

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И.Носова

Г.П. Корнилов, А.А. Николаев

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ ПО ДИСЦИПЛИНАМ
«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
И «ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ»**

*Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

Магнитогорск
2011

УДК [621.3 + 621.38](075)
ББК [31.2 + 32.85]я7

Рецензенты:

*Заведующий кафедрой прикладной информатики и управляющих
систем автоматики Новотроицкого филиала
Московского института стали и сплавов,
кандидат технических наук, доцент*
С.Н. Басков

*Начальник центральной электротехнической лаборатории
ОАО «ММК», кандидат технических наук*
В.В. Головин

Корнилов Г.П., Николаев А.А.

Лабораторный практикум по дисциплинам «Теоретические основы электротехники», «Основы электротехники и электроники»: учеб. пособие. – Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им.Г.И.Носова, 2011. – 76 с.: ил.

В учебном пособии даны основные сведения о программе схемотехнического моделирования Multisim и работе с ней на персональном компьютере. Изложены содержание и методика выполнения работ по следующим темам:

- исследование разветвленной цепи постоянного тока;
- исследование однофазной цепи переменного тока;
- исследование резонансов в цепи переменного тока;
- электрические цепи с взаимной индукцией;
- трехфазные цепи.

Предназначено для студентов электротехнических специальностей, изучающих дисциплины «Теоретические основы электротехники», «Основы электротехники и электроники».

УДК [621.3 + 621.38](075)
ББК [31.2 + 32.85]я7

© Магнитогорский государственный
технический университет
им. Г.И.Носова, 2011

© Корнилов Г.П.,
Николаев А.А., 2011

Основная цель теоретического исследования в любой области знаний состоит в том, чтобы найти такую точку зрения, с которой объект представляется в своей предельной простоте.

Дж. У. Гиббс.

Предисловие

Настоящий практикум представляет собой дополнение к лабораторным работам по дисциплинам «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), «Основы электротехники и электроники» (ОЭТ) и выполняется полностью на персональной вычислительной машине или проще – на компьютере. В таком переходе есть свои плюсы и минусы.

Безусловным достоинством машинного моделирования является высокая точность экспериментов или, другими словами, почти полное совпадение результатов моделирования с теоретическими расчетами, так как здесь нет реальных элементов, которым присущи разброс и дрейф их параметров – технологических, температурных и т.п.

Из сравнения реальной лаборатории с виртуальной следует заметить, что вторая является более оснащенной и приспособленной, например, для анализа линейных и нелинейных электрических цепей. Так, в программе схемотехнического моделирования Multisim фирмы National Instruments, с которой мы работаем, имеется цифровой двухканальный осциллограф с памятью, измеритель амплитудно- и фазочастотных характеристик, генератор сигналов различной формы, функциональные блоки и многое другое. Поэтому при настоящем дефиците аудиторных занятий, используя машинное моделирование, сделать можно больше, а изучить глубже.

Три пути у человека, чтобы разумно поступать: первый, самый благородный – размышление, второй, самый легкий – подражание, третий, самый горький – опыт.
Конфуций.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. Цель работы

1. Изучить основные законы электрических цепей.
2. Изучить и освоить принципы и методы расчета и анализа сложных электрических цепей постоянного тока с одним и несколькими источниками электрической энергии, а именно:
 - метод эквивалентных преобразований;
 - метод наложения;
 - метод эквивалентного генератора;
 - принцип взаимности;
 - принцип компенсации.

2. Содержание работы

Лабораторная работа выполняется на компьютере с использованием программы схемотехнического моделирования Multisim фирмы National Instruments. Работу можно проделать и на лабораторном стенде, задаваясь соответствующими параметрами.

3. Подготовка к работе

3.1. Теоретическое исследование разветвленной электрической цепи с одним источником электрической энергии

- 3.1.1. Начертить схему электрической цепи, приведенной на рис. 1.
- 3.1.2. Рассчитать методом эквивалентных преобразований эквивалентное сопротивление цепи, все токи в ветвях, напряжения на всех участках цепи, а также мощность потребления энергии цепью для пяти различных значений регулируемого сопротивления R_6 (см. рис. 1).

Величину ЭДС E_1 и значения сопротивлений резисторов взять из табл. 1. При этом сопротивление R_6 , приведенное в табл. 1, считать базовым, все остальные – долевыми от него, т.е. $R_{61}=0,25R_6$, $R_{62}=0,5R_6$, $R_{63}=0,75R_6$, $R_{64}=R_6$, $R_{65}=2R_6$.

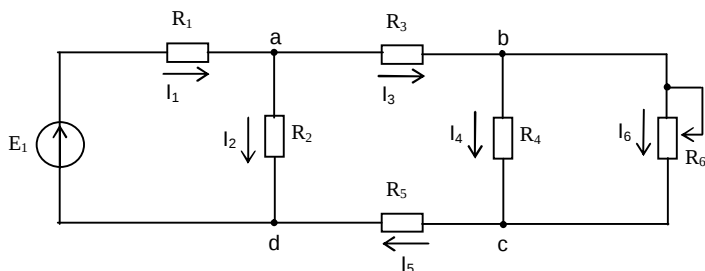


Рис. 1

Таблица 1

Номер бригады	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом	E_1 , В	E_2 , В
1	4	6	0,3	4	3	6	10	20
2	2	6	1	2	3	2	12	18
3	1	5	2	6	1	3	15	5
4	0,4	2	3	2	4	2	10	20
5	1	4	0,6	2	2	5	20	10
6	8	12	0,6	8	6	12	20	40
7	0,8	4	6	4	8	12	20	40
8	1	2,5	1	3	0,5	3	7,5	2,5
9	2	10	4	12	2	6	30	10
10	2	3	1,5	2	1,5	4	5	10
11	3	12	1,8	6	6	10	60	20
12	3	7,5	3	9	1,5	15	22,5	7,5
13	2	8	1,2	4	4	10	40	20

3.1.3. Результаты расчета занести в табл. 2.

3.1.4. Проверить правильность расчета токов и напряжений по законам Кирхгофа. Согласно первому закону Кирхгофа для узлов электрической цепи на рис. 1 должно быть:

- для узла **a** $I_1 = I_2 + I_3$;
- для узла **b** $I_3 = I_4 + I_6$.

Согласно второму закону Кирхгофа для контуров электрической цепи на рис.1 должно быть:

- для контура **a-b-c-d** $U_{ad} = U_{ab} + U_{bc} + U_{cd}$.

- 3.1.5. Построить на одном графике зависимости токов $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ от величины сопротивления R_6 . На другом графике построить кривые зависимости эквивалентного сопротивления цепи и мощности потребления энергии от величины сопротивления R_6 , т.е. $R_3=f(R_6)$ и $P=f(R_6)$.
- 3.1.6. Составить баланс мощностей.
- 3.1.7. Проанализировать полученные результаты и сделать обоснованные выводы.
- 3.1.8. Рассматривая электрическую цепь на рис. 1 относительно зажимов **b** и **c** как активный двухполюсник, рассчитать параметры этого двухполюсника: $U_{всхх}, R_{вх}, I_{кз}$.
- 3.1.9. Рассчитать ток I_6 в резисторе R_{61} по данным п.3.1.8 и сравнить его с результатом в табл. 2.

Таблица 2

Вид исследования	I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_4, A	I_5, A	I_6, A	U_{ab}, B	U_{bc}, B	U_{cd}, B	U_{ad}, B	$R_3, Ом$	$P, Вт$	$R_{6k}, Ом$
Расчет													$R_{61}=$
													$R_{62}=$
													$R_{63}=$
													$R_{64}=$
													$R_{65}=$
Эксперимент													$R_{61}=$
													$R_{62}=$
													$R_{63}=$
													$R_{64}=$
													$R_{65}=$

- 3.1.10. Рассчитать максимальную мощность P_{max} , которую активный двухполюсник с параметрами $U_{всхх}$ и $R_{вх}$ (см. п. 3.1.8) может передать согласованной нагрузке.

3.2. Теоретическое исследование электрической цепи с двумя источниками электрической энергии

- 3.2.1. Для электрической цепи, приведенной на рис. 2, рассчитать все токи методом наложения. Величины ЭДС и сопротивлений взять из табл. 1.

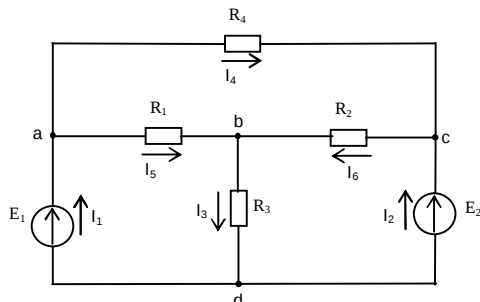


Рис. 2

- 3.2.2. Выбрать произвольно и указать стрелками условные положительные направления токов во всех ветвях цепи (см. рис. 2).
- 3.2.3. Результаты расчетов занести в табл. 3.
- 3.2.4. Проверить правильность расчета токов составлением баланса мощностей.

Таблица 3

Вид исследования	I_1, A	I_2, A	I_3, A	I_4, A	I_5, A	I_6, A
Расчет						
Эксперимент						

4. Экспериментальная часть работы

4.1. Исследование электрической цепи с одним источником электрической энергии

- 4.1.1. Собрать схему в программе Multisim в соответствии с примером, представленным на рис. 3.
- 4.1.2. Измерить токи во всех ветвях, напряжение на указанных участках цепи и мощность потребления энергии цепью Р при пяти значениях переменного резистора R_6 . Величину ЭДС E_1 и значения сопротивлений резисторов взять из табл. 1. Значение сопротивления R_6 , приведенное в табл. 1, считать максимальным.

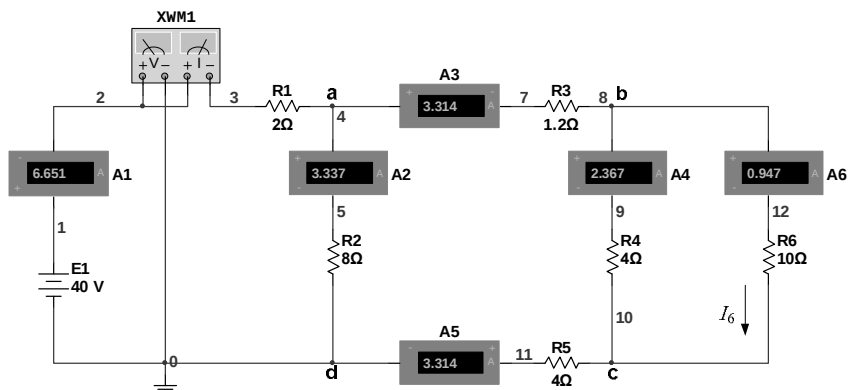


Рис. 3

Измерения выполнять в порядке, указанном в табл. 2, т.е. при одном и том же значении сопротивления R_6 сначала измеряется ток I_1 , затем I_2 , I_3 и т.д., затем измерить напряжения: U_{ab} , U_{bc} , U_{cd} , U_{da} и мощность потребления энергии цепью Р. Результаты измерений занести в табл. 2 и сравнить их с результатами, полученными при расчете в п. 3.1.2. В случае значительного расхождения результатов найти ошибки в расчете и исправить их.

Прежде чем переходить ко второму режиму работы цепи, т.е. при втором значении сопротивления R_6 , необходимо убедиться в справедливости законов Кирхгофа. При этом должны выполняться уравнения (см. п. 3.1.4):

$$I_1 = I_2 + I_3;$$

$$I_3 = I_4 + I_6;$$

$$U_{ad} = U_{ab} + U_{bc} + U_{cd}.$$

- 4.1.3. Сравнить результаты расчёта и эксперимента, они должны совпасть с точностью до 1%, т.е.

$$\frac{I_{\text{экс}} - I_{\text{расч}}}{I_{\text{экс}}} \cdot 100\% \leq \pm 1\%.$$

- 4.1.4. Экспериментально убедиться в справедливости принципа взаимности (обратимости) линейных электрических цепей постоянного тока [5-7]. С этой целью в схеме рис. 3 измерить амперметром ток I_6 при заданном в табл. 1 сопротивлении резистора R_{61} и записать это значение I_6 .

После этого перенести ЭДС E_1 в ветвь с резистором R_6 и с направлением, совпадающим с направлением тока I_6 в схеме рис. 1, т.е. получить схему, показанную на рис. 4

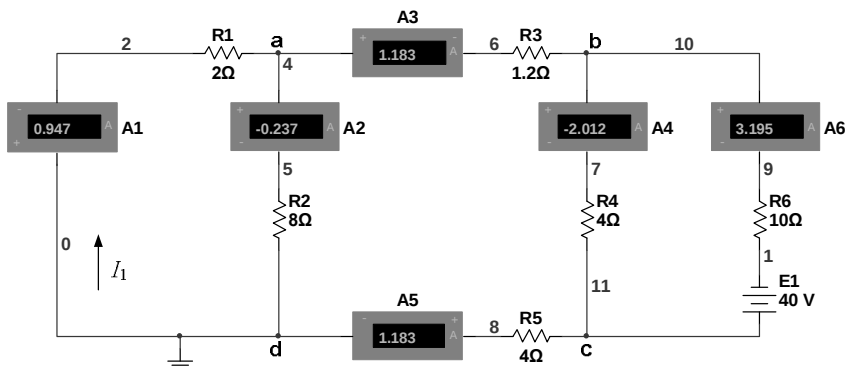


Рис. 4

Измерить амперметром в схеме рис. 4 ток I_1 . Согласно принципу взаимности должно выполняться равенство тока I_6 для схемы рис. 4 и тока I_1 для схемы рис. 3, т.е. должно быть I_6 (в схеме рис. 3) = I_1 (в схеме рис. 4).

В справедливости принципа взаимности можно убедиться также, если взять вместо ветви с резистором R_6 ветви с резисторами R_3 , R_4 , R_5 и переносить ЭДС E_1 соответственно в эти ветви так, как это было показано выше.

- 4.1.5. Заменить активный двухполюсник по отношению к полюсам **b** и **c** (см. рис. 3) эквивалентным генератором, определить его параметры, для чего провести опыты холостого хода и короткого замыкания.

При проведении опыта холостого хода разомкнуть ветвь с резистором R_6 (см. рис. 3) и включить на полюсы **b** и **c** вольтметр – измерить $U_{bcxx} = E_3$.

При проведении опыта короткого замыкания включить амперметр на полюсы **b** и **c** (см. рис. 3) и измерить ток короткого замыкания $I_{кз}$.

По результатам опытов найти внутреннее сопротивление эквивалентного генератора, равное входному сопротивлению активного двухполюсника

$$R_{вт} = R_{вх} = \frac{U_{bcxx}}{I_{кз}}.$$

Полученные здесь значения U_{bcxx} , $I_{кз}$ и $R_{вх}$ сравнить с расчетными в п. 3.1.8.

4.1.6. Провести исследование по схеме эквивалентного генератора (рис. 5).

Собрать схему на рис. 5 и измерить ток I_6 при сопротивлении R_{61} (первое из пяти возможных значений сопротивления R_6), сравнить его с табл. 2 и п. 3.1.9.

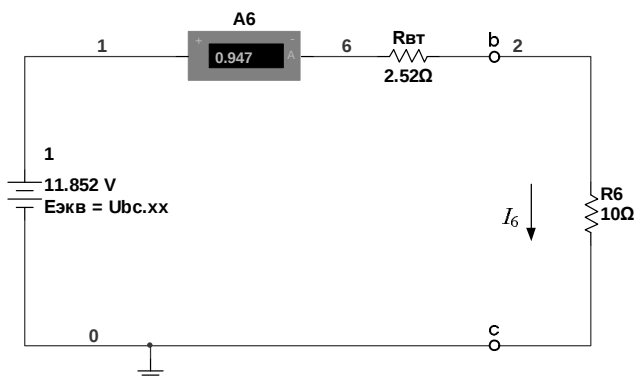


Рис. 5

4.1.7. Экспериментально убедиться в справедливости принципа компенсации [5-7]. Согласно этому принципу в любой электрической цепи без изменения токораспределения резистор можно заменить ЭДС, численно равной падению напряжения на заменяемом резисторе и направленной встречно току в этом резисторе.

