9	12	4	4	2	4	12	8	4	6
R6,Ом	5	8	7	8	5	9	12	8	2	1	4	12	8	4	6
R7,Ом	5	8	2	4	3	9	12	8	4	2	4	4	1	3	4
Схема	г					д					е				

Пример выполнения индивидуального задания № 2

Исходные данные:

E_1	E_3	$R_{0,1}$	$R_{0,3}$	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7
В	*В*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*	*Ом*
100	60	0,2	0,2	3,8	6	4,8	24	20	12	16

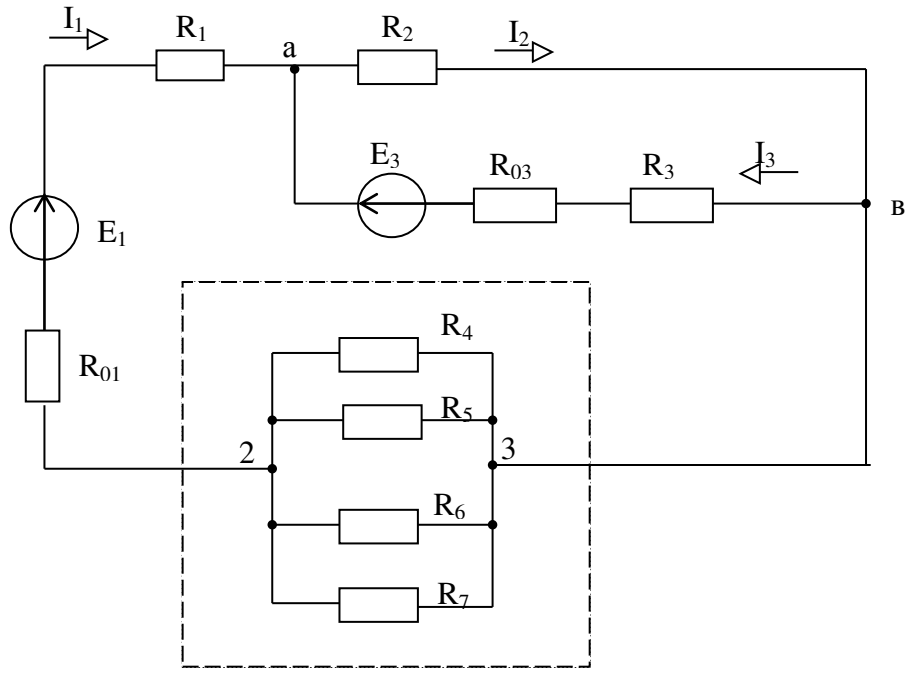


Рис. П.2.2

Решение

1. Упростим исходную схему электрической цепи (рис.П.2.3). Укажем направление токов в ветвях. Определим сопротивления ветвей. Сопротивление первой ветви

$$R_1' = R_1 + R_{0,1} + R_{23};$$

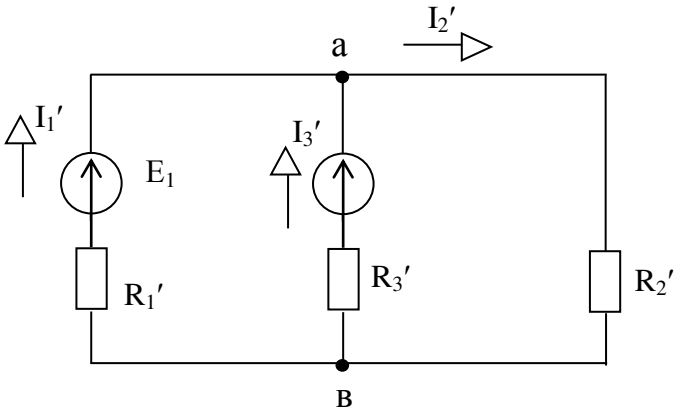


Рис. П.2.3

$$g_{23} = 1/R_4 + 1/R_5 + 1/R_6 + 1/R_7 = 1/24 + 1/20 + 1/12 + 1/16 = 0{,}2375\ См\ ;$$

$$R_{23} = 1/g_{23} = 4{,}2\ Ом\ ;$$

$$R_1' = 0{,}2 + 3{,}8 + 4{,}2 = 8{,}2\ Ом\ .$$

Сопротивление второй ветви $R_2 = R_2' = 6\ Ом.$

Сопротивление третьей ветви

$$R_3' = R_3 + R_{0,3} = 4,8 + 0,2 = 5\ Ом.$$

2. Определим частичные токи, созданные ЭДС E_1 (рис.П.2.4)

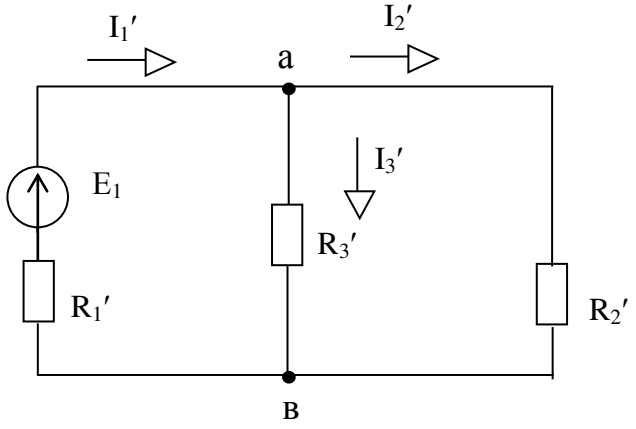


Рис. П.2.4

Эквивалентное сопротивление цепи относительно зажимов ЭДС E_1

$$R_э' = R_1' + \frac{R_2' \cdot R_3'}{R_2' + R_3'} = 8,2 + \frac{5 \cdot 6}{5 + 6} = 8,2 + 2,7 = 10,9\ Ом.$$

Ток в неразветвленной части цепи

$$I_1' = \frac{E_1}{R_э'} = \frac{100}{10,9} = 9,2\ A.$$

Напряжение между точками **а** и **в**

$$U_{ав}' = E_1 - I_1' \cdot R_1' = 100 - 9,2 \cdot 8,2 = 24,6\ B.$$

Токи во второй и третьей ветви

$$I_2' = \frac{U_{ав}'}{R_2'} = \frac{24,6}{6} = 4,1A; \qquad I_3' = \frac{U_{ав}'}{R_3'} = \frac{24,6}{5} = 4,9\ A.$$

3. Определим аналогично частичные токи, созданные ЭДС E_3 (рис.П.2.5):

$$R_э'' = R_3' + \frac{R_1' \cdot R_2'}{R_1' + R_2'} = 5 + \frac{6 \cdot 8{,}2}{6 + 8{,}2} = 5 + 3{,}5 = 8{,}5\,Ом;$$

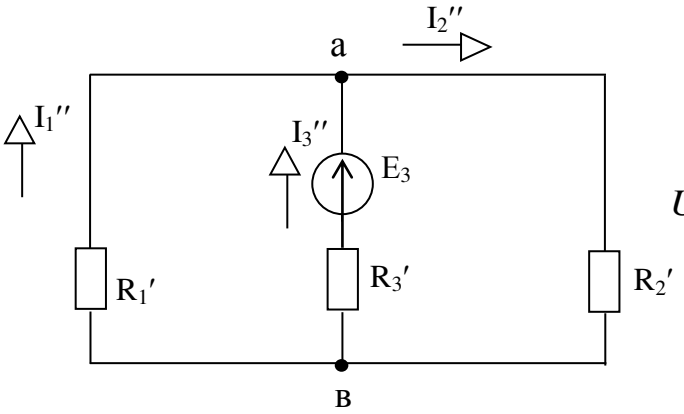


Рис. П.2.5

$$I_3'' = \frac{E_3}{R_э''} = \frac{60}{8{,}5} = 7A.$$

$$U_{ав}'' = E_3 - I_3'' \cdot R_3' = 60 - 7 \cdot 5 = 25B.$$

$$I_1'' = \frac{U_{ав}''}{R_1'} = \frac{25}{8{,}2} = 3A;$$

$$I_2'' = \frac{U''_{ав}}{R_2} = \frac{25}{6} = 4{,}2A.$$

4. Действительные значения токов в ветвях электрической цепи:

$$I_1 = I_1' - I_1'' = 9{,}2 - 3 = 6{,}2\ A;$$

$$I_2 = I_2' + I_2'' = 4{,}2 + 4{,}1 = 8{,}3A;$$

$$I_3 = I_3'' - I_3' = 7 - 4{,}9 = 2{,}1\ A.$$

5. Проверка: по первому закону Кирхгофа

$$I_1 + I_3 - I_2 = 0\ ; \qquad 6{,}2 + 2{,}1 - 8{,}3 = 0.$$

Расчет верен.