Для доказательства этого принципа, в схеме рис. 5 резистор R_{61} с током I_6 заменить источником ЭДС, с $E_6 = R_{61} \cdot I_6$, т.е. собрать

схему на рис. 6 и измерить амперметром ток I_6 , который должен остаться неизменным.

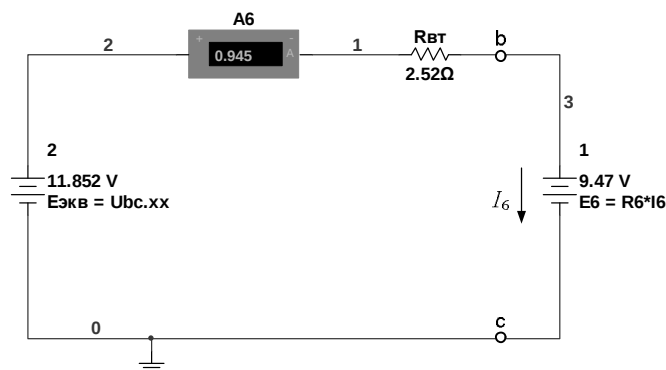


Рис. 6

4.1.8. Заменить источник ЭДС E_3 эквивалентного генератора (см. рис. 5) эквивалентным источником тока (рис. 7).

Собрать схему (рис. 7), измерить ток I_6 при сопротивлении R_{61} и убедиться в неизменности величины тока I_6 для двух схем рис. 5 и 7.

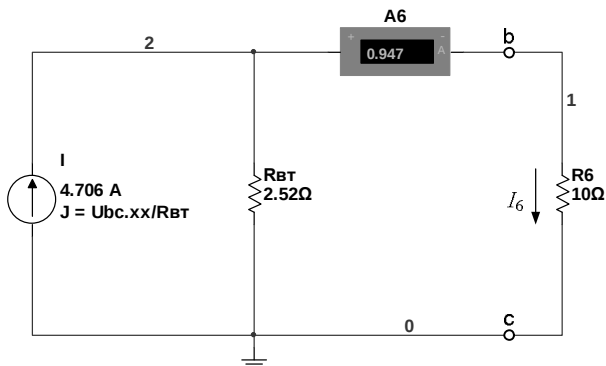


Рис.7

4.2. Исследование электрической цепи с двумя источниками электрической энергии

- 4.2.1. Собрать схему, приведенную на рис. 2, с параметрами, приведенными в табл. 1. Примерная реализация схемы в программе Multisim приведена ниже на рис. 8.
- 4.2.2. Измерить токи во всех ветвях и записать их в табл. 3 в строку "Эксперимент".

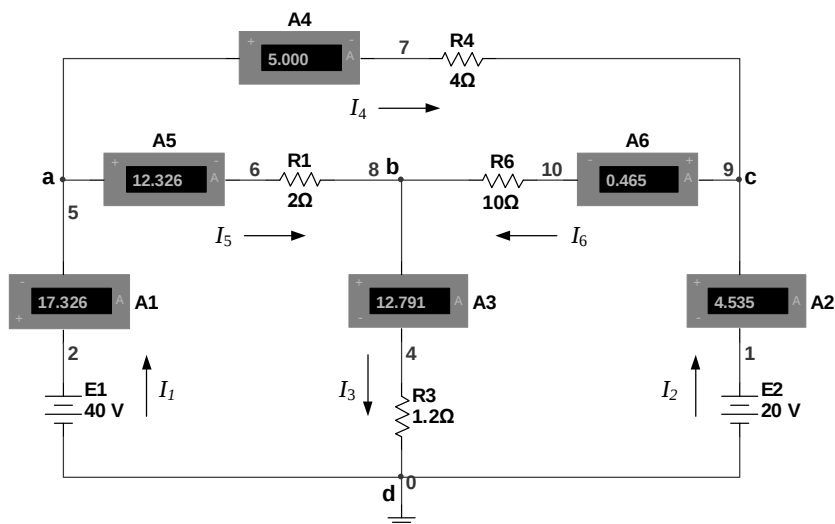


Рис. 8

- 4.2.3. Сравнить результаты расчета и эксперимента. Они должны совпадать с точностью до 1%. При этом истинными результатами следует считать результаты эксперимента. Ошибка в расчетах определяется по формуле

$$\frac{I_{\text{эксп}} - I_{\text{расч}}}{I_{\text{эксп}}} \cdot 100\% \leq 1\%.$$

- 4.2.4. Сделать выводы.

5. Краткие теоретические сведения по электрическим цепям

Электрической цепью называют совокупность устройств, предназначенных для генерирования, передачи, преобразования и использования электрической энергии, процессы в которых могут быть описаны с помощью понятий об электрическом токе, электрическом напряжении и электродвижущей силе (ЭДС).

Изображение электрической цепи с помощью условных знаков называют электрической схемой.

В зависимости от технических целей соединения источников и приёмников в электрических цепях могут быть различными. Встречаются следующие способы соединения: последовательное (рис. 9, а), параллельное (рис. 9, б), смешанное (рис.9, в, г).

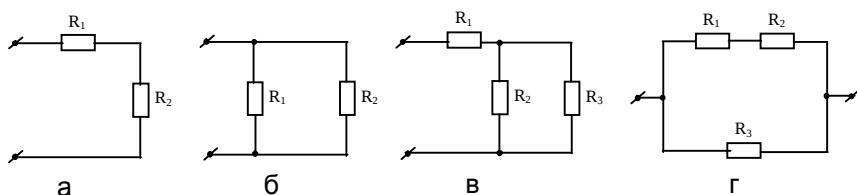


Рис. 9

В последовательной цепи через все элементы протекает один и тот же ток. Такая цепь называется неразветвлённой. Если в цепи имеются другие присоединения элементов, то цепь называется разветвлённой (см. рис. 9, б–г).

Эквивалентное сопротивление последовательно соединённых элементов равно сумме сопротивлений отдельных элементов (см. рис. 9, а)

$$R_3 = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

При параллельном соединении все элементы находятся под одним и тем же напряжением (см. рис. 9, б). Эквивалентная проводимость цепи при параллельном соединении элементов равна сумме проводимостей отдельных ветвей

$$g_3 = g_1 + g_2 + \dots + g_n = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Для получения эквивалентного сопротивления необходимо взять величину, обратную эквивалентной проводимости:

$$R_3 = \frac{1}{g_3}.$$

Если параллельно соединить n ветвей с одинаковыми сопротивлениями R , то их эквивалентное сопротивление будет в n раз меньше сопротивления одной ветви:

$$R_3 = \frac{R}{n}.$$

Эквивалентное сопротивление электрической цепи с двумя параллельно соединёнными резисторами определяется по формуле

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

Смешанное соединение элементов представляет собой сочетание последовательных и параллельных соединений. На рис. 9, в, г приведены именно такие схемы. Эквивалентное сопротивление для схемы на рис. 9, в определяется по формуле

$$R_3 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_1,$$

а для схемы на рис.9, г:

$$R_3 = \frac{(R_1 + R_2) R_3}{R_1 + R_2 + R_3}.$$

Ток пассивной ветви участка электрической цепи зависит от электрического напряжения на этом участке и его электрического сопротивления.

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

Это соотношение выражает закон Ома для пассивного участка цепи. Закон Ома может быть применён не только к отдельным участкам, но и ко всей цепи в целом (рис.10):

$$I = \frac{E}{r_{\text{вТ}} + R}.$$

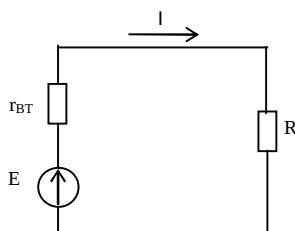


Рис. 10

Анализ разветвлённых электрических цепей производится на основе законов Кирхгофа, выражающих два основных свойства любой электрической цепи.

Первый закон Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда, согласно которому в узле заряд одного знака не может ни накапливаться, ни убывать. Первый закон Кирхгофа применяется для узлов электрической цепи и читается так: в узле электрической цепи алгебраическая сумма токов равна нулю, т.е. в математической форме

$$\sum_1^n I_k = 0.$$

Токи, направленные к узлу, включаются в уравнение со знаком «плюс», а токи, направленные от узла, со знаком «минус». Поясним это примером (рис. 11).

Для узла **а** (см. рис. 11) уравнение по первому закону Кирхгофа имеет следующую форму:

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

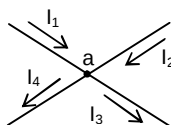


Рис. 11

Второй закон Кирхгофа является следствием закона сохранения энергии. Применяется для контуров электрических цепей и читается так: в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма ЭДС равна алгебраической сумме напряжений на всех участках с сопротивлениями, входящими в этот контур, т.е.

$$\sum_1^n E_K = \sum_1^m R_K \cdot I_K.$$

В этом уравнении положительные знаки принимаются для ЭДС и токов, положительные направления которых совпадают с произвольно выбранным направлением обхода рассматриваемого контура.

С помощью системы линейных независимых уравнений, составленных по законам Кирхгофа, можно рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи, если известны параметры источников и всех элементов.

6. Методика выполнения работы

6.1. Расчёт токов в электрической цепи

Целесообразно выполнять методом эквивалентных преобразований, который иногда называют методом свёртывания. При этом заданная (см. рис. 1) электрическая цепь приводится к одному эквивалентному резистору в следующей последовательности.

Из схемы на рис. 1 видно, что ветви с резисторами R_4 и R_6 соединены параллельно. Поэтому их можно заменить одним эквивалентным резистором с сопротивлением

$$R_{BC} = \frac{R_4 R_6}{R_4 + R_6}.$$

После такой замены схема на рис. 1 упрощается (свёртывается) и очевидно, что ветви с резисторами R_3 и R_5 соединены последовательно с эквивалентным резистором R_{bc} , тогда их эквивалентное сопротивление равно

$$R'_{ad} = R_3 + R_{bc} + R_5.$$

Ветвь с резистором R_2 соединена параллельно с эквивалентным резистором R'_{ad} и их эквивалентное сопротивление равно

$$R_{ad} = \frac{R_2 R'_{ad}}{R_2 + R'_{ad}}.$$

Эквивалентное (входное) сопротивление всей цепи определяется суммой двух сопротивлений

$$R_{\text{ЭК}} = R_1 + R_{ad}.$$

Ток в источнике ЭДС E_1 определяется по закону Ома

$$I_1 = \frac{E_1}{R_{\text{ЭК}}}.$$

Далее расчёт токов в ветвях выполняется согласно законам Ома и Кирхгофа.

Напряжение U_{ad} определяется из уравнения второго закона Кирхгофа

$$U_{ad} = E_1 - R_1 \cdot I_1.$$

Ток I_2

$$I_2 = U_{ad} / R_2.$$

Ток I_3 определяется из уравнения первого закона Кирхгофа для узла а

$$I_3 = I_1 - I_2.$$

Напряжение на эквивалентном резисторе R_{bc}

$$U_{bc} = R_{bc} \cdot I_3.$$

Токи в ветвях:

$$I_4 = \frac{U_{bc}}{R_4};$$

$$I_6 = \frac{U_{bc}}{R_6}.$$

Ток в резисторе R_5 определяется из уравнения первого закона Кирхгофа для узла **c**

$$I_5 = I_4 + I_6.$$

Очевидно, что ток I_5 должен быть равен току I_3 (см. рис. 1).

Чтобы определить напряжение на резисторе (участке цепи), следует умножить сопротивление резистора (участка цепи) на ток, например для цепи на рис. 1:

$$U_{ab} = R_3 \cdot I_3;$$

$$U_{cd} = R_5 \cdot I_5.$$

6.2. Расчёт мощностей потребления энергии в электрической цепи

Мощность потребления энергии одним резистором, например резистором R_1 :

$$P_1 = R_1 \cdot I_1^2;$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$P_k = R_k \cdot I_k^2.$$

Мощность потребления энергии всеми резисторами электрической цепи

$$P_{\text{потр}} = \sum_{k=1}^{\infty} P_k.$$

Мощность энергии, отдаваемой источником E_1 :

$$P_{\text{отд}} = E_1 \cdot I_1.$$

Правильность расчёта токов в электрической цепи определяется получением баланса мощностей

$$P_{\text{отд}} = P_{\text{потр}}.$$

Небаланс допустим не более 1%, т.е.

$$\frac{P_{\text{отд}} - P_{\text{потр}}}{P_{\text{отд}}} \cdot 100\% \leq 1\%.$$

6.3. Расчет параметров активного двухполюсника (эквивалентного генератора)

- 6.3.1. Как было сказано в п.3.1.8, электрическая цепь на рис. 1 может быть представлена активным двухполюсником относительно полюсов **b** и **c** или, иначе, эквивалентным генератором [5-7] (рис. 12).

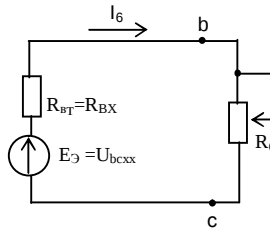


Рис. 12

- 6.3.2. Расчёт напряжения холостого хода U_{bcxx} , равного ЭДС эквивалентного генератора E_3 , осуществляется по схеме рис. 1 при разомкнутой ветви с резистором R_6 , т.е. при холостом ходе эквивалентного генератора. Расчёт выполняется известными методами, например методом эквивалентных преобразований, который был показан выше. Расчётная схема приведена на рис. 13.

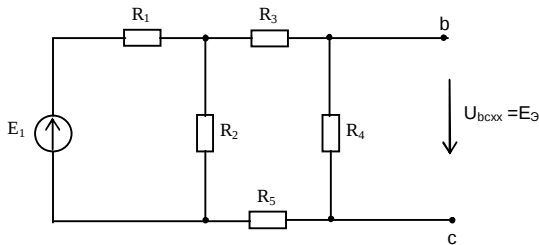


Рис. 13

- 6.3.3. Расчёт входного сопротивления R_{bx} , равного внутреннему сопротивлению эквивалентного генератора R_{BT} , выполняется также по схеме рис. 1 относительно полюсов b и c при замкнутом источнике ЭДС E_1 , т.е. по схеме рис. 14.

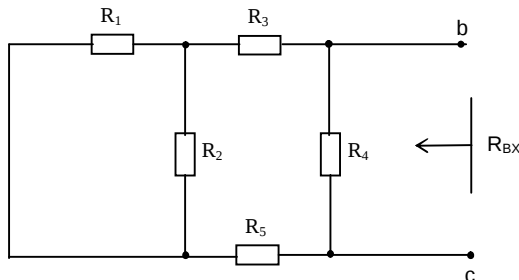


Рис. 14

6.3.4. Расчёт тока короткого замыкания $I_{кз}$ можно выполнить по формуле

$$I_{кз} = \frac{U_{бсхх}}{R_{бх}}$$

или при коротком замыкании активного двухполюсника на полюсах **b** и **c** по схеме рис. 15.

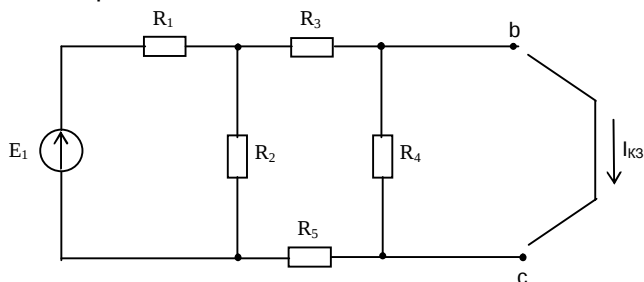


Рис. 15

6.4. Расчёт токов в электрической цепи методом наложения

Метод наложения основан на принципе независимости действия электродвижущих сил. Согласно этому принципу, токи, протекающие в цепи при наличии нескольких ЭДС, можно представить как алгебраическую сумму частных токов, вызываемых каждой ЭДС в отдельности [5-7]. Для расчёта частных токов составляют на основании исходной схемы (см. рис. 2) частные схемы, в каждой из которых действует только одна ЭДС, все прочие ЭДС исключаются. Поясним сказанное примером расчёта электрической цепи на рис. 2.