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 3

Определить параметры пассивного двухполюсника при частоте тока цепи f=50 Гц. Подключение измерительных приборов показано на схеме (рис. П.3.1).

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

№	*U*	*I*	*P*	*I'*	№	*U*	*I*	*P*	*I'*
	B	*A*	*Вт*	*A*		*B*	*A*	*Вт*	*A*
1	150	5	375	5,3	13	200	8	1000	7,6
2	100	4	300	3,6	14	300	15	3000	14
3	60	2	80	2,2	15	100	4	320	4,2
4	120	3	295	3,4	16	120	2	270	2,3
5	200	12	1400	9,5	17	80	2	60	1,8
6	100	5	300	5,4	18	200	8	1200	7,6
7	90	3	58	2,7	19	120	3	280	2,8
8	200	5	700	4,7	20	60	3	52	3,2
9	220	20	1500	10,2	21	100	10	800	8,8
10	120	4	240	3,8	22	180	3	120	3,2
11	100	4	400	4,3	23	200	5	600	4,7
12	80	2	52	2,3	24	140	7	500	6,4

Исходные данные согласно заданию преподавателя внести в таблицу.

U	*I*	*P*	I^1
В	А	Вт	А

В таблице I^1 – значение тока на входе цепи ток после включения дополнительной емкости.

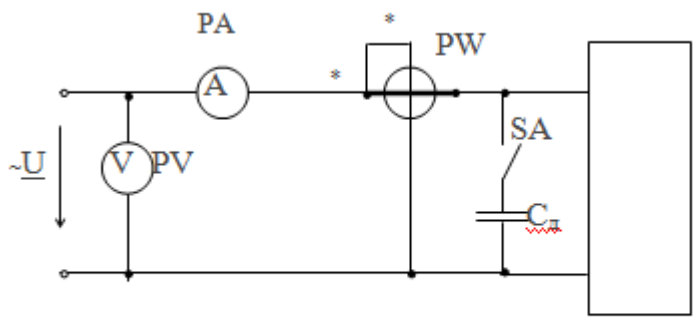


Рис. П.3.1

Требуется определить:

1. Параметры двухполюсника R и X.
2. Характер реактивного сопротивления (индуктивное или емкостное).
3. Значение индуктивности или емкости.
4. Коэффициент мощности двухполюсника.
5. Построить векторную диаграмму напряжения и токов двухполюсника.
6. По векторной диаграмме определить добавочную емкость $C_д$.

Пример выполнения индивидуального задания

Исходные данные:

U	I	P	I'
В	А	Вт	А
200	10	1200	9,5

Решение

1. Полное сопротивление двухполюсника

$$Z = \frac{U}{I} = \frac{200}{10} = 20 \ \ Ом.$$

2. Активное сопротивление двухполюсника

$$R = \frac{P}{I^2} = \frac{1200}{100} = 12 \ \ Ом.$$

3. Реактивное сопротивление двухполюсника

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{20^2 - 12^2} = 16 \ \ Ом.$$

4. Коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{R}{Z} = \frac{12}{20} = 0{,}6; \ \text{тогда} \quad \varphi = 53^0.$$

5. Включение дополнительного конденсатора $C_д$ приводит к уменьшению тока, следовательно, входное сопротивление двухполюсника активно-индуктивное.

6. Строим векторную диаграмму напряжения и токов.

$$I_a = I \cdot cos\varphi = 10 \cdot 0{,}6 = 6 \text{ А},$$

$$I_L = I\sin\varphi = 10 \cdot 0{,}8 = 8 \text{ А}.$$

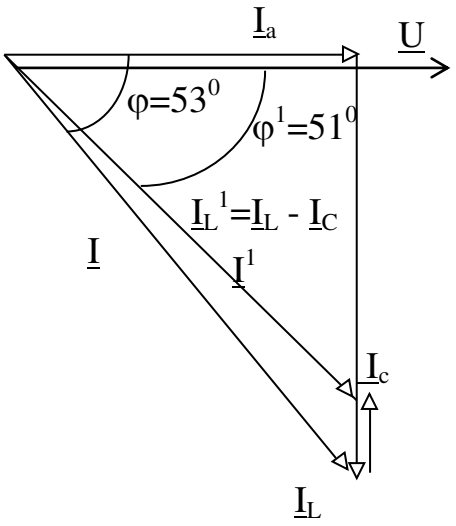


Рис. П.3.2

7. После включения конденсатора C_∂ возникает ток $\underline{I}_C$, который противоположен току $\underline{I}_L$. Так как ток $\underline{I}_a$ остается без изменения, можно легко определить угол φ' сдвига фазы тока $\underline{I}^1$ и напряжения $\underline{U}$.

$$\cos\varphi' = \frac{I_a}{I'} = \frac{6}{9{,}5} = 0{,}63; \qquad \varphi' = 51^0.$$

8. Определим ток I_c.

$$I_L = I'\sin 51^0 = 9{,}5 \cdot 0{,}63 = 7{,}4 \text{ А};$$

$$I_c = I_L - I_L' = 8 - 7{,}4 = 0{,}6 \text{ А}.$$

9. Определим добавочную емкость.

$$X_c' = \frac{U}{I_c} = \frac{200}{0{,}6} = 333 \text{ Ом};$$

$$C = \frac{10^6}{\omega X_c'} = \frac{10^6}{314 \cdot 333} = 9{,}5 \text{ мкФ}.$$

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 4

Рассчитать электрическую цепь с последовательным соединением *R, L, C* при синусоидальном входном напряжении $u = U_m \sin \omega \cdot t$. Схема электрической цепи приведена на рис.П.4.1.

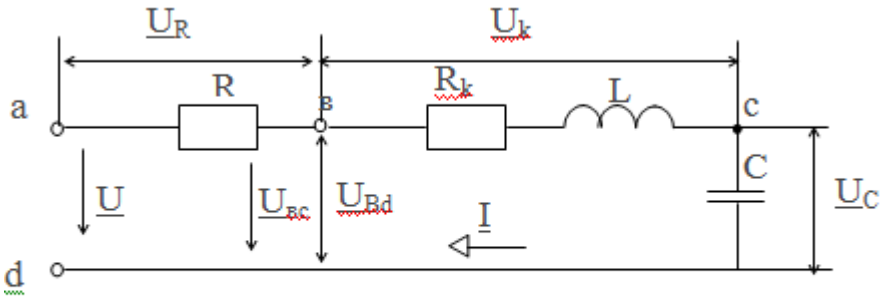


Рис.П.4.1

Требуется определить:

1. Действующие, комплексные и мгновенные значения величин тока, напряжений на активном сопротивлении, на катушке индуктивности, на емкости и между точками (в-d).
2. Полную, активную и реактивную мощности цепи *S,P* и *Q*.
3. Значение емкости $C=C_{рез}$, при которой в цепи наступает резонанс напряжений.
4. Определить при $C = C_{рез}$ действующие значения величин: *I*, U_R, U_k, U_c, U_{Bd}; *P=S*.
5. По результатам расчета построить топографическую диаграмму для режимов $C \neq C_{рез}$ и $C = C_{рез}$.
6. На одном рисунке построить диаграммы: тока $i(\omega t)$, напряжений $U_R(\omega t)$, $U_L(\omega t)$.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

№	*U*	*R*	*Rk*	*L*	*C*	№	*U*	*R*	*Rk*	*L*	*C*
	В	Ом	Ом	Гн	мкФ		В	Ом	Ом	Гн	мкФ
1	100	20	12	0,159	100	9	120	25	12	0,152	26
2	120	40	14	0,140	60	10	80	30	14	0,170	20
3	80	22	10	0,105	96	11	60	36	10	0,251	28
4	60	34	16	0,110	64	12	80	42	10	0,116	40
5	70	36	20	0,07	90	13	100	50	18	0,195	52
6	70	42	24	0,074	70	14	120	62	24	0,165	24
7	80	60	10	0,120	24	15	120	48	22	0,098	56
8	100	28	10	0,146	30						

Исходные данные занести в таблицу.

U	*R*	*Rk*	*Lk*	*C*
В	Ом	Ом	Гн	мкФ

Пример выполнения индивидуального задания

Исходные данные:

U	*R*	R_k	*L*	*C*
В	Ом	Ом	Гн	мкФ
80	50	12	0,136	34

Решение

1. Примем комплекс напряжения $\underline{U} = 80B$.
   Реактивное сопротивление индуктивности и емкости при частоте 50 Гц

$$X_L = \omega L = 314 \cdot 0{,}136 = 43{,}7 \text{ Ом};$$

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot c} = \frac{10^6}{314 \cdot 34} = 93{,}7 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление катушки

$$\underline{Z}_k = 12 + j42{,}7 = 44{,}3e^{j74^o} \text{ Ом};$$

Полное сопротивление емкости $\underline{Z}_c = \ J93{,}7$ Ом;

Полное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{эк} = R + \underline{Z}_k + \underline{Z}_c = 50 + 12 + j42{,}7 - j93{,}7 = 62 - j51 = 80e^{-j39^0} \text{ Ом};$$

ток в цепи $$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{Z_{эк}} = \frac{80}{80e^{-j39^o}} = 1e^{j39^o} \text{ А};$$

напряжение на активном сопротивлении

$$\underline{U}_R = \underline{I} \cdot R = 1 \cdot e^{j39^o} \cdot 50 = 50e^{j39^o} \text{ В};$$

напряжение между точками В и d цепи

$$\underline{U}_{Bd} = \underline{I} \cdot \left(\underline{Z}_k + \underline{Z}_c\right) = 1e^{j39^o}\left(12 + j42{,}7 - j93{,}7\right) = 1e^{j39^o} \cdot \left(12 - j51\right) =$$
$$= 1e^{j39^o} \cdot 52{,}4e^{-j77^o} = 52{,}4e^{-j38^o}\ B.$$

Мгновенные значения тока и напряжений:

$$i = 1{,}41\sin\left(\omega t + 39^o\right)A;\ \ u_R = 50 \cdot \sqrt{2}\sin\left(\omega t + 39^o\right)B\ ;$$

$$u_k = 44{,}3\sqrt{2}\sin\left(\omega t + 113^o\right)B;\ \dot{u}_c = 93{,}7 \cdot \sqrt{2}\sin\left(\omega t - 51^o\right)B.$$

2. Полная комплексная мощность цепи

$$\tilde{S} = \underline{U} \cdot \overset{*}{I} = 80 \cdot 1^{-j39^o} = 62 - j50\ \ BA,$$

тогда активная мощность $P = 62Bm;$ реактивная – $Q = -50BAp$; полная $-S = 80\ BA.$

3. Определение резонансной емкости $C_{рез}$ и $f_{рез}$.

Резонанс наступает при равенстве реактивных сопротивлений $X_L = X_C$.

$$\omega_{рез} L = \frac{1}{\omega_{рез} C};$$

$$\omega_{рез} = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{0{,}136 \cdot 34 \cdot 10^{-6}}} = \frac{1000}{\sqrt{0{,}136 \cdot 34}} = 465c^{-1};$$

$$f_{рез} = \frac{\omega_{рез}}{2\pi} = \frac{465}{6{,}28} = 74\ \text{Гц}.$$

При частоте 50 Гц резонансная емкость

$$C_p = \frac{10^6}{314^2 \cdot 0{,}136} = 72\ \text{мкФ}.$$

При частоте, равной резонансной, $f_{рез} = 74$ Гц .

$$X_{Lp} = \omega_{рез} \cdot L = 465 \cdot 0{,}136 = 63{,}2\ \text{Ом};$$

$$X_{Cp} = \frac{1}{\omega \cdot рез \cdot C} = \frac{10^6}{465 \cdot 34} = 63{,}2\ \text{Ом};$$

$$\underline{Z}_k = 12 + j63{,}2\ \text{Ом}; \qquad \underline{Z}_C = -j63{,}2\ \text{Ом};$$

$$\underline{Z}_{эк} = 50 + 12 + j63{,}2 - j63{,}2 = 62 \text{ Ом}.$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{эк}} = \frac{80}{62} = 1{,}3 \ A; \qquad \underline{U}_R = 50 \cdot 1{,}3 = 65 \text{ В};$$

$$\underline{U}_k = 1{,}3 \cdot (12 + j63{,}2) = 1{,}3 \cdot 64 e^{j79^o} = 83{,}2 \text{ В};$$

$$\underline{U}_c = 1{,}3 \cdot 63{,}2 e^{-j90^o} = 82{,}16 e^{-j90^o} \text{ В};$$

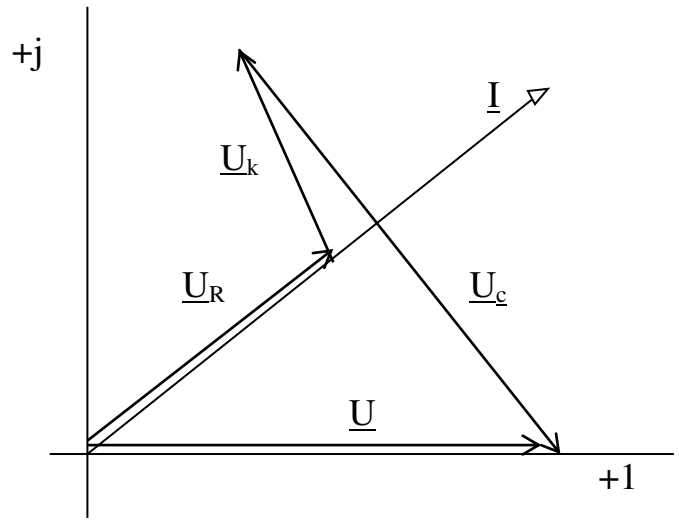
$$\underline{U}_{вd} = 1{,}3 \cdot (12 + j63{,}2 - j63{,}2) = 15{,}6 \text{ В}.$$

Результаты расчетов сведены в таблицу.

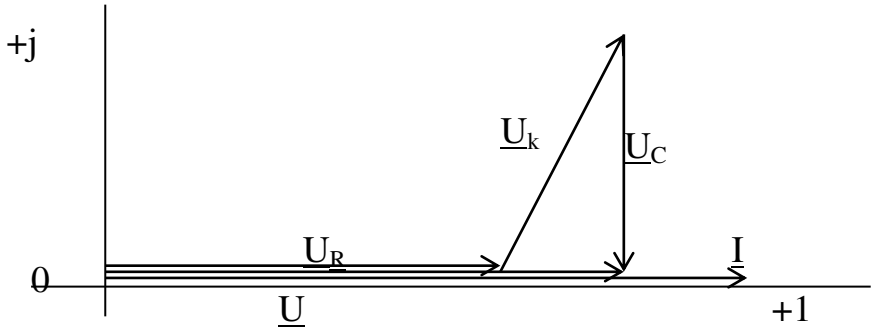
ω		I	φ	U_R	U_k	U_c	U_{Bd}	P	Q	S
рад/с	В	А	град	В	В	В	В	Вт	ВАр	ВА
ω=314	80	1	39	50	44,3	93,7	52,4	62	50	80
$\omega_{рез}$=465	80	1,30	65	83,2	82,16	15,6	104	104	0	104

4. На основе расчетов построены векторные диаграммы:

для частоты f = 50Гц



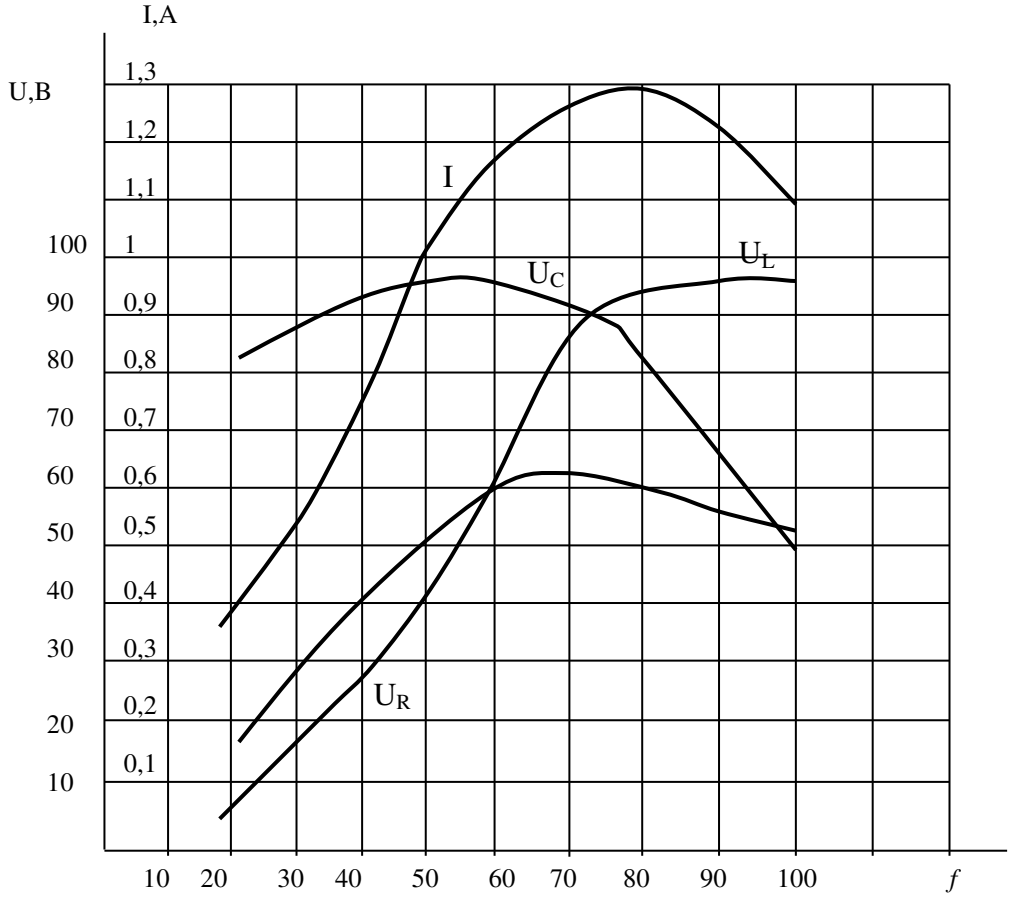
для частоты $f_{рез}$ = 74 Гц



Расчеты тока и напряжений для иных частот сведены в таблицу

f	I	U_R	U_L	U_C
Гц	А	В	В	В
20	3,35	17,5	6	82
40	0,78	39	26,5	91
60	1,25	62,5	63,7	97,5
74	1,3	65	82	82
90	1,2	60	92	62
100	11	55	93	52

По результатам расчетов построены графики:



ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 5

Рассчитать электрическую цепь (рис.П.5.1) с параллельным соединением катушки и емкости при синусоидальном входном напряжении $u = U_m \sin \varphi t$ и частоте тока в сети $f =$ 50 Гц.

Значения исходных данных взять из таблицы согласно заданию преподавателя.

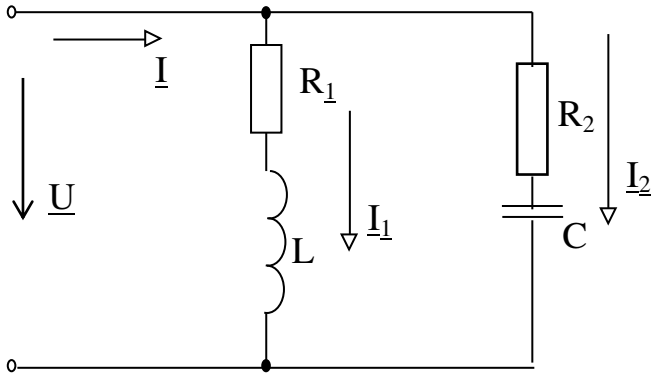


Рис.П.5.1

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

№	U	f	R_1	L	R_2	C	$\cos\varphi$
	В	Гц	Ом	Гн	Ом	мкФ	-
1	150	50	25	0,142	20	40	0,92
2	100	75	20	0,06	15	80	1
3	100	60	12,5	0,057	6	200	0,96
4	100	50	15	0,1	10	60	0,9
5	80	75	18	0,05	10	40	0,98
6	100	60	6,2	0,03	3	400	0,96
7	100	50	20	0,08	10	50	1
8	100	75	25	0,06	20	80	1
9	120	60	15	0,07	3	156	0,95
10	50	50	20	0,07	15	40	0,95
11	60	75	10	0,06	15	70	1
12	120	60	5,2	0,05	8	108	0,98
13	50	50	10	0,05	8	100	0,96
14	60	75	7	0,024	5	70	0,95
15	200	60	35	0,08	10	60	0,98

Требуется определить:

1. Действующие и мгновенные значения токов в ветвях и на входе цепи, активную, реактивную и полную мощности.
2. Составить баланс мощностей.

3. Определить резонансную частоту при заданном значении емкости.

4. Определить резонансную емкость при частоте 50Гц.

5. Определить токи в ветвях на входе цепи и активную, реактивную и полную мощности при $C = C_{рез}$.

6. Результаты, полученные в п.п. 1 и 4, занести в таблицу П.5.1, построить топографические диаграммы для режимов $C \neq C_{рез}$ и $C = C_{рез}$.

7. На одном рисунке построить графики зависимостей токов и входного сопротивления от угловой частоты (принять частоты равные 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5 резонансной частоты f_0).

8. Определить емкость и мощность батареи конденсаторов для повышения коэффициента мощности до заданного значения.

Исходные данные занести в таблицу

U	R_1	R_2	L	C	f	$\cos\varphi$
В	Ом	Ом	Гн	мкФ	Гц	-

Таблица П.5.1

C	I_1	I_2	I	φ_1	φ_2	φ	P	Q	S
мкФ	А	А	А	град	град	град	Вт	вар	ВА
$C =$									
$C_{рез} =$									

Пример выполнения индивидуального задания № 5

Исходные данные:

U	R_1	R_2	L	C	f	$\cos\varphi$
В	Ом	Ом	Гн	мкФ	Гц	-
100	20	10	0,08	50	50	

Решение

1. Угловая частота $\omega = 2\pi f = 314 c^{-1}$.

Полные сопротивления ветвей:

$$\underline{Z}_1 = 20 + j314 \cdot 0{,}08 = 20 + j25 = 32e^{j51^\circ} \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_2 = 10 - j\frac{10^6}{314 \cdot 90} = 10 - j64 = 65e^{-j81^\circ}\ \text{Ом}.$$

Токи ветвей и неразветвленной части цепи:

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_1} = \frac{100}{32e^{j51^\circ}} = 3{,}12e^{-51^\circ} = 1{,}96 - j2{,}4A;$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_2} = \frac{100}{65e^{-j81^\circ}} = 1{,}5e^{81^\circ} = 0{,}23 + j1{,}48A;$$

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = 1{,}96 - j2{,}4 + 0{,}23 + j1{,}48 = 2{,}19 - j0{,}92 = 2{,}37e^{-j23{,}8^\circ}A.$$

Мгновенные значения токов цепи:

$$i_1 = 3{,}12\sqrt{2}\ sin(\omega t - 51^0)A; \qquad i_2 = 1{,}5\sqrt{2}\ sin(\omega t + 81^0)A;$$

$$i = 2{,}37\sqrt{2}\sin(\omega t - 23{,}8^0)\ A.$$

Мощности цепи:

$$P_1 = I_1^2 \cdot R_1 = 194{,}68Bm;\ P_2 = I_2^2 \cdot R_2 = 1{,}5^2 \cdot 10 = 22{,}5Bm;$$

$$P = P_1 + P_2 = 194{,}68 + 22{,}5 = 217{,}18Bm; \quad (*)$$

$$Q_1 = I_1^2 \cdot X_1 = 3{,}1^2 \cdot 25 = 243{,}6\ вар;$$

$$Q_2 = I_2^2 \cdot X_2 = 1{,}5^2 \cdot 64 = 146\ вар;$$

$$Q = Q_1 - Q_2 = 243{,}36 - 146 = 97{,}36\ вар. \ (**)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q_2^2} = \sqrt{217{,}18^2 + 97{,}36^2} = 238\ ВА.$$

Полная комплексная мощность цепи

$$\tilde{S} = \underline{U} \cdot \overset{*}{I} = 100 \cdot 2{,}37e^{j23{,}8^o} = 237e^{j23{,}8} = 216{,}8 + j96BA;$$

отсюда

$$P = 216{,}8Bm;\ \ Q = 96\ \ вар,$$

что достаточно близко к расчетным значениям (*) и (**).