6.4.1. Расчёт частных токов $I'_1, I'_2, I'_3, \dots, I'_6$ по частной схеме при действии только ЭДС E_1 (рис. 16).

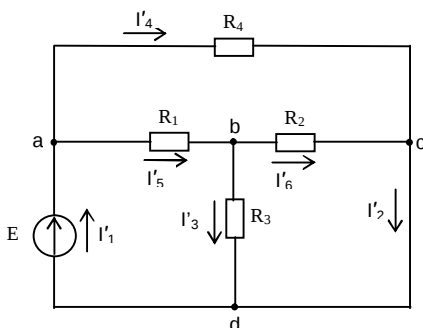


Рис. 16

- 6.4.1.1. Указываются стрелками положительные направления всех токов на исходной схеме (см. рис. 2) и на частной схеме (см. рис. 14).
- 6.4.1.2. Рассмотрение частной схемы на рис. 14 показывает, что при закороченном источнике ЭДС E_2 резисторы R_2 и R_3 соединены между собой параллельно и последовательно с резистором R_1 , а резистор R_4 присоединён параллельно к источнику ЭДС E_1 в узлах **a** и **d**. Понимая структуру электрической цепи на рис. 14, выполним расчёт частичных токов методом эквивалентных преобразований в следующем порядке.

Эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей с резисторами R_2 и R_3 :

$$R_{23} = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

Эквивалентное сопротивление трёх резисторов будет равно

$$R_{123} = R_1 + R_{23}.$$

Эквивалентное (выходное) сопротивление всей цепи по отношению к узлам **a** и **d**

$$R'_{\text{э}} = \frac{R_{123} R_4}{R_{123} + R_4}.$$

Частичный ток источника ЭДС I'_1 равен

$$I'_1 = \frac{E_1}{R'_{\text{э}}}.$$

Частичные токи I'_4 и I'_5 :

$$I'_4 = \frac{E_1}{R'_4};$$

$$I'_5 = \frac{E_1}{R'_{123}}.$$

Напряжение U'_{bd} можно определить двумя способами:

$$U'_{\text{bd}} = R_{23} \cdot I'_5$$

или на основании второго закона Кирхгофа

$$U'_{bd} = E_1 - R_1 \cdot I'_5.$$

Частичные токи I'_3 и I'_6 :

$$I'_3 = \frac{U'_{bd}}{R_3};$$

$$I'_6 = \frac{U'_{bd}}{R_2}.$$

Частичный ток I'_2 определяется на основании первого закона Кирхгофа для узла с

$$I'_2 = I'_4 + I'_6.$$

Проверить правильность расчёта частичных токов составлением баланса мощностей

$$E_1 I'_1 = R_1 I'^2_5 + R_2 I'^2_6 + R_3 I'^2_3 + R_4 I'^2_4.$$

6.4.2. Расчёт частичных токов $I''_1, I''_2, I''_3, \dots, I''_6$ по частной схеме при действии только ЭДС E_2 (рис. 17).

6.4.2.1. Указываются стрелками положительные направления частичных токов на схеме рис. 17.

6.4.2.2. Рассмотрение частной схемы на рис. 17 показывает, что при закороченном источнике ЭДС E_1 резисторы R_1 и R_3 соединены между собой параллельно и последовательно с резистором R_2 , а резистор R_4 присоединён параллельно к источнику ЭДС E_2 в узлах с и d. С учётом сказанного выполним расчёт частичных токов методом эквивалентных преобразований в следующем порядке (см. рис. 17).

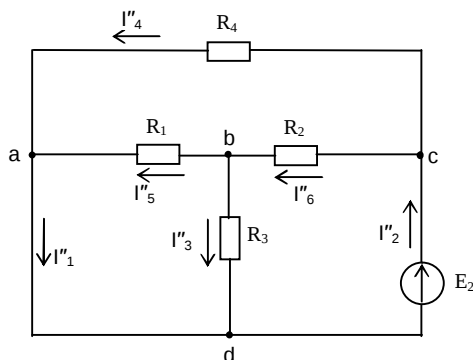


Рис. 17

Эквивалентное сопротивление двух параллельных ветвей с резисторами R_1 и R_3

$$R_{13} = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}.$$

Эквивалентное сопротивление R_{132}

$$R_{132} = R_{13} + R_2.$$

Эквивалентное (входное) сопротивление всей цепи по отношению к узлам **c** и **d**

$$R''_{\text{э}} = \frac{R_{132} R_4}{R_{132} + R_4}.$$

Частичный ток источника ЭДС I''_2

$$I''_2 = \frac{E_2}{R''_{\text{э}}}.$$

Частичные токи I''_4 и I''_6 :

$$I''_4 = \frac{E_2}{R_4};$$

$$I''_6 = \frac{E_2}{R_{132}}.$$

Напряжение U''_{bd} можно определить двумя способами

$$U''_{bd} = R_{13} \cdot I''_6$$

или на основании второго закона Кирхгофа

$$U''_{bd} = E_2 - R_2 \cdot I''_6.$$

Частичные токи I''_3 и I''_5 :

$$I''_3 = \frac{U''_{bd}}{R_3};$$

$$I''_5 = \frac{U''_{bd}}{R_1}.$$

Частичный ток I'_1 определяется на основании первого закона Кирхгофа для узла «а»

$$I'_1 = I'_4 + I'_5.$$

Правильность расчёта частичных токов определяется составлением баланса мощностей

$$E_2 I_2 = R_1 I_5^2 + R_2 I_6^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2.$$

6.4.3. Расчёт реальных токов в схеме рис. 2 выполняется алгебраическим суммированием (наложением) частичных токов с учётом их направления на схемах рис. 16 и 17. При этом условно-положительным направлением реальных токов является направление, выбранное и указанное ранее на исходной схеме (см. рис. 2). Таким образом, получаем

$$I_1 = I'_1 - I''_1.$$

Здесь направление частичного тока I'_1 совпадает с условным положительным направлением реального тока I_1 на исходной схеме (см. рис. 2). Поэтому частичный ток I'_1 берётся со знаком «плюс». Частичный ток I''_1 имеет противоположное направление (см. рис. 17) и поэтому берётся со знаком «минус». Рассуждая аналогично, находят другие реальные токи:

$$I_2 = -I'_2 + I''_2;$$

$$I_3 = I'_3 + I''_3;$$

$$I_4 = I'_4 - I''_4;$$

$$I_5 = I'_5 - I''_5;$$

$$I_6 = -I'_6 + I''_6.$$

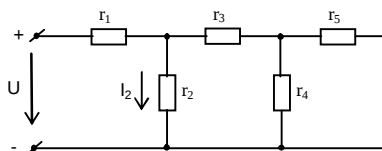
Если какой-либо из токов получится со знаком «минус», то это означает, что действительное его направление противоположно принятому произвольно в исходной схеме на рис. 2.

6.4.4. Проверка правильности расчёта токов в электрической цепи осуществляется составлением баланса мощностей, на пример для цепи на рис. 2:

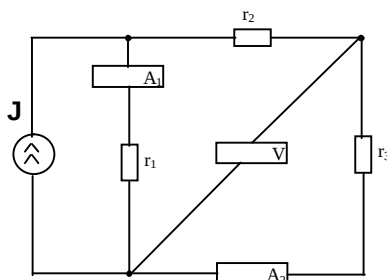
$$E_1 I_1 + E_2 I_2 = R_1 I_5^2 + R_2 I_6^2 + R_3 I_3^2 + R_4 I_4^2.$$

7. Контрольные задачи

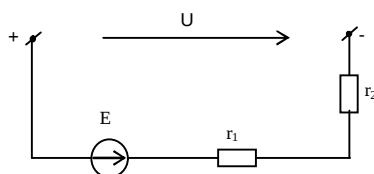
1. Ток $I = 36$ А разветвляется по трём параллельным ветвям с резисторами $r_1 = 6$ Ом, $r_2 = 9$ Ом, $r_3 = 18$ Ом. Определите мощность, выделяемую в резисторе r_3 , и приведите электрическую схему присоединения резисторов к источнику постоянного тока.
2. Ток в резисторе $r_2 = 0,2$ А. Определить токи в остальных ветвях и напряжение источника, если $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = 100$ Ом.



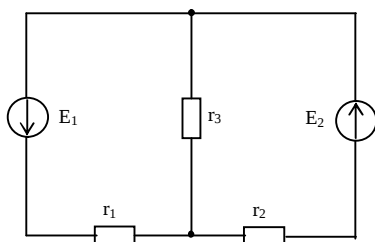
3. ЭДС источников и их внутренние сопротивления равны: $E_1 = 230$ В, $E_2 = 225$ В, $r_{01} = 0,5$ Ом, $r_{02} = 0,4$ Ом; источники соединены параллельно. Определите ЭДС и внутреннее сопротивление эквивалентного источника $E_{\text{экв}}$ и $r_{0\text{экв}}$.
4. Определите показания приборов, если $J = 10$ А, $r_1 = 2$ Ом, $r_2 = r_3 = 1$ Ом.



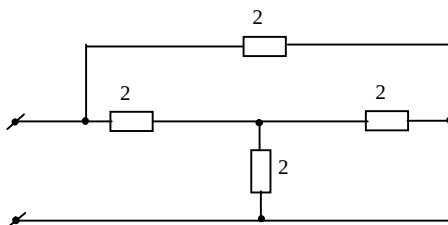
5. Составить баланс мощностей, если $E = 70$ В, $U = 30$ В, $r_1 = 10$ Ом, $r_2 = 40$ Ом.



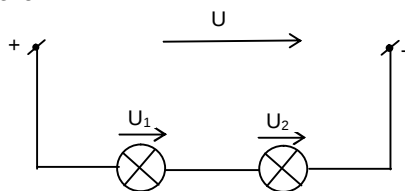
6. Проанализировать влияние изменения величины ЭДС E_1 на токи ветвей.



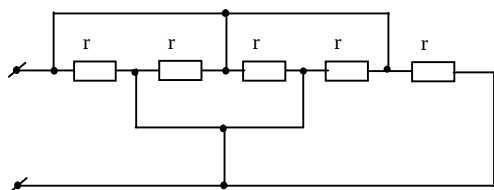
7. Определить эквивалентное сопротивление цепи при заданных сопротивлениях резисторов в омах.



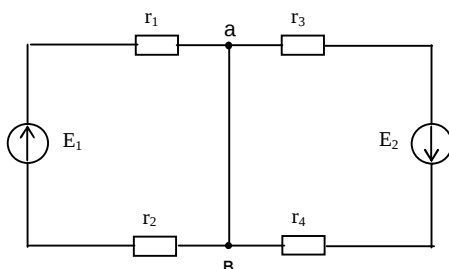
8. Две лампы накаливания, рассчитанные на одинаковые номинальные напряжения 110 В, имеют номинальные мощности $P_{1\text{ном}} = 50$ Вт, $P_{2\text{ном}} = 150$ Вт. Лампы включены в сеть напряжением $U = 220$ В по приведённой схеме. Определить напряжение на лампах, если допустить, что сопротивления ламп не зависят от тока.



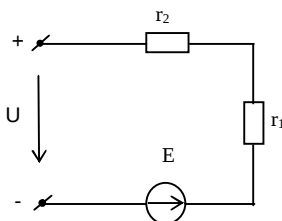
9. Определить эквивалентное сопротивление цепи.



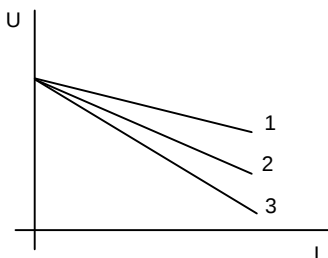
10. Определить величину и направление тока в проводнике, включённом между точками **а** и **в** схемы, если известны: $E_1=50\text{ В}$, $E_2=40\text{ В}$, $r_1=r_4=10\text{ Ом}$, $r_2=r_3=15\text{ Ом}$.



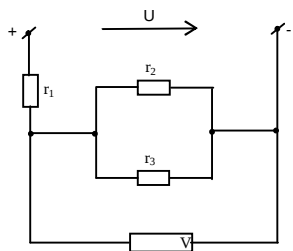
11. Определить мощность источника электрической энергии с напряжением U и выяснить режим его работы, если известны: $E=70\text{ В}$, $U=20\text{ В}$, $r_1=10\text{ Ом}$, $r_2=40\text{ Ом}$.



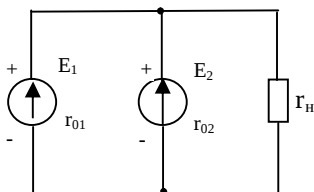
12. В каком отношении находятся внутренние сопротивления источников энергии, внешние характеристики которых приведены на графике?



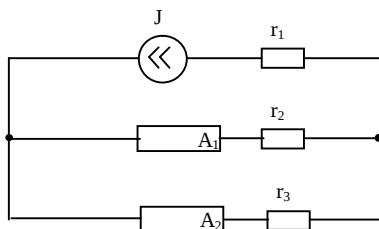
13. Напряжение источника $U=140\text{ В}$, сопротивления резисторов $r_2=10\text{ Ом}$, $r_3=6\text{ Ом}$. Определить сопротивление резистора r_1 , если вольтметр показывает 60 В .



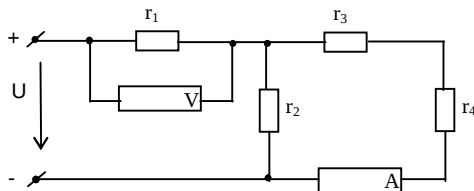
14. Определить напряжение на приёмнике и составить баланс мощности, если $E_1 = 230 \text{ В}$, $E_2 = 240 \text{ В}$, $r_{01} = 0,5 \text{ Ом}$, $r_{02} = 0,4 \text{ Ом}$, $r_H = 10 \text{ Ом}$.



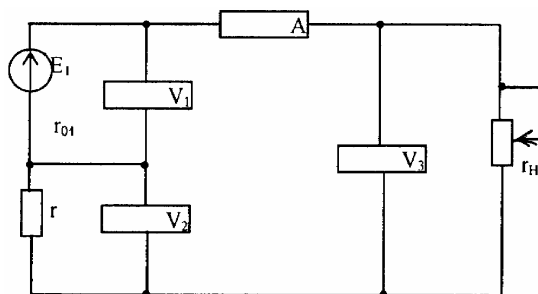
15. Определить показания приборов, если $J = 10 \text{ А}$, $r_1 = 3 \text{ Ом}$, $r_2 = 20 \text{ Ом}$, $r_3 = 30 \text{ Ом}$.



16. Определить показания вольтметра и амперметра, если $U = 50 \text{ В}$, $r_1 = 5 \text{ Ом}$, $r_2 = 10 \text{ Ом}$, $r_3 = 6 \text{ Ом}$, $r_4 = 4 \text{ Ом}$.



17. Как изменятся показания приборов, если движок реостата r_H переместится вверх?



18. На какие сопротивления и ток следует выбрать реостат, с помощью которого можно регулировать напряжение на приемнике r_H в пределах от 40 до 160 В, если $U = 220$ В, $r_H = 20$ Ом?

Простота – это величайшая мудрость, ищите простоту и сомневайтесь в ней.

А.Н.Уайтхед – философ и математик.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Работа состоит из трех частей, в которых изучают свойства и методы анализа однофазных цепей синусоидального тока с последовательным, параллельным и смешанным соединением элементов в установившемся режиме. При этом определяют токи и падения напряжений на участках цепи и углы сдвига фаз между токами и напряжениями. Рассчитывают значения полной, активной и реактивной мощностей. Исследуют влияние величины емкости конденсатора на коэффициент мощности цепи. Строятся векторные диаграммы.

1. Цель работы

- 1.1. Освоить символический метод расчёта электрических цепей синусоидального тока.
- 1.2. Научиться проводить исследования электрических цепей переменного тока с помощью программы схемотехнического моделирования Multisim фирмы National Instruments.
- 1.3. Научиться строить векторные диаграммы для анализа электрических цепей переменного тока.