2. Баланс мощности

$$P = 217{,}18 \cong 216{,}8 \ \ Вт;\ Q = 97{,}36 \cong 96 \ \ вар;\ S = 238 \cong 237 \ \ ВА.$$

3. Резонансная частота

$$f_{рез} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}\sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}} = \frac{10^3}{6{,}28\sqrt{0{,}08 \quad 50}}\sqrt{\frac{\frac{0{,}08\cdot 10^6}{50} - 20^2}{\frac{0{,}08\cdot 10^6}{50} - 10^2}} =$$

$$= \frac{10^3}{6{,}28}\sqrt{\frac{1200}{1500}} = 79{,}6 \cdot 0{,}89 = 71 Гц.$$

4. Резонансная емкость при f = 50 Гц.

Резонанс возможен при равенстве реактивных проводимостей:

$$b_L = b_C;\quad \frac{X_L}{Z_1^2} = \frac{X_L}{R_2^2 + X_L^2};\quad \frac{25}{32^2} = \frac{Xc}{100 + X_C^2};\ 0{,}024\cdot 100 + 0{,}024 X_c^2 = X_c;$$

$$X_c^2 - \frac{X_C}{0{,}024} + 100 = 0;$$

$$X_C = \frac{1}{2\cdot 0{,}024} \pm \sqrt{\left(\frac{1}{0{,}048}\right)^2} - 100 = 20{,}8 \pm \sqrt{325}39 \ \text{Ом};$$

$$C_{рез} = \frac{10^6}{\omega \cdot X_C} = \frac{10^6}{314\cdot 39} = 81 мкФ.$$

Емкость $C = C_{рез}$ = 81мкФ.

5. Полное сопротивление ветви с емкостью при $C = C_{рез}$:

$$\underline{Z}_{рез} = 10 - j\frac{10^6}{314\cdot 81} = 10 - j39{,}3 = 40e^{-j75{,}7^o} \text{ Ом}.$$

Значения токов и мощностей при $C = C_{рез}$:

$$\underline{I}_{1рез} = \frac{100}{32e^{-j51^o}} = 3{,}12e^{-j51^o} = 1{,}96 - j2{,}4 A;$$

$$\underline{I}_{2рез} = \frac{100}{40{,}5e^{j75{,}7^o}} = 2{,}45e^{j75{,}7^\circ} = 0{,}6 + j2{,}37 A;$$

$$\underline{I}_{рез} = \underline{I}_{1рез} + \underline{I}_{2рез} = 1{,}96 - j2{,}4 + 0{,}6 + j2{,}37 =$$
$$= 2{,}56 - j0{,}03 = 2{,}56 \ A;$$

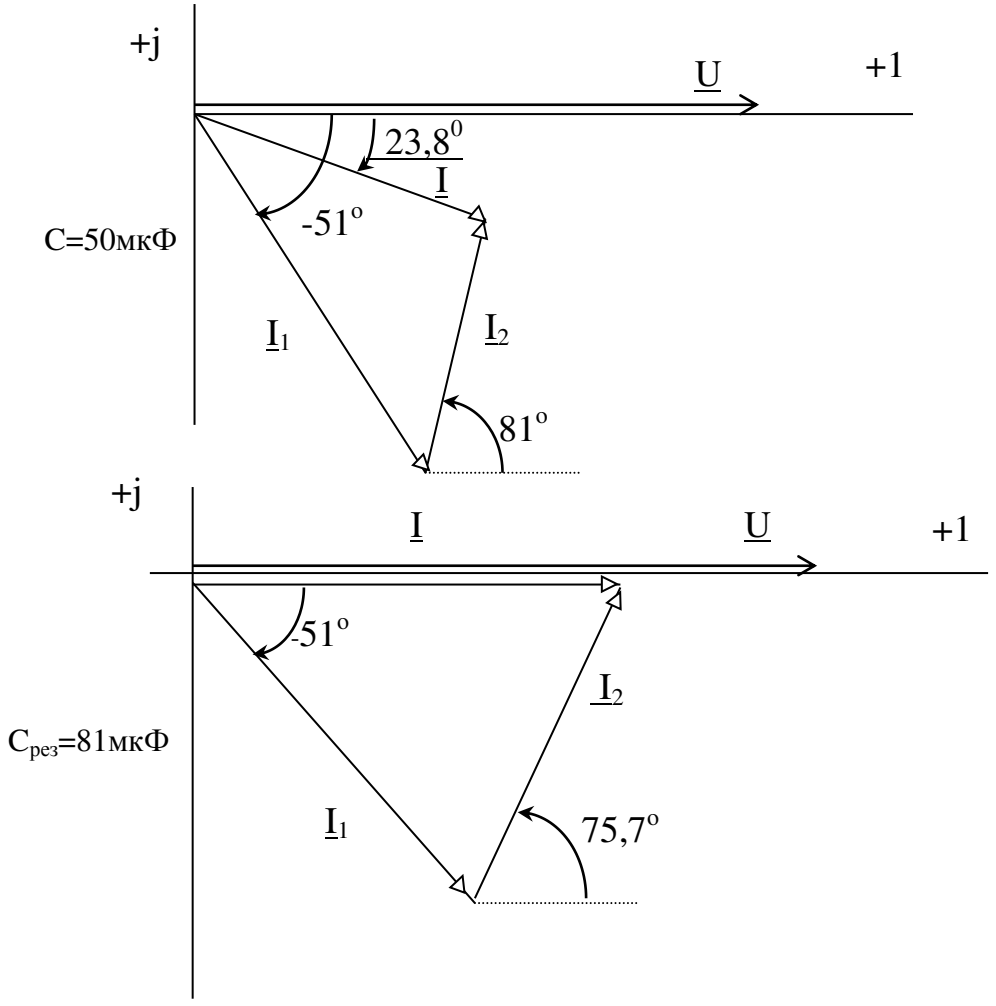
$$\tilde{S}_{рез} = \underline{U} \cdot \overset{*}{\underline{I}}_{рез} = 100 \cdot 2{,}56 = 256 \ BA; \ P = 256 \ Вт.$$

6. Результаты расчетов

Таблица П.5.2

C	I_1	I_2	I	φ_1	φ_2	φ	P	Q	S
мкФ	А	А	А	град	град	град	Вт	вар	ВА
C = 50	3,12	1,5	2,37	-51	81	29,8	217	96	237
$C_{рез}$= 81	3,12	2,45	2,56	-51	75,7	0	256	0	256

Векторные диаграммы токов и напряжений

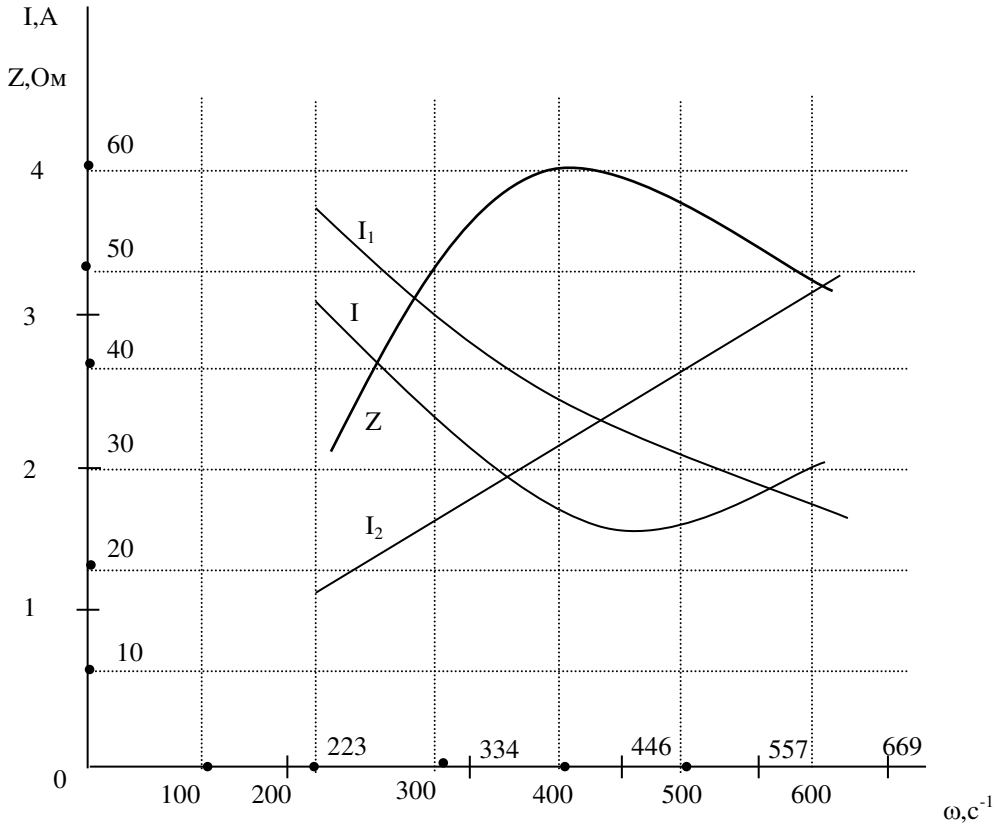


7. Для построения графиков заполним таблицу П.5.3.

Значения токов и полного сопротивления цепи при изменении частоты f_0=71Гц.

Таблица П.5.3

F	ω	Z_1	Z_2	Z	I_1	I_2	I
$0{,}5f_0$	223	$26{,}8e^{+j41{,}6}$	$90e^{-j89{,}6}$	$31{,}9e^{-j25}$	$3{,}73e^{-j41{,}7}$	$1{,}11e^{-j89{,}6}$	$3{,}2e^{-j25}$
$0{,}75f_0$	334	$33{,}4e^{j53}$	$61e^{-j80}$	$44{,}4e^{-j21}$	$2{,}99e^{-j53}$	$1{,}6e^{-j80}$	$2{,}25e^{-j21}$
$1f_0$	446	$41e^{j61}$	$45{,}9e^{-j77}$	$59{,}9e^{-j0}$	$2{,}44e^{-j61{,}6}$	$2{,}17e^{-j77}$	1,67
$1{,}25f_0$	557	$48{,}8e^{j65{,}8}$	$37{,}4e^{-j74}$	$57{,}8e^{-j26}$	$2e^{-j65{,}8}$	$2{,}67e^{-j74}$	$1{,}73e^{-j26}$
$1{,}5f_0$	669	$57{,}1e^{j69{,}5}$	$31{,}5e^{-j71{,}5}$	$47{,}6e^{-j40}$	$1{,}75e^{-j69{,}5}$	$3{,}17e^{-j71{,}5}$	$2{,}1e^{-j40}$



8. Повышение коэффициента мощности до 0,95.

Коэффициент мощности данной цепи cos φ = 0,91, тогда компенсационная емкость

$$C_{ком} = \frac{P(tg\varphi_н - tg\varphi)}{U^2 \cdot 2\pi f} = \frac{217(tg\,23{,}8^o - tg\,18^o)}{100^2 \cdot 314} =$$

$$= \frac{217(0{,}44 - 0{,}32)\cdot 10^6}{100^2 \cdot 314} = 8 мкФ.$$

ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 6

Рассчитать электрическую цепь с индуктивно связанными катушками при синусоидальном входном напряжении.

Схема электрической цепи приведена на рис.П6.1.

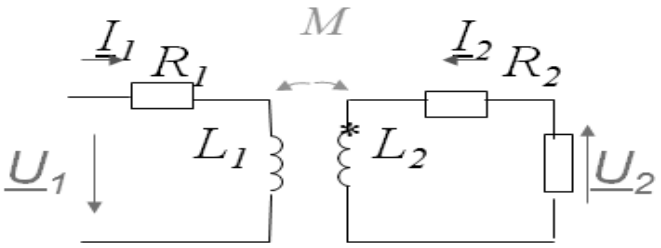


Рис. П6.1

Требуется определить:

1. Определить взаимную индуктивность M, вносимые сопротивления $R_{вн}$ и $X_{вн}$, комплексное значение тока $\underline{I}_1$, активную мощность P_1 первичной цепи трансформатора и активную мощность P_2 нагрузки; действующее значение тока I_2 и напряжение U_2.

2. Построить в масштабе векторную диаграмму трансформатора.

.

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Вариант		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
U_1	*В*	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95
R_1	*Ом*	20	22	24	26	28	30	32	34	35	38	40	42	44	46	48
R_2	*Ом*	15	17	19	21	23	25	27	29	31	33	35	37	39	41	43
L_1	*мГ*	70	71	72	73	74	75	76	77	79	81	83	85	87	89	91
L_2	*мГ*	45	47	49	51	53	55	57	59	61	63	65	67	69	71	73
k	-	0,8	0,7	0,6	0,5	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,9
$R_н$	*Ом*	50	40	30	60	55	45	35	65	50	40	30	60	55	45	35

Исходные данные заносятся в таблицу.

U_1	R_1	R_2	L_1	L_2	k	$R_н$

Пример выполнения индивидуального задания № 6

Исходные данные:

U_1	R_1	R_2	L_1	L_2	k	$R_н$
В	*Ом*	*Ом*	*мГн*	*мГн*	-	*Ом*
25	20	15	70	45	0,8	50

Решение

1. Определим взаимную индуктивность M

$$M = k \cdot \sqrt{L_1 L_2} = 0{,}8 \cdot \sqrt{70 \cdot 45} = 45 мГн.$$

Для определения вносимых сопротивлений.

Предварительно вычислим реактивные сопротивления трансформатора X_1, X_2, X_M:

$$X_1 = \omega L_1 = 314 \cdot 70 \cdot 10^{-3} = 22 \ Ом;$$

$$X_2 = \omega L_2 = 314 \cdot 45 \cdot 10^{-3} = 14 \ Ом;$$

$$X_M = \omega M = 314 \cdot 0{,}045 = 14 \ Ом.$$

Так как $X_н=0$, то

$$R_{вн} = \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_н)^2 + X_2^2}(R_2 + R_н) = \frac{314^2 \cdot (0{,}045)^2}{(15+50)^2 + 14^2}(15+50) =$$

$$= \frac{200}{4421} \cdot 65 = 3 \ Ом;$$

$$X_{вн} = \frac{\omega^2 M^2}{(R_2 + R_н)^2 + X_2^2} \quad X_2 = \frac{314 \quad (0{,}045)^2}{(15+50)^2 + 14^2} \quad 14 = \quad 0{,}6 \ Ом.$$

Комплекс тока $\underline{I}_1$

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{(R_{вн} + R_1) + j(X_1 + X_{вн})} = \frac{25}{(20+3) + j(22-0{,}6)} =$$

$$= \frac{25}{31{,}4 e^{j43^o}} = 0{,}8 e^{-j43^o} \ A.$$

Активная мощность P_1 первичной цепи трансформатора и активной мощности P_2 нагрузки $R_н$.

$$P_1 = U_1 I_1 \cos\varphi_1 = 25 \cdot 0{,}8 \cdot \cos 43^o = 14{,}5 \ Вт.$$

Обозначим $I_1^2 R_{вн} = P_{вн}$ - вносимая мощность.

$$P_{вн} = 0,83^2 \cdot 3 = 1,92\ Вт.$$

Эта мощность выделяется в сопротивлениях вторичного контура R_2 и $R_н$, поэтому $I_2^2(R_2+R_н) = P_{вн}$, откуда

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_{вн}}{R_2 + R_н}} = \sqrt{\frac{1,92}{15+50}} = 0,172\ \ A.$$

Полезная мощность $P_2 = I_2^2 R_н = 0,172^2 \cdot 50 = 1,48\ Вт.$
Тогда КПД равен:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100 = \frac{1,48}{14,5} 100 = 10,2\%.$$

2. Построение векторной диаграммы воздушного трансформатора.