2. Подготовка к работе

2.1. Последовательное соединение элементов

В соответствии с номером бригады, используя исходные данные (табл. 1), составить и начертить схему (рис. 1) с указанием параметров катушки индуктивности и конденсатора, как показано на рис. 4 для первого варианта.

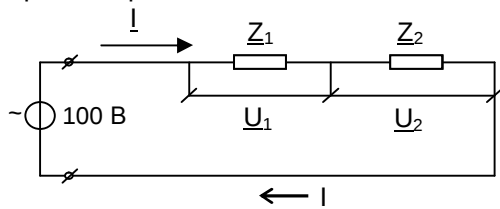


Рис. 1

Таблица 1

Номер бригады	Частота, Гц	Комплексное сопротивление		
		$\underline{Z}_1$	$\underline{Z}_2$	$\underline{Z}_3$
1	50	$3 - j4$	$4 + j8$	4
2	100	$16 - j12$	$4 + j3$	6
3	300	$4 - j12$	$6 + j2$	3
4	200	$6 - j8$	$4 + j6$	10
5	150	$12 - j36$	$16 + j18$	25
6	700	$16 - j12$	$8 + j6$	12,5
7	200	$5 - j10$	$3 + j4$	5
8	500	$14 - j18$	$30 + j40$	50
9	1000	$10 - j20$	$20 + j30$	40
10	400	$6 - j8$	$4 + j13$	10
11	250	$10 - j10$	$3 + j4$	8

Таблица 2

Метод исследования	I, А	U ₁ , В	U ₂ , В	φ, град	φ ₁ , град	φ ₂ , град	P, Вт	Q, Вар	S, ВА
Расчет									
Эксперимент									

2.1.1. Рассчитать следующие параметры:

$\underline{I}$ – ток в цепи;

$\underline{U}_1, \underline{U}_2$ – напряжения на участках цепи;

P, Q, S – мощности активную, реактивную и полную.

Формулы для расчета приведены ниже в главе 4.

2.1.2. Результаты домашних расчетов привести в табл. 2. Здесь обозначено:

φ – угол сдвига фаз между током и приложенным напряжением;

φ₁ – угол сдвига фаз между током и напряжением U₁;

φ₂ – угол сдвига фаз между током и напряжением U₂.

2.2. Параллельное соединение ветвей

2.2.1. Привести развернутую схему рис. 2 с указанием параметров, как показано на рис. 5 для первого варианта.

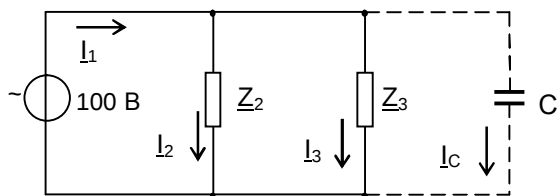


Рис. 2

2.2.2. Рассчитать следующие параметры:

I_1 , I_2 , I_3 – токи ветвей;

P , Q , S – мощности активную, реактивную и полную;

C – емкость конденсатора, при которой ток I_1 в неразветвленной части цепи чисто активный, т.е. $\varphi = 0$.

2.2.3. Результаты расчетов привести в табл. 3.

Таблица 3

Метод исследования	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	φ , град	P , Вт	Q , Вар	S , ВА	C , мкФ
Расчет								
Эксперимент								

2.3. Смешанное соединение ветвей

2.3.1. Привести развернутую схему (рис. 3) с указанием параметров индуктивности и конденсатора, как показано на рис. 6 для первого варианта.

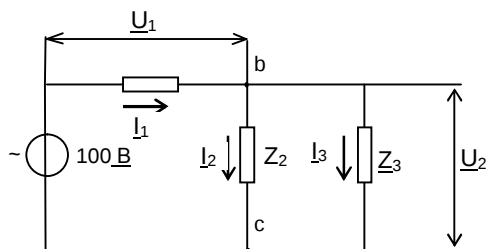


Рис. 3

2.3.2. Рассчитать следующие параметры:

I_1, I_2, I_3 – токи ветвей;

$\underline{U}_1, \underline{U}_2$ – напряжения ветвей;

P, Q, S – мощности активную, реактивную и полную;

φ – угол сдвига фаз между током I_1 и напряжением U .

Результаты расчётов привести в табл. 4.

Таблица 4

Метод исследования	U_1 , В	U_2 , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	φ , град	P , Вт	Q , Вар	S , ВА
Расчет									
Эксперимент									

3. Экспериментальная часть

3.1. Последовательное соединение элементов

- 3.1.1. На рабочем поле приложения Multisim собрать схему (см. рис.1) с заранее рассчитанными параметрами, как показано на рис. 4 для варианта 1.
- 3.1.2. На источнике синусоидального напряжения установить требуемую частоту и напряжение 100 В. Измерить ток I и напряжение на участках цепи U_1, U_2 .
- 3.1.3. Определить с помощью осциллографа углы сдвига фаз: φ – между током и приложенным напряжением; φ_1 – между током и напряжением U_1 ; φ_2 – между током и напряжением U_2 .
- 3.1.4. На основе измеренного значения тока и известных параметров схемы рассчитать мощности P, S и Q .
- 3.1.5. Результаты измерений занести в табл. 2. Построить в масштабе векторную диаграмму тока и напряжений.

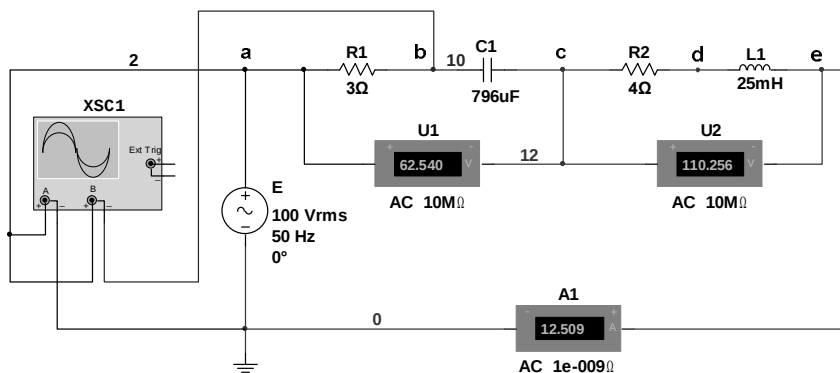


Рис. 4

3.2. Параллельное соединение ветвей

- 3.2.1. На рабочем поле Multisim собрать схему 2 с заранее рассчитанными параметрами, как показано на рис. 5 для варианта 1.
- 3.2.2. Измерить токи ветвей с помощью амперметров.
- 3.2.3. Определить с помощью осциллографа угол сдвига фаз φ – между током источника и приложенным напряжением.
- 3.2.4. На основе измеренных значений токов и известных параметров схемы рассчитать мощности P , S и Q .
- 3.2.5. Установить расчётное значение емкости C , при которой угол сдвига фаз между током источника и напряжением равен нулю ($\varphi = 0$).
- 3.2.6. Результаты измерений занести в табл. 3. Построить векторную диаграмму токов до и после подключения емкости C .

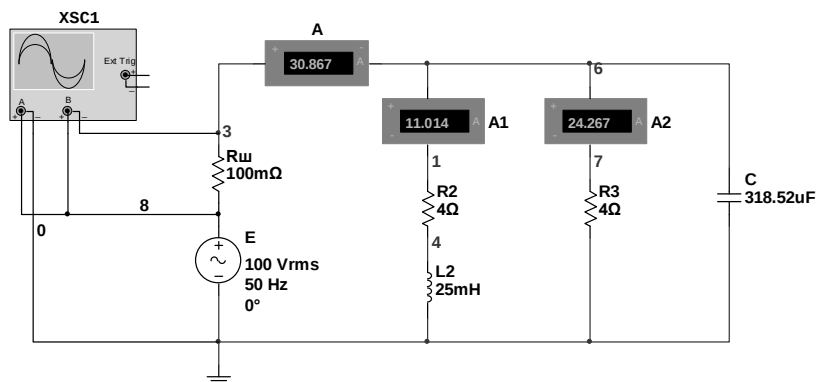


Рис. 5

3.3. Смешанное соединение ветвей

- 3.3.1. На рабочем поле EWB собрать схему 3, как показано на рис. 6 для варианта 1.
- 3.3.2. Измерить токи ветвей I_1 , I_2 , I_3 и напряжения U_1 , U_2 .
- 3.3.3. Определить с помощью осциллографа угол сдвига фаз φ – между током I_1 и приложенным напряжением.
- 3.3.4. Получить на осциллографе с помощью умножителя синусоиду мгновенной мощности, рассчитать по ней P , S и Q .
- 3.3.5. Результаты измерений занести в табл. 4. Построить векторную диаграмму токов и напряжений. Проверить на ней правильность и соответствие законам Кирхгофа:

$$I_1 = I_2 + I_3; \quad \underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2.$$

- 3.3.6. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

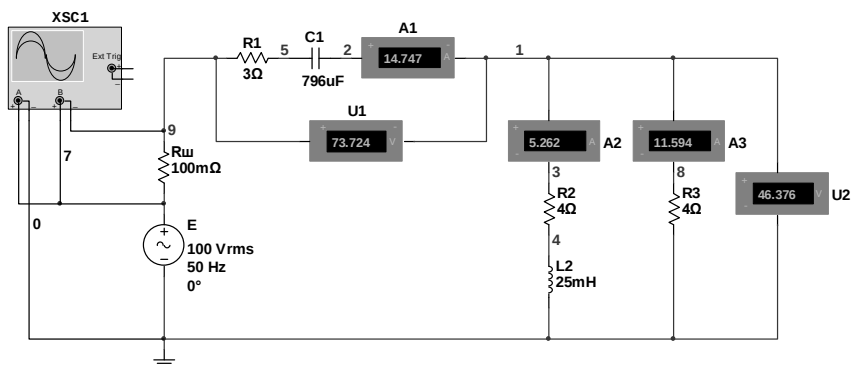


Рис. 6

4. Методика выполнения работы

4.1. Подготовка к работе

По заданным величинам частоты f и комплексных сопротивлений $\underline{Z} = r + jx$ определяют индуктивности и емкости (L и C) для последующего моделирования цепей с помощью программы EWB.

Принимая во внимание, что $x_L = 2\pi fL$; $x_C = 1/2\pi fC$, рассчитывают L , Гн и C , мкФ:

$$L = \frac{x_L}{2\pi f}; \quad C = \frac{10^6}{2\pi f x_C}.$$

4.2. Расчет при последовательном соединении ветвей

Ток в цепи определяют по закону Ома

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}} = \frac{\underline{U}}{ze^{\pm j\varphi}} = Ie^{\pm j\varphi},$$

где $\underline{U}$ – комплекс приложенного напряжения; принимаем начальную фазу равной нулю, $U=100$ В;

$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2$ – комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z} = r_1 - jx_1 + r_2 + jx_2 = r \pm jx = z^{\pm j\varphi};$$

$z = \sqrt{r^2 + x^2}$ – модуль полного сопротивления;

$\varphi = \pm \arctg|x|/r$ – аргумент полного сопротивления.

Напряжения на участках цепи находят по формулам:

$$\underline{U}_1 = \underline{I} \underline{Z}_1; \quad \underline{U}_2 = \underline{I} \underline{Z}_2.$$

Углы сдвига фаз между током и напряжениями на участках цепи φ_1 и φ_2 определяют по формулам:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{-x_1}{r_1}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{x_2}{r_2}.$$

Угол сдвига фаз φ между напряжением и током отсчитывается на векторной диаграмме в направлении от вектора тока $\underline{I}$ к вектору напряжения $\underline{U}$ (а не наоборот!), поэтому угол φ положителен при отстающем токе (в индуктивности) и отрицателен при опережающем токе (в емкости).

Мощности P , Q , S рассчитывают следующим образом:

$$P = I^2 (r_1 + r_2);$$

$$Q = I^2 (x_2 - x_1);$$

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

Построение векторной диаграммы при последовательном соединении элементов рекомендуется начать с вектора тока, задав ему произвольное направление, затем откладывают в масштабе $\underline{U}_1$ и $\underline{U}_2$; их сумма определяет приложенное напряжение.

4.3. Расчёт при параллельном соединении ветвей

Токи в ветвях $\underline{I}_2$, $\underline{I}_3$ определяют по закону Ома:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_2};$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_3}; \text{ в данной работе } \underline{Z}_3 = r;$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}};$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

Мощности P , Q , S рассчитывают по формулам:

$$P = I_2^2 r_2 + I_3^2 r_3; \quad Q = I_2^2 x_2;$$

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

Емкость C^* , при которой потребляемый ток чисто активный, рассчитывают из условия равенства реактивных токов I_2 и I_C в подключаемой ветви (см. рис. 2).

$$\frac{U}{Z_2} \sin \varphi_2 = U \omega C^*;$$

отсюда находят емкость, мкФ

$$C^* = \frac{\sin \varphi_2}{Z_2 \omega} \cdot 10^6.$$

4.4. Расчет при смешанном соединении ветвей

Рассчитывают полное комплексное сопротивление

$$\underline{Z} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

Рассчитывают токи ветвей:

$$I_1 = \frac{U}{\underline{Z}};$$

$$I_2 = I_1 \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3};$$

$$I_3 = I_1 \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

Рассчитывают мощности P , Q , S :

$$P = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + I_3^2 r_3;$$

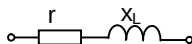
$$Q = I_2^2 x_2 - I_1^2 x_1;$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = UI_1.$$

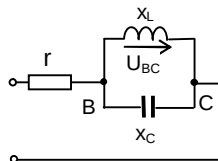
Построение векторной диаграммы при смешанном соединении ветвей лучше всего начать с вектора напряжения $\underline{U}_2$, общего для ветвей Z_2 и Z_3 . Выбрав масштаб и направление $\underline{U}_2$, откладывают токи $\underline{I}_2$, $\underline{I}_3$, их сумма определит ток $\underline{I}_1$. Затем из конца вектора $\underline{U}_2$ откладывают вектор $\underline{U}_1$, их сумма определит входное напряжение $\underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2$. Угол сдвига фаз между током $\underline{I}_1$ и приложенным напряжением $\underline{U}$ определен как угол φ .

5. Контрольные задачи

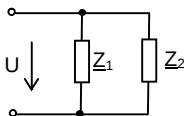
1. Известны мгновенные значения напряжения $u = 100\sin(\omega t + 75^\circ)$ В и тока $i = 2\sin(\omega t + 120^\circ)$ А приёмника. Определить активную и реактивную мощности. Построить векторную диаграмму.
2. Задана цепь синусоидального тока и её параметры: $r = 32$ Ом, $x_L = 24$ Ом. Определить мгновенное значение приложенного к цепи напряжения, если ток в цепи выражается функцией времени $i = 4\sin(\omega t - 120^\circ)$ А. Построить векторную диаграмму напряжений и тока.



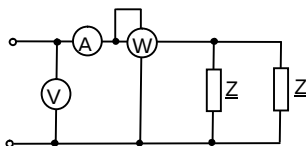
3. Определить действующее значение напряжения между точками В и С цепи, если приложенное напряжение $u = 10\sqrt{2}\sin \omega t$ В, а сопротивления $r = x_L = x_C = 10$ Ом. Построить векторную диаграмму.



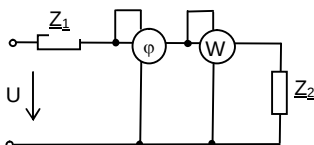
4. Привести схему замещения приёмника и определить её параметры (r , x), если известно, что напряжение и ток данного приёмника выражаются функциями: $u = 112\sin(\omega t - 11^\circ 30')$ В, $i = 2,8\sin(\omega t - 48^\circ 30')$ А. Построить векторную диаграмму.
5. Определить угол сдвига фаз ($\varphi = \psi_u - \psi_i$) между напряжением и током для цепи, изображенной на рисунке, если $\underline{Z}_1 = 8 - j4$ Ом, $\underline{Z}_2 = 4 + j4$ Ом.