Для построения векторной диаграммы необходимо предварительно вычислить значения напряжений на участках цепи.

Следует выбрать масштабы напряжения и тока.

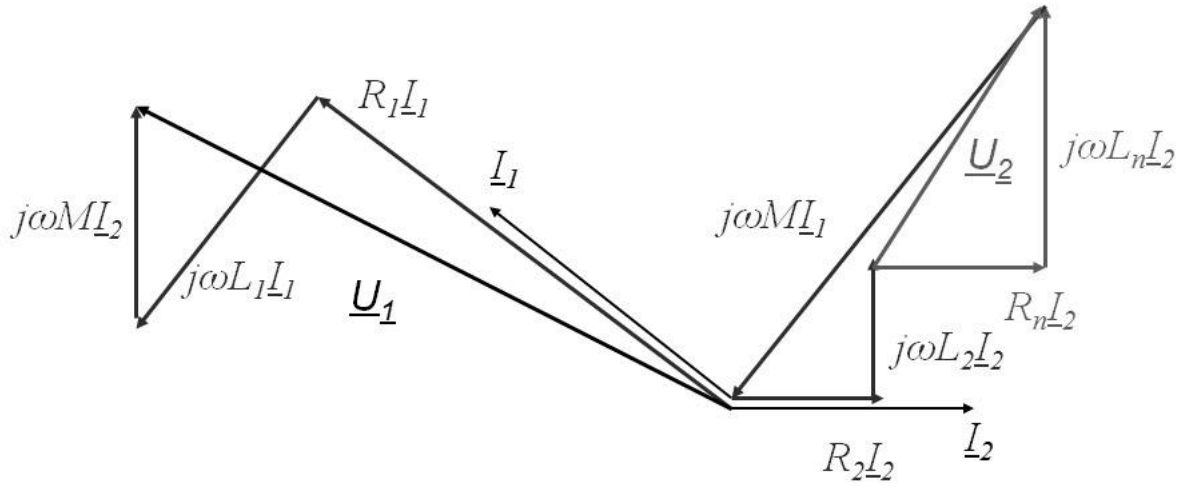
Построение векторной диаграммы начинают с вектора тока $\underline{I_2}$, который откладывают на комплексной плоскости параллельно оси действительных чисел (удобно для построения принять начальную фазу этого тока равной нулю).

Вдоль направления вектора этого тока откладывают в масштабе напряжений вектор напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки R_2 (вектор $R_2\underline{I_2}$). Перпендикулярно этому вектору откладывают вектор напряжения на индуктивности вторичной обмотки в масштабе напряжений (вектор $j\omega L_2\underline{I_2}$).

К последнему вектору параллельно току $\underline{I_2}$, откладывают вектор напряжения на активном сопротивлении приемника (вектор $R_н\underline{I_2}$) и прибавляют к нему под углом плюс 90^0 вектор напряжения на индуктивном сопротивлении приемника (вектор $j\omega L_н\underline{I_2}$). Векторная сумма последних двух векторов дает вектор напряжения на вторичных зажимах трансформатора $\underline{U_2}$ (напряжение на приемнике) . Конец вектора $\underline{U_2}$ соединяют с началом системы координат. Этот вектор - напряжение индуктированное из первичной обмотки во вторичную $j\omega M\underline{I_1}$ *(эдс взаимоиндукции, индуцтрованная током первочной обмотки во вторичную)*.

Теперь можно определить направление вектора тока первичной обмотки - откладываем вектор тока $\underline{I_1}$ в масштабе токов перпендикулярно напряжению $j\omega M\underline{I_1}$.

Вдоль вектора тока $\underline{I}_1$ в масштабе напряжений откладываем вектор напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки (вектор $R_1\underline{I}_1$). Перпендикулярно этому вектору откладывают вектор напряжения на индуктивности первичной обмотки в масштабе напряжений (вектор $j\omega L_1\underline{I}_1$) и к нему прибавляем вектор ЭДС взаимоиндукции индуктированной током вторичной обмотки в первичную $j\omega M\underline{I}_2$. Этот вектор направлен перпендикулярно току $\underline{I}_2$. Замыкающий вектор дает значение и начальную фазу вектора напряжения на первичной обмотке $\underline{U}_1$.



ИНДИВИДУАЛЬНОЕ ЗАДАНИЕ № 7

Электрическая цепь постоянного тока со смешанным соединением линейных и нелинейных элементов представлена на рис. П7.1.

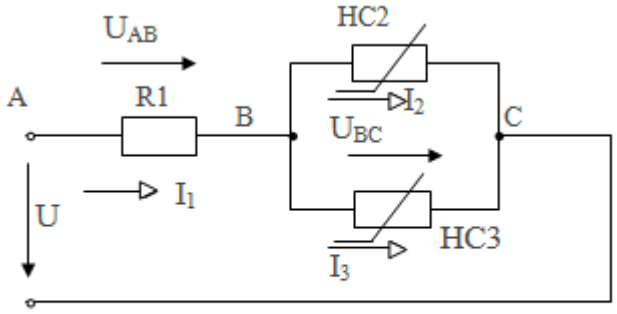


Рис.П7.1

Используя заданные вольтамперные характеристики нелинейных элементов и значения линейных сопротивлений, определить:

- токи в ветвях I_1, I_2, I_3;
- напряжения на участках цепи U_{AB} и U_{BC};
- полученные результаты занести в таблицу П7.1.

Таблица П7.1

U_{AB}, B	U_{BC}, B	I_1, A	I_2, A	I_3, A

Пример выполнения индивидуального задания

Исходные данные: U= 16 В; R_1 =1Ом

ВАХ НС2

U,B	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
I,A	3	4	4,5	4,5	4,5	4,5	5,4	7,5	12	16

ВАХ НС3

U,B	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
I,A	4	6	7,2	8,2	8,5	9,2	9,5	9,7	9,8	10

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ

Вариант 1, U =8В						Вариант 2, U =8В						Вариант 3, U =10В					
НС1		НС2		НС3		НС1		НС2		НС3		НС1		НС2		НС3	
U,B	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*
2	1,1	2	0,28	2	0,24	1	0,68	2	0,3	2	0,38	1	0,25	2	0,46	2	0,3
4	1,52	4	0,52	4	0,42	2	1,08	4	0,5	4	0,62	2	0,5	4	0,7	4	0,5
6	1,8	6	0,7	6	0,56	3	1,34	6	0,64	6	0,81	3	0,85	6	0,86	6	0,65
8	2	8	0,84	8	0,64	4	1,6	8	0,73	8	0,95	4	1,28	8	0,96	8	0,73
10	2,04	10	1	10	0,72	5	1,79	10	0,75	10	1,05	5	2,1	10	1	10	0,75
						6	1,88										
						7	2										