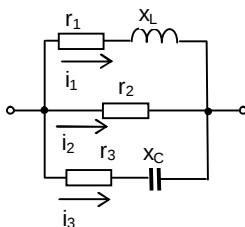
6. Вольтметр показывает 100 В, амперметр 10 А, $\underline{Z} = r + jx$, $r = 0,5z$. Определить показание ваттметра. Построить векторную диаграмму.



7. Параметры катушки находятся экспериментально. При частоте $f = 50$ Гц показания приборов: $P=40$ Вт, $U=80$ В, $I=2$ А. Привести схему проведения эксперимента и вычислить индуктивность и активное сопротивление катушки.
8. Известно $\underline{Z}_1 = 10e^{j60^\circ}$ Ом, сопротивление $\underline{Z}_2$ изменяется. При некотором значении $\underline{Z}_2$ ваттметр показал максимальную мощность. Определить при этом показание фазометра.

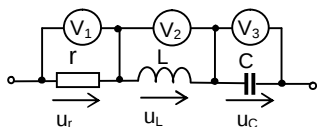


9. Построить векторную диаграмму токов и топографическую диаграмму напряжений на одной комплексной плоскости для приведённой схемы.

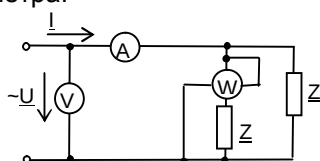


10. Найти синусоидальные функции времени, изображенных комплексами действующих значений: $\underline{I} = (-30 + j40)$ А, $\underline{U} = (-50 - j100e^{-j120^\circ})$ В.
11. Комплекс сопротивления приемника $\underline{Z} = 10 - j8$ Ом, действующее значение тока $I = 2,83$ А. Написать выражение мгновенного значения напряжения на приемнике, если начальная фаза тока приемника равна нулю. Построить волновые диаграммы $i(t)$, $u(t)$.

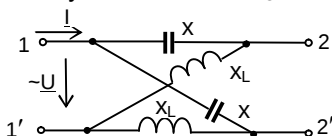
12. В цепи синусоидального тока все три вольтметра показывают по 100 В. Написать комплекс действующего значения $\underline{U}_C$, если начальную фазу напряжения $\underline{U}_r$ принять равной -24° . Построить векторную диаграмму тока и напряжений.



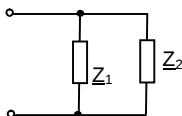
13. Для приемника переменного тока заданы: $\underline{I} = -2e^{-j35^\circ}$ А, $u = -141\sin(\omega t + 15^\circ)$ В. Определить активную, реактивную и полную мощности приемника.
14. Известны: $U = 100$ В, $I = 10$ А, $\underline{Z} = r + jx$, $r = 0,25z$. Определить показание ваттметра.



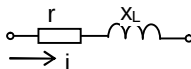
15. Определить мгновенное значение тока i неразветвленной части цепи, если комплекс приложенного напряжения $\underline{U} = 100$ В, зажимы 2-2' разомкнуты, $x_L = 5$ Ом, $x_C = 15$ Ом.



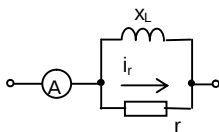
16. Определить входное сопротивление двухполюсника $\underline{Z}_1 = 6 - j8$ Ом, $\underline{Z}_2 = 6 + j8$ Ом.



17. Цепь синусоидального тока имеет параметры $r = 6$ Ом, $x_L = 8$ Ом. Определить мгновенное значение тока i в цепи и напряжение u_L на индуктивном сопротивлении, если напряжение источника $u = 100\sin(\omega t + 37^\circ)$ В. Построить векторную диаграмму и определить $\cos\varphi$ цепи.

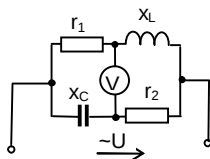


18. В цепи синусоидального тока $r=x_L$, амперметр показывает 12 А. Написать выражение мгновенного значения тока i_r , приняв начальную фазу тока i в неразветвлённом участке равной $+14^\circ$. Построить векторную диаграмму.

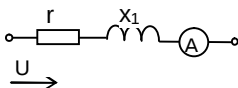


19. Найти синусоидальные функции времени, соответствующие комплексным амплитудам: $I_m = j10\sqrt{2}e^{-j45^\circ}$ А; $U_m = -141/\sqrt{2}e^{j120^\circ}$ В. Построить векторную и волновую диаграммы.

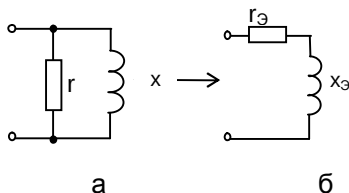
20. Параметры цепи: $r_1=r_2=x_L=x_C=10$ Ом. Определить показание вольтметра электромагнитной системы, если к цепи приложено напряжение $u=200\sin(\omega t+45^\circ)$ В.



21. Как изменится показание амперметра в цепи, если вместо переменного тока через цепь пропустить постоянный ток при неизменном напряжении U . Известно, что $r = x_L$ (при переменном токе) и амперметр электромагнитной системы.



22. В цепи (см. рисунок, а) активное сопротивление $r=12,5$ Ом и индуктивное сопротивление при частоте $f=50$ Гц, $x=16,66$ Ом. Определить сопротивления r_Θ и x_Θ эквивалентной последовательной схемы, изображенной на рисунке, б.



Учение без размышлений – пустая трата времени, размышления без учения – смехотворны или губительны.
Конфуций (551–479 гг. до н.э.).

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСОВ В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Работа состоит из двух частей, в которых исследуют основные характеристики при резонансе напряжений и токов. Строят векторные диаграммы для последовательного и параллельного контуров для трех значений частоты: дорезонансной, резонансной и послерезонансной. Делают выводы по работе.

1. Цель работы

- 1.1. Изучить построение и назначение частотных и резонансных характеристик в последовательном и параллельном колебательных контурах.
- 1.2. Научиться определять основные параметры, характеризующие резонанс напряжений и токов: f_0 – резонансную частоту, ρ – волновое сопротивление, Q – добротность контура, Δf – полосу пропускания частот.

2. Подготовка к работе

2.1. Исследование резонанса напряжений

- 2.1.1. Для цепи, состоящей из последовательно соединенных элементов R , L , C (рис. 1), рассчитать резонансную частоту f_0 и волновое сопротивление ρ , добротность контура Q и действующее значение тока I_0 при резонансной частоте f_0 .

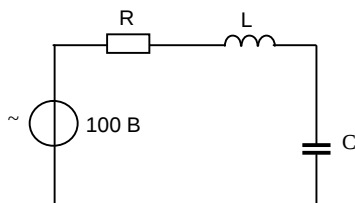


Рис. 1

- 2.1.2. Значения параметров цепи взять из табл. 1 в соответствии с номером бригады. Результаты домашних расчетов занести в табл. 2. Напряжение идеального источника принять равным 100 В (действующее значение).

Таблица 1

Параметр	Номер бригады												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
R, Ом	50	38	40	30	47	35	42	38	50	44	40	45	41
L, мГн	10	12	14	16	18	20	24	25	29	31	32	24	17
C, мкФ	1	2	2	4	2	4	2,5	4	3	4	5	3	2,5
R _L , Ом	20	15	10	5	17	20	25	15	10	15	20	30	50
R _C , Ом	10	5	15	10	10	15	35	20	30	40	50	10	20

Таблица 2

Номер опыта	Частота f	Измерения						Рассчитано дома
		I	U _L	U _C	Z	φ	P	
1								f ₀ = I ₀ = Q= ρ= f _C = f _L = Δf* =
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

- 2.1.3. Построить векторные диаграммы напряжений для трех значений частоты:

1. $f_1 = 0,5f_0$;

2. $f_2 = f_0$;

3. $f_3 = 2f_0$.

- 2.1.4. Рассчитать частоты f_C и f_L , при которых напряжения на конденсаторе U_C и на катушке индуктивности U_L достигают максимальных значений.

- 2.1.5. Рассчитать сопротивления R' , R'' , при которых добротность контура увеличивается соответственно в два (четыре) раза по сравнению с её исходным значением Q .

2.2. Исследование резонанса токов

- 2.2.1. Для схемы, приведенной на рис. 2, рассчитать резонансную частоту f_0 , значения U_0 , I_{L0} , I_{C0} , а также $R_{Э0}$, ρ , Q , Δf^* при резонансе.

нансе. Параметры цепи взять из табл. 1 в соответствии с номером бригады. Действующее значение тока источника принять равным 1 А. Результаты расчетов привести в табл. 3.

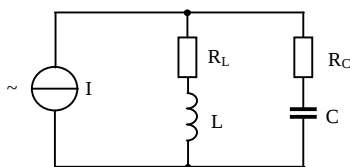


Рис. 2

Таблица 3

Номер опыта	Частота f	Измерения						Рассчитано дома
		U	I_L	I_C	Z	φ	P	
1								$f_0 =$
2								$R_{\Sigma 0} =$
3								$Q =$
4								$\rho =$
5								$U_0 =$
6								$I_{L0} =$
7								$I_{C0} =$
8								$\Delta f^* =$

2.2.2. Построить векторные диаграммы токов для трех значений частоты: $f_1 = 0,5f_0$; $f_2 = f_0$; $f_3 = 1,5f_0$.

2.2.3. Рассчитать ёмкость конденсатора C^* , при которой наступит резонанс в схеме (см. рис. 2) в случае подключения её к источнику напряжения $U = 100$ В, $f = 500$ Гц. Сопротивление резистора в ветви с конденсатором принять равным $R'_C = 0,1R_C$.

3. Экспериментальная часть работы

3.1. Собрать схему (рис. 3) с источником напряжения и включенными приборами для измерения тока и напряжения на элементах цепи.

Для построения резонансных кривых зарегистрировать ток I и напряжения U_L , U_C на следующих частотах: 0; $0,25f_C$; $0,5f_C$; f_C ; f_0 ; f_L ; $2f_L$; $4f_L$.

Эксперимент провести для цепи с добротностью Q . Проверить, совпадают ли частоты, при которых напряжения U_L , U_C максимальны, с расчетным значением f_C и f_L . Результаты измерений занести в табл.2.

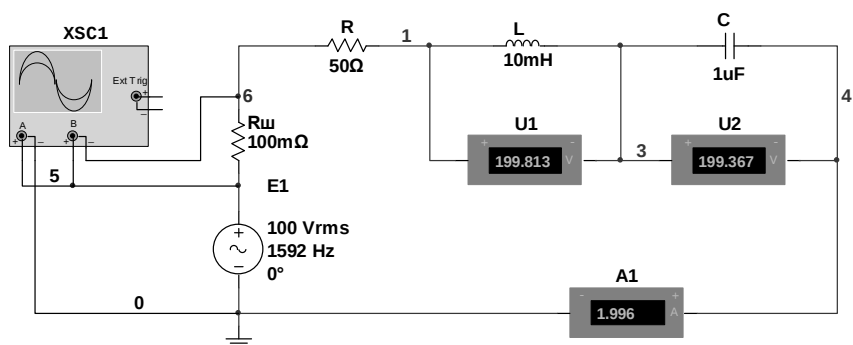


Рис. 3

Наблюдения повторить, увеличив добротность контура в два раза за счет уменьшения R . Результаты измерений занести в табл. 4.

Таблица 4

Номер опыта	Частота f	Измерения						Расчитано дома
		I	U_L	U_C	Z	φ	P	
1								$Q' =$ $f_C =$ $f_L =$ $\Delta f^* =$
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								

3.2. Для получения частотных характеристик $Z(f)$, $\varphi(f)$ рекомендуется использовать ИЧХ, а для измерения активной мощности – ваттметр, как показано на рис.4.

3.3. Результаты эксперимента представить в виде двух графиков:

- $U_L(f)$; $U_C(f)$; $I(f)$;
- $Z(f)$; $\varphi(f)$; $P(f)$.

Из графиков определить наибольшие напряжения на ёмкости и индуктивности, напряжения в точке резонанса, добротность контура Q и волновое сопротивление ρ . По характеристикам $I(f)$, $P(f)$ определить также полосу пропускания $\Delta f = f_B - f_H$ частот для двух значений добротности Q и Q' .

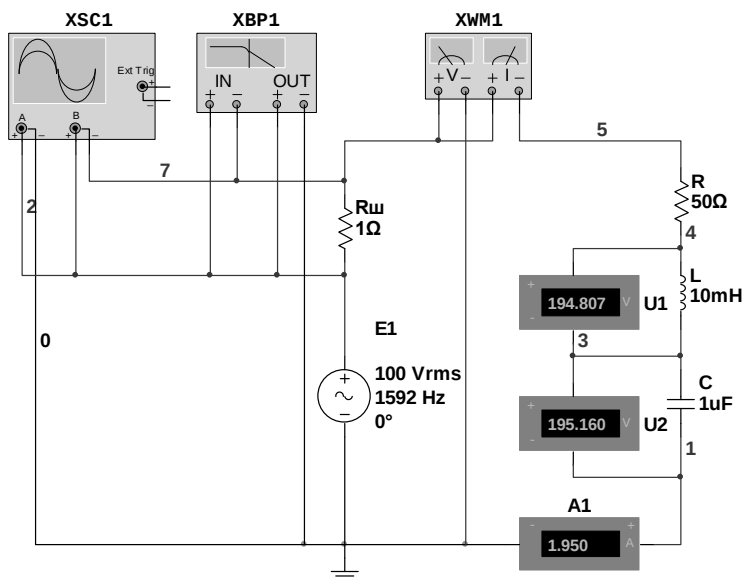


Рис. 4

3.4. В соответствии с вариантом собрать схему с источником тока (рис.5).

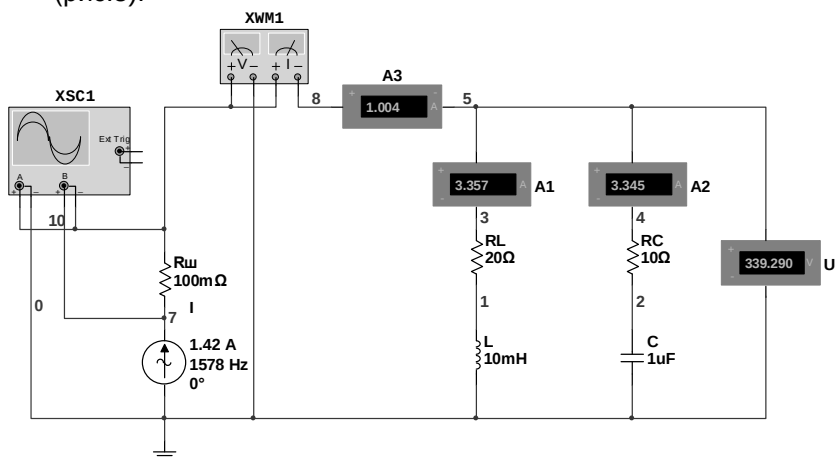


Рис. 5

Для построения резонансных кривых зафиксировать значения напряжения U и токов в ветвях цепи I , I_L , I_C при следующих

частотах: 0 ; $0,25f_0$; $0,5f_0$; $0,75f_0$; f_0 ; $1,25f_0$; $1,5f_0$; $2f_0$. Результаты измерений занести в табл. 3.

Проверить, приходится ли максимум напряжения на резонансную частоту.

3.5. Так же, как и в предыдущей схеме с последовательным соединением, для снятия зависимости $Z(f)$ и $\varphi(f)$ удобно использовать ИЧХ. Кроме того, ИЧХ позволяет довольно легко получить резонансные кривые $I_L/I(f)$, $I_C/I(f)$ в относительной форме с помощью источника напряжения, управляемого током, как показано на рис.6.