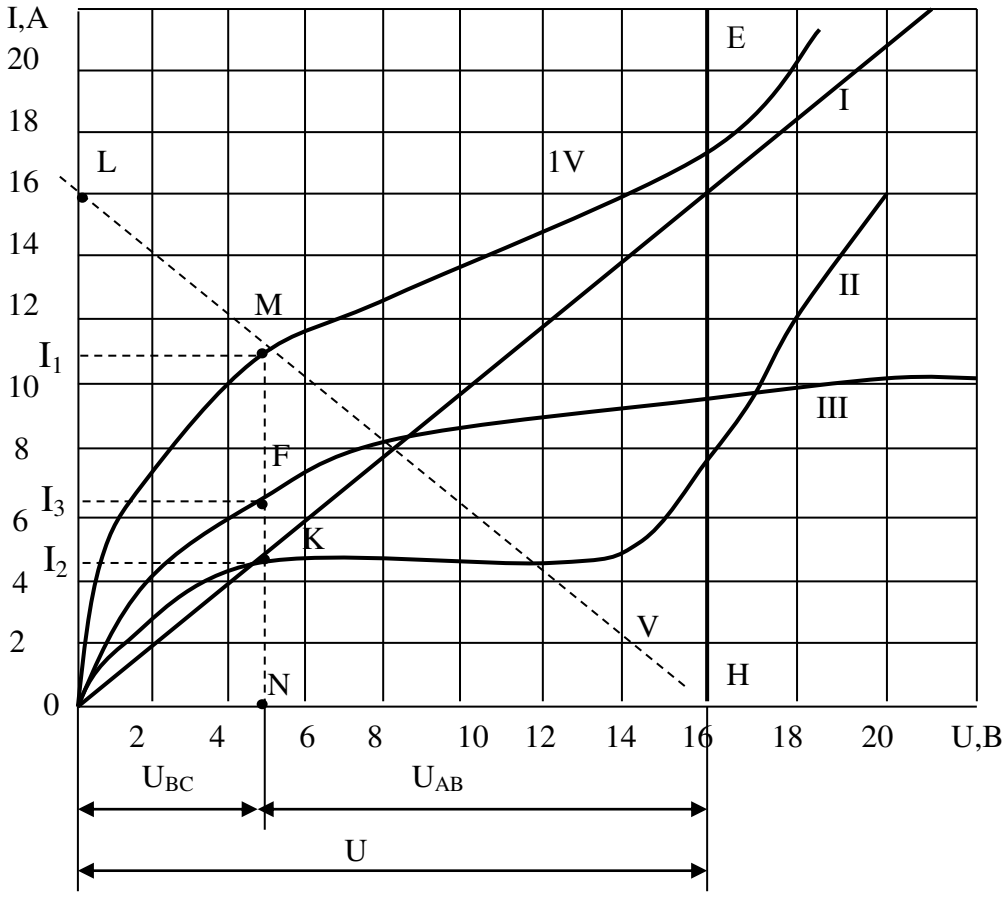
Вариант 4, U =8В					Вариант 5, U =10В					Вариант 6, U =20В					Вариант7, U =24В				
R1	НС2		НС3		НС1		R2	НС3		НС1		НС2		R3	НС1		R2	НС3	
R1,Ом	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*R1,Ом*	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*U,B*	*I,A*	*R1,Ом*	*U,B*	*I,A*	*R2,Ом*	*U,B*	*I,A*
	1	0,2	1	0,1	2	0,98		2	3,2	4	0,25	4	0,25		2	0,03		2	0,36
	2	0,34	2	0,18	4	1,5		4	5,2	8	0,63	8	0,4		4	0,08		4	0,18
	3	0,46	3	0,26	6	1,85		6	6,8	10	1	12	0,53		6	0,14		8	0,29
	4	0,6	4	0,32	8	2,05		8	7,6	11	1,3	16	0,6		8	0,22		12	0,37
4	5	0,68	5	0,36	10	2,18	8	10	8,4			20	0,65	40	10	0,34	40	16	0,43
	6	0,76	6	0,4								24	0,68		12	0,45		20	0,47
	7	0,72	7	0,44											14	0,6		24	0,5
	8	0,87	8	0,46											16	0,85		28	0,5
	10	0,95	10	0,5											18	1,2			

Вариант 8, U =8 В						Вариант 9, U =12В						Вариант 10, U =12В					Вариант 11, U =8В				
НС1		НС2		НС3		НС1		НС2		НС3		R1	НС2		НС3		R1	НС2		НС3	
U,В	*I,А*	*U,В*	*I,А*	*U,В*	*I,А*	*U,В*	*I,А*	*U,В*	*I,А*	*U,В*	*I,А*	*R1,Ом*	*U,В*	*I,А*	*U,В*	*I,А*	*R1,Ом*	*U,В*	*I,А*	*U,В*	*I,А*
20	2	20	0,4	20	1	1	0,12	1	0,14	2	0,18		2	0,34	2	0,11		2	3	2	4
40	3,4	40	0,8	40	1,8	2	0,18	2	0,24	4	0,32		4	0,5	4	0,2		4	4	4	6
60	4,5	60	1,5	60	2,4	3	0,3	3	0,35	6	0,4		6	0,63	6	0,26		6	4,5	6	7,2
80	5,4	80	3,4	80	3	4	0,43	4	0,42	8	0,46		8	0,71	8	0,3		8	4,5	8	8,2
100	6,3	100	4,4	100	3,3	5	0,6	5	0,47	10	0,5	12	10	0,77	10	0,34	1	10	4,5	10	8,8
120	6,6	120	5	120	3,6	6	0,8	6	0,55	12	0,53		12	0,8	12	0,38		12	4,5	12	9,2
140	7	140	5,4	140	3,8	7	0,8	8	0,64	14	0,56		14	0,81	14	0,39		16	7,5	14	9,5
160	7,2	160	5,6	160	3,9	8	1,4	10	0,72									18	12,2	16	9,7
								14	0,8									20	18,5	18	9,7

Вариант 12, U =14В					Вариант 13, U =12В				Вариант 14, U =16В						Вариант 15, U =8В				
НС1		НС2		R3	R1	R2	НС3		НС1		НС2		НС3		R1	НС2		НС3	
U,В	*I,А*	*U,В*	*I,А*	*R3,Ом*	*R1,Ом*	*R2,Ом*	*U,В*	*I,А*	*U,В*	*I,А*	*U,В*	*I,А*	*U,В*	*I,А*	*R1,Ом*	*U,В*	*I,А*	*U,В*	*I,А*
2	0,12	2	0,18				2	0,6	2	0,2	2	0,2	4	0,36		2	1,2	2	0,7
4	0,3	4	0,39				4	1,25	4	0,38	4	0,38	6	0,54		4	2	4	1,1
6	0,58	6	0,47				6	1,7	6	0,55	6	0,48	8	0,64		6	2,7	6	1,5
8	0,96	8	0,58				8	2,1	8	0,69	8	0,57	10	0,69		8	3,1	8	1,8
10	1,56	10	0,67	40	2	3	10	2,5	10	0,8	10	0,64	12	0,72	2	10	3,5	10	1,85
		12	0,73				12	2,65	12	0,88	12	0,68	14	0,69		12	3,7	12	1,9
		14	0,78				14	2,75	14	0,96	14	0,72	16	0,64		14	3,9	14	1,9
									16	1			18	0,58		16	3,95	16	1,8
									18	1,04									

Решение:

1. Строим вольтамперные характеристики линейного сопротивления R и нелинейных сопротивлений НС2 и НС3.



I - вольтамперная характеристика линейного сопротивления *R;*
II - вольтамперная характеристика нелинейного сопротивления НС2;
III – вольтамперная характеристика нелинейного сопротивления НС3.

2. Путем суммирования ординат кривых II и III строим суммарную вольтамперную характеристику параллельного участка цепи ВС – кривая 1V.

3.Сопротивление R_1 и участок цепи ВС соединены последовательно, следовательно, для определения тока I_1 и напряжений U_{AB} и U_{BC}, можно использовать метод опрокинутой характеристики. Строим относительно НЕ опрокинутую вольтамперную характеристику V сопротивления R_1.

4. Пересечение суммарной характеристики 1V и опрокинутой характеристики V в точке М является решением задачи. Перпендикуляр, опущенный из точки М на ось абсцисс в точку N, дает возможность определить напряжение $U_{AB} = m_V \cdot \mathrm{HN}$ и $U_{BC} = m_V \cdot \mathrm{ON}$.

Перпендикуляры, опущенные на ось ординат из точек M ,F и K, позволяют определить токи $I_1 = m_I \cdot$ MN, $I_2 = m_I \cdot$ MN, $I_3 = m_I \cdot$ FN.

5. Масштаб $m_V = 2$ В/см, $m_I = 2$А/см, следовательно:

$U_{AB} = 2 \cdot 5{,}5 = 11$ В, $U_{BC} = 2 \cdot 2{,}5 = 5$ В,

$I_1 = 2 \cdot 5{,}4 = 10{,}8$ А, $I_2 = 2 \cdot 2{,}15 = 4{,}3$ А, $I_3 = 2 \cdot 3{,}25 = 6{,}5$ А.

Результаты расчетов сведем в таблицу вида:

$U_{AB,}\ B$	$U_{BC,}B$	$I_1,\ A$	$I_2,\ A$	$I_3,\ A$
11	5	10,8	4,3	6,5