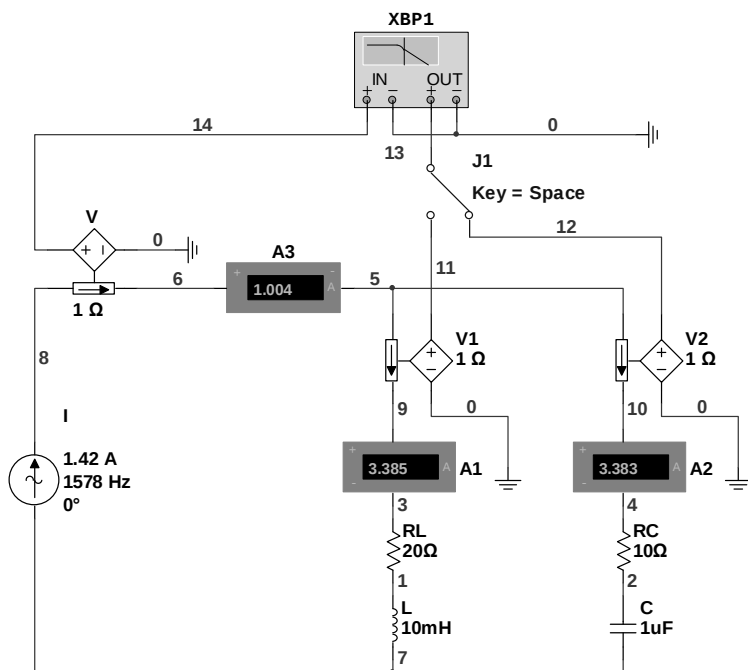


Рис. 6

3.6. Результаты экспериментов представить в виде графиков:

1. $U(f)$; $I_L(f)$; $I_C(f)$;
2. $Z(f)$; $\varphi(f)$.

3.7. Собрать схему* (см. рис.2) с источником напряжения $U=100$ В, 500 Гц. Изменяя емкость конденсатора в пределах $0,5C^* \leq C \leq 1,5C^*$, зафиксировать значение тока (I) в табл.5.

* П. 3.7 и 3.8 выполняются факультативно.

Таблица 5

Номер опыта	C/C^*	C , мкФ	I , А
1	0,5		
2	0,75		
3	1,0		
4	1,25		
5	1,5		

3.8. Построить зависимость $I(C/C^*)$.

4. Методика выполнения работы

4.1. Резонанс напряжений в последовательных контурах характеризуется следующими основными параметрами:

- резонансной частотой $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$;
- волновым сопротивлением $\rho = x_{C0} = x_{L0} = \sqrt{\frac{L}{C}}$;
- добротностью контура $Q = \frac{U_{C0}}{U} = \frac{U_{L0}}{U} = \frac{\rho}{R}$,

где x_{L0} , x_{C0} – реактивные сопротивления катушки и конденсатора в режиме резонанса, а U_{L0} , U_{C0} – напряжения на индуктивности и конденсаторе на резонансной частоте. Максимальное напряжение на индуктивности наблюдается на частоте f_L

$$f_L = f_0 \sqrt{\frac{1}{1 - 1/2Q^2}}.$$

Максимум напряжения на конденсаторе достигается на частоте f_C

$$f_C = \frac{f_0^2}{f_L} = f_0 \sqrt{1 - 1/2Q^2}.$$

Максимальное значение тока в последовательном контуре соответствует резонансной частоте

$$I_0 = \frac{U}{R}.$$

Область частот, в которой активная мощность, выделяющаяся на сопротивлении R , превышает половину максимальной, соответствующей резонансу, называют полосой пропускания контура Δf . В этой области частот:

$$\frac{P}{P_0} \geq 0,5; \quad \frac{I}{I_0} \geq \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Относительная полоса пропускания Δf^* обратно пропорциональна добротности контура

$$\Delta f^* = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_B - f_H}{f_0} \approx \frac{1}{Q},$$

где f_B – верхняя граничная частота;

f_H – нижняя граничная частота.

4.2. Резонанс токов в параллельном колебательном контуре характеризуется следующими основными параметрами:

– резонансной частотой $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R_L^2}{L/C - R_C^2}},$

где R_L – сопротивление, включенное последовательно с индуктивностью, а R_C – соответственно сопротивление, включенное последовательно с конденсатором;

– эквивалентным сопротивлением цепи (см. рис.2) с двумя параллельными ветвями $\underline{Z}_L = R_L + jX_L$ и $\underline{Z}_C = R_C - jX_C$, которое может быть представлено следующим образом:

$$\underline{Z}_\Sigma = \frac{\underline{Z}_L \underline{Z}_C}{\underline{Z}_L + \underline{Z}_C} = \frac{(R_L + jX_L)(R_C - jX_C)}{(R_L + R_C) + j(X_L - X_C)} = R_\Sigma + jX_\Sigma.$$

В результате преобразований получим действительную и мнимую части эквивалентного сопротивления:

$$R_\Sigma = \frac{R_L Z_C^2 + R_C Z_L^2}{R^2 + X^2}; \quad X_\Sigma = \frac{X_L Z_C^2 - X_C Z_L^2}{R^2 + X^2},$$

где $R = R_L + R_C$; $X = X_L - X_C$.

При любом резонансе ток совпадает по фазе с напряжением. Это значит, что мнимая часть эквивалентного (входного) сопротивления равна нулю:

$$X_\Sigma = 0;$$

$$X_L Z_C^2 - X_C Z_L^2 = 0;$$

$$\frac{X_{L0}}{Z_{L0}^2} = \frac{X_{C0}}{Z_{C0}^2}; \quad \frac{X_{L0}}{X_{L0}^2 + R_L^2} = \frac{X_{C0}}{X_{C0}^2 + R_C^2};$$

$$b_L = b_C.$$

При параллельном соединении ветвей режим резонанса токов отмечен равенством реактивных проводимостей этих ветвей (b_L и b_C);

- эквивалентное активное сопротивление в точке резонанса $R_{\Sigma 0}$ определяется отношением

$$R_{\Sigma 0} \approx \frac{R_L \left(\frac{1}{\omega_0 C} \right)^2 + R_C (\omega_0 L)^2}{(R_L + R_C)^2},$$

при условии, что сопротивления R_L и R_C составляют меньшую часть модулей Z_L и Z_C соответственно;

- для схемы (см. рис.2) отношение токов в параллельных ветвях к току источника тока в точке резонанса характеризует добротность контура:

$$Q = \frac{I_{L0}}{I} = \frac{I_{C0}}{I} = \frac{R_{\Sigma 0}}{\rho};$$

$$U_0 = IR_{\Sigma 0};$$

$$\rho = \frac{U_0}{I_{L0}} = \frac{U_0}{I_{C0}},$$

где ρ – волновое сопротивление контура. При подключении схемы (см. рис.2) к источнику тока зависимость $z(f)$ подобна зависимости $U(f)$, а резонансные кривые $I_L(f)$ и $I_C(f)$ по характеру изменений подобны кривым $U_L(f)$ и $U_C(f)$ последовательного контура.

4.3. Величина емкости C^* , при которой наступает резонанс токов в схеме (см. рис. 2), определяется из условия равенства проводимостей $b_L = b_C$. С целью упрощения расчетов пренебрегаем сопротивлением R_C в ветви с конденсатором.

В первом приближении получаем

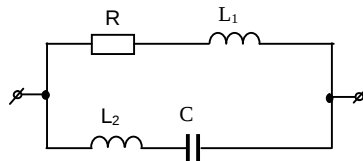
$$C^* = \frac{L}{R_L^2 + (\omega L)^2},$$

где $\omega = 2\pi f = 3140$ рад/с.

Более точное значение емкости C^* подбирают в ходе эксперимента с помощью осциллографа, добиваясь отсутствия сдвига фаз между током и приложенным напряжением.

4. Контрольные задачи

1. Контур с последовательным соединением R , L и C настроен на резонансную частоту и подключен к источнику с напряжением $U=100$ В, добротность контура $Q=7$. Требуется найти:
а) напряжение на емкости U_C ;
б) напряжение на участке RL .
2. Как определить граничные частоты полосы пропускания по графикам $I(f)$ и $P(f)$?
3. В последовательном RLC-контуре известны $R = 5$ Ом, $x_L=15$ Ом, $x_C=7$ Ом. Определить волновое сопротивление и добротность контура.
4. В цепи возникает резонанс токов при частоте $\omega_0=2000$ рад/с. Параметры цепи $R=20$ Ом, $L_2= 20$ мГн, $C=6,25$ мкФ. Определить индуктивность L_1 .

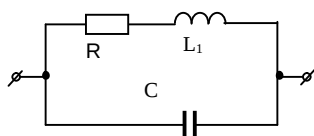


5. На некоторой частоте в контуре наступает резонанс токов. Параметры контура: $L = 10$ мГн, $C_1 = C_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ мкФ. Определить резонансную частоту f_0 .
6. Контур параллельно включенных конденсатора и катушки (r , L) настроен в резонанс. Чему равен ток в катушке, если ток в конденсаторе 10 А, а суммарный 5 А.
7. Контакт с катушкой на номинальное напряжение 380 В нормально работает от сети 220 В после включения последовательно с ним конденсатора определенной ёмкости. Чем это объясняется?
8. Цепь состоит из катушки (r , L) и конденсатора емкостью C , соединенных последовательно. Определить напряжение на катушке при резонансе, если напряжение питания цепи равно 35 В и напряжение на конденсаторе равно 120 В.
9. К последовательному R , L , C -контур, параметры катушки которого известны: $L=2,26$ мГн, $R=10$ Ом, приложено напряжение $U=50$ мкВ с частотой, соответствующей длине волны ра-

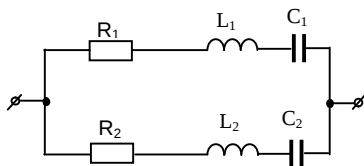
диостанции $\lambda=2000$ м. Найти ёмкость C конденсатора, при которой в контуре наступает резонанс, добротность контура и напряжение на катушке.

Примечание. Длина волны определяется по формуле $\lambda=CT=C/f$, где $C=3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения электромагнитной энергии в пространстве, f – частота колебания в Гц.

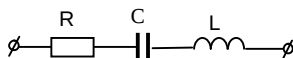
10. При частоте 50 Гц синусоидального тока сопротивление катушки равно 41 Ом, а при постоянном токе 9 Ом. При какой частоте наступит резонанс, если последовательно с катушкой включить конденсатор ёмкостью 51 мкФ?
11. Определить ёмкость конденсатора C , если при частоте $\omega_0=10^6$ рад/с в цепи возникает резонанс токов. Параметры цепи: $L=0,3$ мГн; $R=100$ Ом.



12. Конденсатор (200 мкФ) и катушка (2 Ом; 0,1 Гн) включены последовательно. Найти резонансную частоту, волновое сопротивление и добротность этого контура.
13. Контур с малыми потерями находится в режиме резонанса токов. Параметры $R_1=R_2=1$ Ом; $L_1=25$ мкГн; $L_2=75$ мкГн; $C_1=C_2=800$ пФ. Найти резонансную частоту ω_0 контура.



14. Каким должно быть соотношение между параметрами цепи при резонансе, чтобы напряжение источника U было меньше по сравнению с U_C ? Построить векторную диаграмму напряжений и тока для этого случая.



Блажен не тот, кто всех умнее, но тот, кто будучи глупцом, себя считает мудрецом...

Мы мало видим, плохо знаем, а счастье только знающим дано.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ВЗАИМНОЙ ИНДУКЦИЕЙ

Работа состоит из трёх частей. В первой части исследуют цепь из последовательно соединённых катушек индуктивности при согласном и встречном включении. Во второй части исследуют параллельное включение катушек с взаимной индукцией. В третьей части исследуют работу воздушного трансформатора. Для всех исследуемых схем строят векторные диаграммы.

1. Цель работы

- 1.1. Исследовать зависимость входного сопротивления для цепей с последовательным и параллельным включением катушек от величины взаимной индуктивности M .
- 1.2. Для цепей с параллельным соединением катушек индуктивности исследовать перераспределение мощности от источника к катушкам и между ними.
- 1.3. Исследовать работу воздушного трансформатора при различных видах нагрузки – R , L и C .

2. Подготовка к работе

Исходные данные для расчётов и экспериментов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры	Номер бригады												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
L_1 , Гн	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
f , Гц	50	75	100	150	200	250	300	125	60	80	120	140	160
R_1 , Ом	10	10	20	35	20	20	30	35	10	10	20	30	20
R_2 , Ом	20	30	40	10	10	15	25	35	45	10	20	40	50
U , В	100	100	120	150	140	130	110	150	50	70	100	120	150

2.1. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек

Рассчитать комплексные эквивалентные сопротивления цепи относительно зажимов источника – $\underline{Z}_{\text{эк}}$, а также сопротивления $\underline{Z}_1$ – на участке **ab** и $\underline{Z}_2$ – на участке **bc** (рис.1) для двух схем включения:

1 – встречное;

2 – согласное;

для трёх различных соотношений индуктивностей (п. 3.1.):

a) $L_1=M=L_2$;

b) $L_1>M>L_2$;

c) $L_1<M<L_2$.

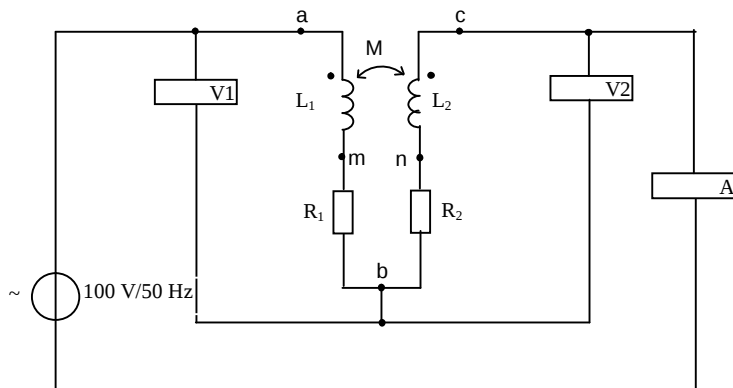


Рис. 1

Результаты расчётов привести в табл. 2.

Таблица 2

Включение катушек	Номер опыта	Параметр n	Измерено						Рассчитано				
			I, A	U ₁ , В	U ₂ , В	φ, град	φ ₁ , град	φ ₂ , град	Z _{эк} , Ом	Z ₁ , Ом	Z ₂ , Ом	U ₁ , В	U ₂ , В
Встречное	1	1											
	2	2											
	3	0,5											
Согласное	4	1											
	5	2											
	6	0,5											

2.2. Параллельное соединение индуктивно связанных катушек

Для схемы, приведённой на рис. 2, рассчитать комплексное эквивалентное сопротивление цепи – $\underline{Z}_{\text{эк}}$ относительно зажимов источника, общий ток I и токи ветвей I_1 , I_2 , а также мощности P , P_{r1} , P_{r2} .

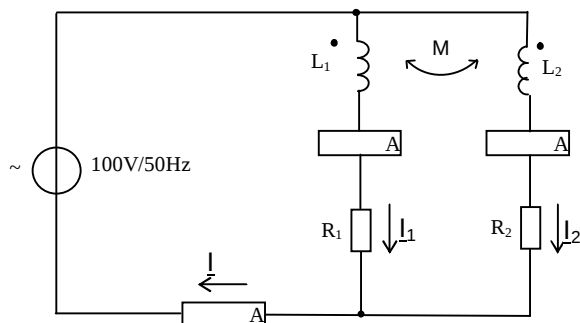


Рис. 2

Результаты расчётов привести в табл. 3.

Таблица 3

Включение катушек	$n=W_1/W_2$	Измерено							Рассчитано				
		I , А	I_1 , В	I_2 , В	φ , град	P , Вт	P_1 , Вт	P_2 , Вт	I , А	φ , град	P , Вт	P_{r1} , Вт	P_{r2} , Вт
Встречное	1												
	2												
	0,5												
Согласное	1												
	2												
	0,5												

2.3. Включение индуктивно связанных катушек в качестве воздушного трансформатора

Для схемы, приведённой на рис. 3, рассчитать токи трансформатора I_1 и I_2 для различных видов нагрузки:

- активной;
- индуктивной;
- ёмкостной.

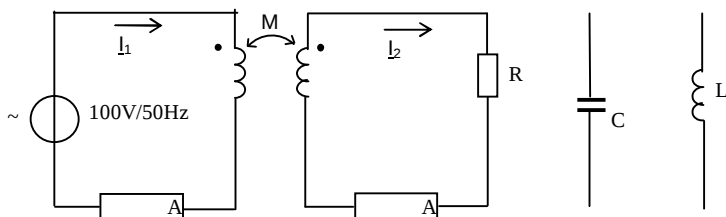


Рис. 3

Относительные величины сопротивлений нагрузки (R/X_m , X_L/X_m , X_C/X_m) изменяются в следующих пределах: 0,25; 0,5; 1; 2; 4. Расчёт и эксперимент выполняются при коэффициенте трансформации, равном единице ($n=1$). По относительной величине нагрузки следует рассчитать именованные значения изменяемых параметров R , L и C и занести их в табл. 4, так же как и значения токов I_1 и I_2 .

Таблица 4

Вид исследования	Параметр	R/X_m					X_L/X_m					X_C/X_m				
		0,25	0,5	1	2	4	0,25	0,5	1	2	4	0,25	0,5	1	2	4
Расчёт	I_1															
	I_2															
Эксперимент	I_1															
	I_2															
	Φ_1															
	Φ_2															
Изменяемый параметр		R					L					C				

3. Экспериментальная часть работы

Модель идеальной катушки с взаимной индукцией находится в библиотеке основных элементов **BASIC**, которая открывается нажатием на кнопку на панели инструментов. В разделе **BASIC_VIRTUAL** необходимо выбрать модель идеального трансформатора **TS_VIRTUAL** и перетащить этот блок на рабочее поле программы. После двойного щелчка мышью по выделенному блоку

необходимо открыть вкладку **Value**, где задаются основные параметры идеальной катушки, такие как:

n – коэффициент трансформации, равный отношению числа витков первичной обмотки ко вторичной $n = W_1 / W_2$ (параметр Primary-to-Secondary Turns Ratio);

L_e – индуктивность рассеяния первичной обмотки, Гн;

L_m – индуктивность намагничивания, Гн;

R_p, R_s – активные сопротивления первичной и вторичной обмоток (параметры Primary Winding Resistance и Secondary Winding Resistance).

По умолчанию принято: $n=2$; $L_e = 1 \cdot 10^{-3}$ Гн; $L_m = 5$ Гн;
 $R_p = 1 \cdot 10^{-3}$ Ом; $R_s = 1 \cdot 10^{-3}$ Ом.

Исходя из того, что индуктивности катушек прямо пропорциональны квадрату числа витков, а взаимная индуктивность двух катушек пропорциональна произведению числа витков этих катушек, установим следующий порядок определения параметров L_1, L_2, M :

- индуктивность первой катушки L_1 устанавливают в окне как индуктивность намагничивания $L_1 = L_m$ (см. табл. 1), индуктивностью рассеяния пренебрегаем;
- индуктивность второй катушки определяют по формуле

$$L_2 = L_1 / n^2;$$

- взаимная индуктивность двух катушек при коэффициенте связи, равном единице, определяется соотношением:

$$M = \sqrt{L_1 L_2} = L_1 / n,$$

это значит, воздействуя на параметр n , можно добиться изменения соотношений между L_1, L_2 и M в больших пределах.

3.1. Возможны три варианта, а именно:

- 1) $n=1, L_1=L_2=M$;
- 2) $n>1, L_1>M>L_2$;
- 3) $n<1, L_1<M<L_2$.

Поэтому в дальнейшем при исследовании различных схем ограничимся тремя значениями коэффициента трансформации n :

- а) $n=1$;
- б) $n=2$;
- в) $n=0,5$.

Последовательное соединение катушек

3.2. Для схемы, приведённой на рис. 4, измерить ток I и напряжение на участках цепи **ab** – U_1 и **bc** – U_2 , а также углы сдвига фаз: φ – между током и приложенным напряжением; φ_1 – между током и напряжением $\underline{U}_1$; φ_2 – между током и напряжением $\underline{U}_2$. Измерения фазовых углов произвести с помощью осциллографа. Эксперименты выполнить для встречного и согласного включения катушек. Результаты измерений занести в табл. 2. Для опытов 1, 2 и 3 встречного включения катушек построить в масштабе векторную диаграмму тока и напряжений.

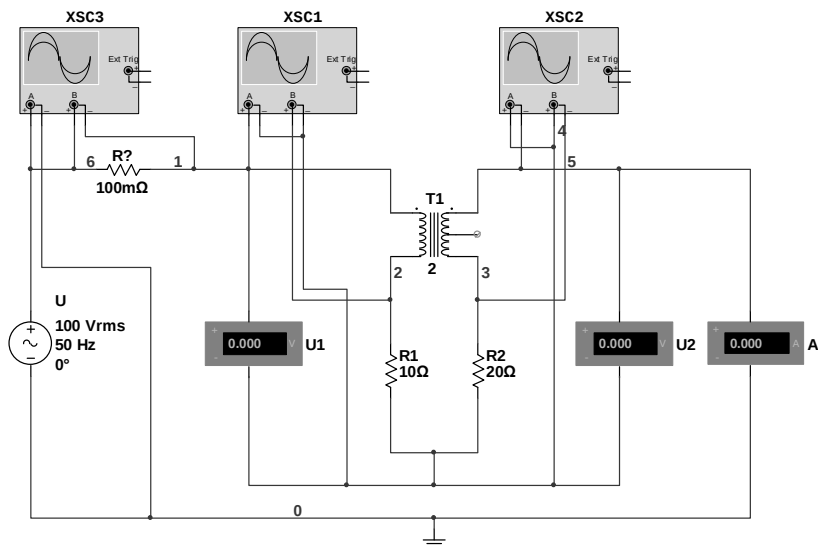


Рис.4

Параллельное соединение катушек

3.3. Для схемы, приведённой на рис. 2, измерить токи в ветвях I , I_1 , I_2 , фазовый угол φ , а также мощности P , P_1 , P_2 , поступающие от источника в цепь и в каждую катушку в отдельности. Схема измерений приведена ниже на рис. 5. Результаты измерений занести в табл. 3. Эксперименты выполнить для встречного и согласного включений катушек.

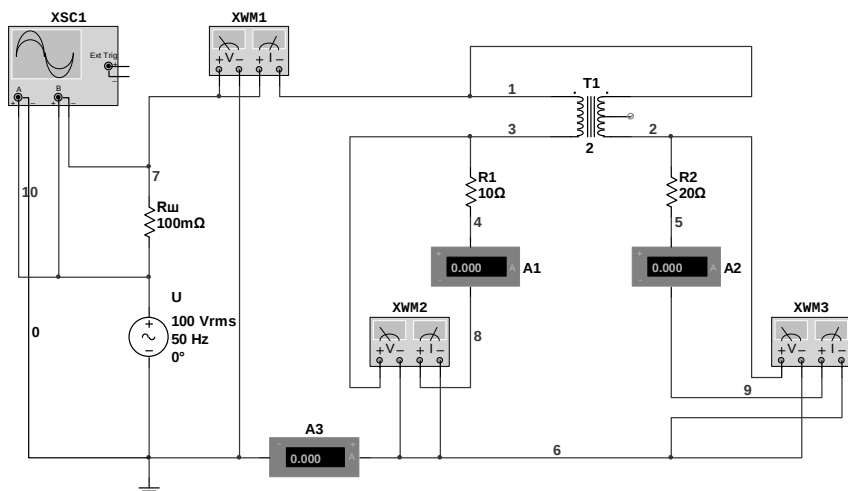


Рис. 5

Включение катушек по схеме воздушного трансформатора

3.4. Для схемы, приведённой на рис. 3, измерить токи в первичной и во вторичной обмотках, а также углы сдвига фаз φ_1 и φ_2 между током и напряжением в этих обмотках. Заметим, что для схемы воздушного трансформатора понятия «согласного» и «встречного» включений катушек теряют смысл. Результаты измерений занести в табл. 4.

4. Методика выполнения работы

4.1. Расчёт при последовательном соединении индуктивно связанных катушек

Для схемы, приведённой на рис. 1, комплексные сопротивления на участках цепи $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ и полное сопротивление $\underline{Z}_{\text{эк}}$ рассчитывают по формулам:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1 \pm j\omega M;$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2 \pm j\omega M;$$

$$\underline{Z}_{\text{эк}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2,$$

где знак «+» соответствует согласному включению катушек, а знак «-» – их встречному включению.

Ток $\underline{I}$ и напряжения $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$ определяют по формулам:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{\text{эк}}}; \quad \underline{U}_1 = \underline{I}\underline{Z}_1; \quad \underline{U}_2 = \underline{I}\underline{Z}_2.$$

Здесь значение индуктивности L_1 принимают из табл. 1, а L_2 и M рассчитывают в зависимости от коэффициента трансформации n .

4.2. Расчёт при параллельном соединении индуктивно связанных катушек

Для схемы, приведённой на рис. 2, расчёт выполняется в последовательности, представленной ниже.

Определяют эквивалентные комплексные сопротивления всей цепи [5-7]

$$\underline{Z}_{\text{эк}} = \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2 - Z_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2Z_M} = Z_{\text{эк}} e^{j\varphi}.$$

Знак « $-$ » соответствует согласному включению катушек, знак « $+$ » – их встречному включению; $\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L_1$; $\underline{Z}_2 = R_2 + j\omega L_2$; $\underline{Z}_M = j\omega M$.

Ток $\underline{I}$, потребляемый от источника, и токи ветвей $\underline{I}_1, \underline{I}_2$:

$$\underline{I} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{\text{эк}}};$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I} \frac{\underline{Z}_2 \mp \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M};$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I} \frac{\underline{Z}_1 \mp \underline{Z}_M}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M}.$$

Суммарную мощность, потребляемую цепью P , рассчитывают по известной формуле:

$$P = \text{Re}[\underline{U} \cdot \overset{+}{\underline{I}}] = UI \cos \varphi,$$

эта мощность должна быть равна сумме мощностей P_{r1} , P_{r2} , рассеиваемых в виде тепла на сопротивлениях R_1 и R_2 :

$$P_{r1} = I_1^2 R_1;$$

$$P_{r2} = I_2^2 R_2.$$

Мощности, поступающие в каждую катушку в отдельности, определяются двумя составляющими – мощностью тепловых по-

ть (она всегда положительна) и мощностью, отдаваемой (получаемой) из магнитного поля $\pm P_m$:

$$P_1 = P_{r1} \pm P_{m1};$$

$$P_2 = P_{r2} \pm P_{m2},$$

очевидно, что $P_{m1} + P_{m2} = 0$.

В конечном итоге должно выполняться условие:

$$P = P_1 + P_2 = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2.$$

4.3. Расчёт токов воздушного трансформатора

Воздушный трансформатор с индуктивной связью двух катушек (см. рис. 3) может быть представлен эквивалентной схемой замещения без индуктивной связи (рис. 6).

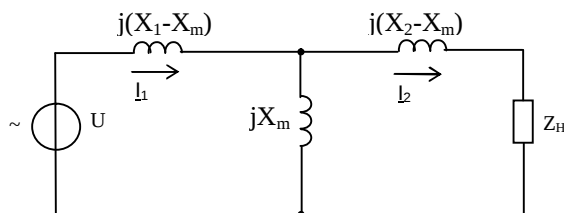


Рис. 6

При коэффициенте трансформации $n=1$ имеем $L_1=L_2=M$ или $X_1=X_2=X_m$. Поэтому расчёты токов упрощаются:

$$I_1 = \frac{U}{Z_1};$$

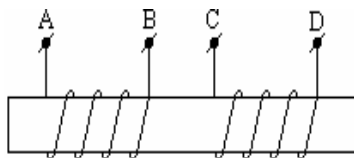
$$I_2 = I_1 \frac{jX_m}{Z_H + jX_m};$$

$$Z_1 = \frac{jX_m Z_H}{jX_m + Z_H} - \text{входное сопротивление трансформатора.}$$

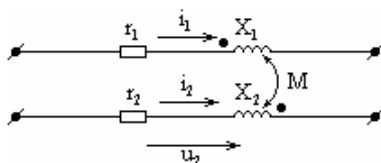
5. Контрольные задачи

1. Как изменится взаимная индуктивность двух катушек без ферромагнитного сердечника, если:
 - а) ток в одной из них увеличить в n раз;

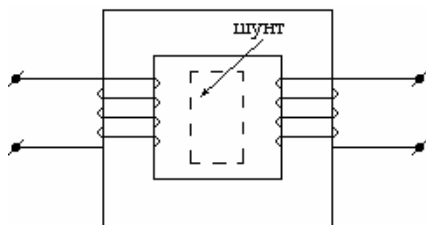
б) числа витков в обеих катушках уменьшить в n раз.



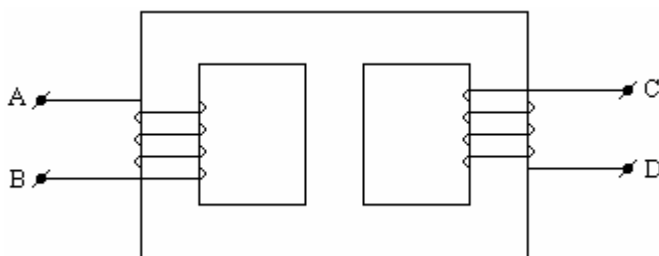
2. Определить одноимённые зажимы двух индуктивно связанных катушек, одетых на общий стержень, как показано на рисунке.
3. Две индуктивно связанные катушки соединены последовательно и подключены к сети с напряжением $u = 120 \sin(\omega t - 18^\circ)$ В. При этом по катушкам течёт ток, комплексное значение которого $\underline{I} = 6e^{-j18^\circ}$ А. Определить, как соединены катушки – согласно или встречно?
4. Для двух индуктивно связанных катушек заданы: $i_1 = 7,5 \sin(\omega t + 90^\circ)$ А; $r_2 = 6$ Ом; $X_2 = 5$ Ом; $\omega M = 2$ Ом; $\underline{I}_{2m} = 5e^{-j90^\circ}$ А. Найти выражение напряжения u_2 на зажимах второй катушки.



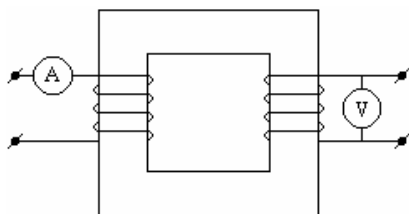
5. Две катушки намотаны на общий сердечник из ферромагнитного материала. Как изменятся собственные индуктивность и взаимная индуктивность катушек, если внутрь окна сердечника поместить магнитный шунт?



6. Определить одноимённые зажимы двух индуктивно связанных катушек, надетых на общий сердечник, как показано на рисунке.

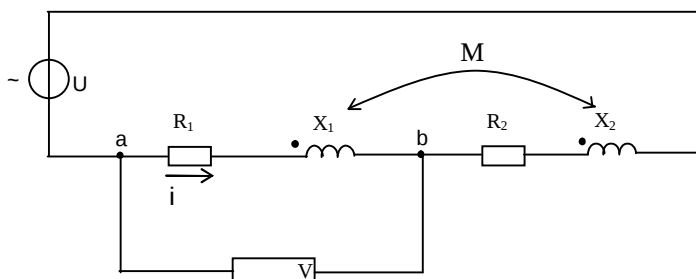


7. На общий сердечник надеты две одинаковые катушки ($X_1=X_2=6 \text{ Ом}$). Что покажет вольтметр, если амперметр показывает $3,5 \text{ А}$ (синусоидальный ток) и коэффициент связи можно считать равным единице?



8. Заданы собственные индуктивности и коэффициент связи двух катушек: $L_1=0,1 \text{ Гн}$, $L_2=0,1 \text{ Гн}$, $K=0,8$. Определить взаимную индуктивность M .
9. Две индуктивно связанные катушки соединены последовательно встречно. Известно, что $R_1 = R_2 = X_1 = X_2 = 2\omega M = 10 \text{ Ом}$, а показание вольтметра $U_{ab}=138 \text{ В}$.

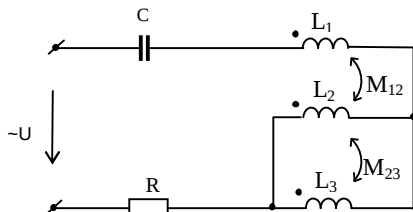
Определить действующее значение напряжения источника при согласном и встречном включениях катушек.



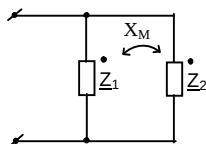
10. Вычислить коэффициент связи двух катушек, если известно: $L_1=0,05 \text{ Гн}$, $L_2=0,2 \text{ Гн}$, $M=0,08 \text{ Гн}$.
11. Две одинаковые, индуктивно связанные катушки соединены последовательно. Ток в цепи и напряжение на её зажимах выражаются комплексами: $\underline{I} = 8e^{-j26^\circ} \text{ А}$, $\underline{U} = 64e^{-j26^\circ} \text{ В}$. Опреде-

лить r и L одной катушки, если взаимная индуктивность $M=0,16$ Гн, частота $f=50$ Гц.

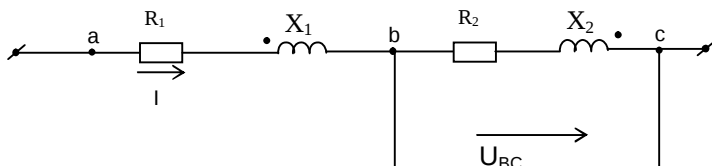
12. В цепи $L_1=2,8$ мГн, $L_2=6$ мГн, $L_3=3$ мГн, $M_{12}=M_{23}=2$ мГн. Чему равна емкость C , если при частоте $\omega = 5000$ рад/с в цепи наступает резонанс напряжений?



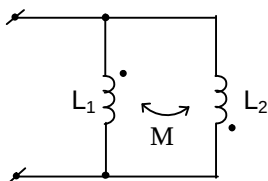
13. Определить входное сопротивление двухполюсника. $Z_1=6+j8$, $Z_2=4+j3$, $K=0,5$.



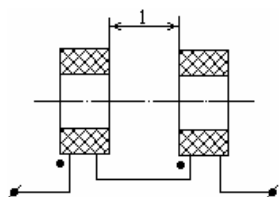
14. В цепи $R_1=R_2=\frac{1}{2}\omega M$. Определить сдвиг фаз между током в цепи и напряжением U_{bc} на зажимах второй катушки, если $X_1=X_2=R_1=R_2$.



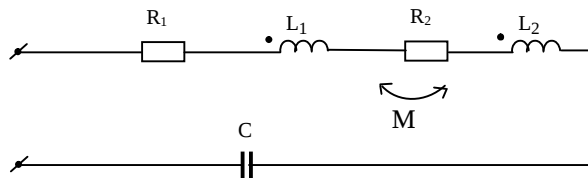
15. Две последовательно соединённые индуктивно связанные катушки включены встречно, причём взаимная индуктивность равна половине собственной индуктивности первой катушки. Как изменится напряжение на первой катушке, если в условиях режима заданного тока уменьшить до нуля коэффициент связи? Активным сопротивлением катушек пренебречь.
16. Пренебрегая активным сопротивлением катушек, определить их эквивалентную индуктивность, если коэффициент связи между ними равен единице.



17. Две катушки (на схеме они изображены в разрезе) расположены соосно друг другу. Как изменится их эквивалентная индуктивность, если увеличить расстояние L между ними?



18. Определить значение ёмкости C , при котором в заданной цепи наступит резонанс.



Мы на многое не отваживаемся не потому, что оно трудно, а трудно оно потому, что мы на него не отваживаемся.

Кто не хочет ни бежать, ни сражаться – чем поможешь тому?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННОЙ В ЗВЕЗДУ

1. Содержание работы

Исследуются трехфазные цепи, соединенные в звезду, с симметричной и несимметричной нагрузкой с нулевым проводом и без него. Теоретически рассчитываются токи и напряжения на нагрузке, а затем с помощью программы Multisim проверяются результаты расчётов. По результатам расчетов строят векторные диаграммы и делают соответствующие выводы.

2. Цель работы

Теоретически и экспериментально исследовать режимы работы трехфазной цепи, соединенной в звезду, в том числе и при аварийных режимах. Научиться определять токи, напряжения и мощность в трех- и четырехпроводных цепях при различных видах нагрузки.

3. Подготовка к работе

Подготовка предусматривает изучение теоретического материала, а также выполнение предварительных расчетов, относящихся к основным режимам работы трехфазных цепей при соединении источника и нагрузки звездой.

3.1. Симметричная нагрузка

Исходные данные: $\underline{U}_A = 220 \text{ В}$; $f = 50 \text{ Гц}$; $Z_A = Z_B = Z_C = Z = 22 \text{ Ом}$.

- 3.1.1. Для симметричной трехфазной цепи (рис. 1) рассчитать токи I_A , I_B , I_C , а также напряжения на нагрузке U_{An} , U_{Bn} , U_{Cn} для рабочего и аварийных режимов. Расчеты произвести для четырех- и трехпроводной схем соединения. Во втором случае ключ K – разомкнут. Результаты расчетов занести в табл.1. Для каждого режима работы построить векторные диаграммы токов и напряжений.

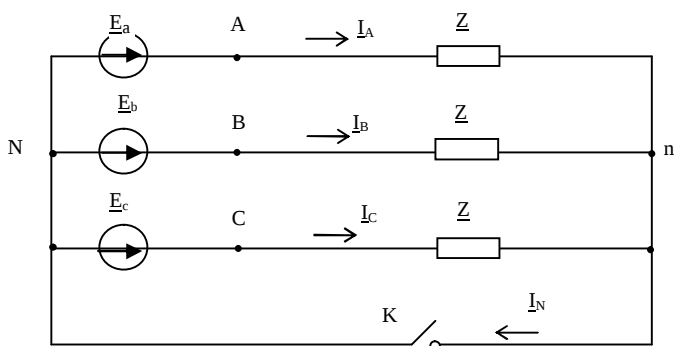


Рис. 1

Таблица 1

Схема соединения	Режим работы	Исследования	$U_{An}, В$	$U_{Bn}, В$	$U_{Cn}, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$U_{nn}, В$	$I_N, А$
Четырех-проводная (К–замкнут)	Симметричная нагрузка	Расчет								
		Эксперимент								
	Обрыв линии А	Расчет								
		Эксперимент								
Трех-проводная (К–разомкнут)	Симметричная нагрузка	Расчет								
		Эксперимент								
	Обрыв линии А	Расчет								
		Эксперимент								
	Короткое замыкание фазы А	Расчет								
		Эксперимент								
	Обратное включение фазы А	Расчет								
		Эксперимент								

- 3.1.2.* Определить линейные напряжения и построить топографическую диаграмму для соединенного звездой трехфазного источника, если две его фазы соединены правильно, а фаза А присоединена к ним неправильно.

3.2. Несимметричная нагрузка

Режим несимметричной нагрузки рассчитывают и моделируют для схемы, приведенной на рис. 2. Здесь напряжение источника задано как и ранее $\underline{U}_A = 220$ В; сопротивления нагрузки выбирают из табл. 2 в зависимости от варианта (номера бригады).

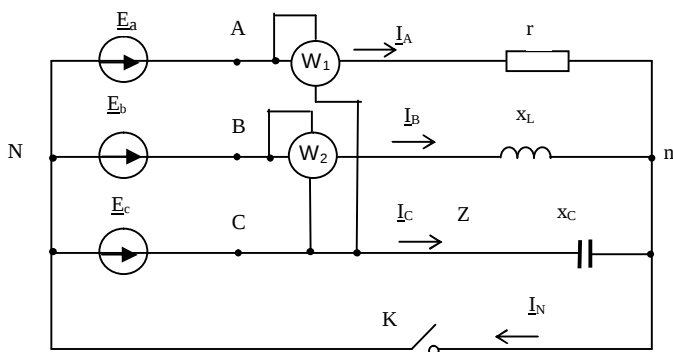


Рис. 2

Таблица 2

Параметры нагрузки	Номер варианта						
	1,12	2,11	3,10	4,9	5,8	6,7	13,14
$r = x_L = x_C, \text{ Ом}$	10	20	30	40	50	50	50

- 3.2.1. Для схемы (см. рис. 2) при замкнутом ключе К рассчитать комплексы фазных токов $\underline{I}_A$, $\underline{I}_B$, $\underline{I}_C$ и ток $\underline{I}_N$ – в нейтральном проводе, а также показания ваттметров W_1 и W_2 . Сравнить активную мощность нагрузки $P_A = I_A^2 r$ с суммой показаний ваттметров W_1 и W_2 , объяснить их возможное несовпадение. Результаты расчетов привести в табл. 3. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на нагрузке.

* Пункт, отмеченный звездочкой, выполняется факультативно.

Таблица 3

Исследование (ключ К-замкнут)	I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_N, A	$W_1, ВТ$	$W_2, ВТ$	$P_A, ВТ$	$r', Ом$
Расчет								
Эксперимент								

3.2.2. Рассчитать сопротивление r' , при котором ток в нулевом проводе равен нулю.

3.2.3. Рассчитать схему (см. рис. 2) с разомкнутым ключом, т.е. без нулевого провода. Результаты расчетов привести в табл. 4.

Таблица 4

Исследова- ние (ключ К-разомкнут)	I_A, A	I_B, A	I_C, A	$\underline{U}_{An}, В$	$\underline{U}_{Bn}, В$	$\underline{U}_{Cn}, В$	$\underline{U}_{nN}, В$	$W_1, ВТ$	$W_2, ВТ$	$P_A, ВТ$	$r'', Ом$
Расчет											
Эксперимент											

Построить векторную диаграмму токов и напряжений на нагрузке. Сравнить активную мощность фазы А $P_A = I_A^2 r$ с суммой показаний ваттметров W_1 и W_2 . Объяснить причину изменения режимов работы цепи по отношению к предыдущей схеме (п. 3.2.1) при одинаковых сопротивлениях нагрузок.

3.2.4.* Проанализировать влияние сопротивления r на режим работы трехпроводной цепи. Для этого нужно задать ряд значений $\frac{r}{x} = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1$ ($x = x_L = x_C$ – здесь сопротивле-

ние фаз В и С по модулю). Построить график зависимости $U_{nN} = f(r)$ и по нему определить численное значение сопротивления, при котором напряжение смещения U_{nN} становится минимальным. Сравнить найденное значение сопротивления с сопротивлением r' , рассчитанным в п. 3.2.2. Сделать пояснения и выводы по этому поводу.

4. Экспериментальная часть

При экспериментальном исследовании трехфазных цепей с помощью программы Multisim следует обратить внимание на следующие моменты:

4.1. При задании трехфазной системы напряжений источника начальные фазы задают только положительными значениями, поэтому, если принять фазу А источника за нулевую, $U_A = 220\text{ В}$, для остальных фаз получим $U_B = 220\text{В}/50\text{Гц}/240\text{Deg}$; $U_C = 220\text{В}/50\text{Гц}/120\text{Deg}$ (рис. 3).

4.2. Токи и напряжения измеряют с помощью амперметров и вольтметров. Необходимо сделать переустановку на измерение переменных величин, т.е. в опции **MODE** выбрать кнопку **AC**.

4.3. При установке параметров индуктивности L и емкости C используют известные формулы:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}, \text{ Гн}; \quad C = \frac{10^6}{2\pi f X_C}, \text{ мкФ}.$$

4.4. Углы сдвига по фазе между напряжением и током на нагрузке измеряют с помощью двухлучевого осциллографа или ИЧХ. В случае использования осциллографа в фазы **В** и **С** необходимо включить шунты – добавочные сопротивления малой величины, порядка 0,1 Ом.

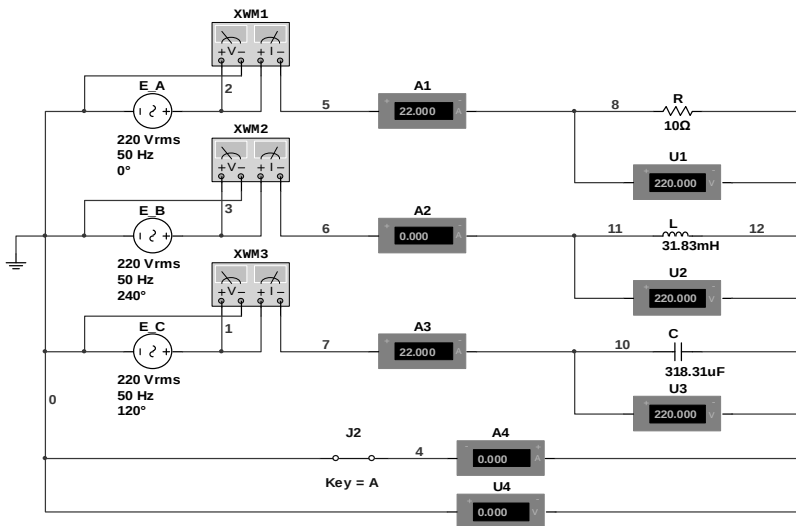


Рис. 3

5. Методика выполнения работы

Ниже приведен тот же порядок расчета трехфазных цепей, что указан в табл.1, 3, 4.

5.1. Симметричная нагрузка

5.1.1. Четырехпроводная схема соединения.

Напряжения на нагрузке, если пренебречь сопротивлениями проводов – линейных и нулевого, равны фазным напряжениям источника:

$$\underline{U}_{An} = \underline{U}_A; \quad \underline{U}_{Bn} = \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{Cn} = \underline{U}_C.$$

5.1.2. Токи в фазах приемника, они же линейные токи при симметричной нагрузке, равны по модулю, поэтому их сумма – ток в нулевом проводе – равна нулю.

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_A}{r}; \quad \underline{I}_B = \frac{\underline{U}_B}{r}; \quad \underline{I}_C = \frac{\underline{U}_C}{r};$$
$$\underline{I}_N = \underline{I}_A + \underline{I}_B + \underline{I}_C = 0.$$

5.2. Несимметричная нагрузка

5.2.1. Четырехпроводная схема соединения. Благодаря нулевому проводу, сопротивлением которого можно пренебречь, напряжения на сопротивлениях нагрузки независимо от ее характера – симметрична она или несимметрична, будут равны соответствующим фазным напряжениям источника:

$$\underline{U}_{An} = \underline{U}_A; \quad \underline{U}_{Bn} = \underline{U}_B; \quad \underline{U}_{Cn} = \underline{U}_C.$$

Ток в нулевом проводе при несимметричной нагрузке не равен нулю, кроме частного случая, о котором говорится в п. 3.2.2, для схемы, приведенной на рис.2. Это условие выполняется при

$r' = \frac{x}{\sqrt{3}}$, что иллюстрирует векторная диаграмма токов.

5.2.2. В трехпроводной схеме соединения с несимметричной нагрузкой появляется напряжение смещения нейтрали $\underline{U}_{nN}$:

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \underline{Y}_A + \underline{U}_B \underline{Y}_B + \underline{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

$$\text{так как } \underline{Y}_B + \underline{Y}_C = 0, \quad \underline{Y}_A = \frac{1}{r}, \quad \text{то } \underline{U}_{nN} = \underline{U}_A \left(1 - \sqrt{3} \frac{r}{x} \right),$$

где x – сопротивление фаз В и С по модулю. Пользуясь этой формулой, легко определить фазные напряжения на нагрузках при различных значениях r :

$$\underline{U}_{An} = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_{Bn} = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN}; \quad \underline{U}_{Cn} = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN}.$$

Так, если сопротивление в фазе А равно $r' = \frac{x}{\sqrt{3}}$, то $U_{nN} = 0$, это значит, что потенциал т. п равен потенциалу т. N и на диаграмме точка п совпадает с точкой N, т.е. фазные напряжения на нагрузке U_{An} , U_{Bn} , U_{Cn} совпадают с фазными напряжениями источника U_A , U_B , U_C .

При $r=0$ фаза А закорочена, $U_{nN} = U_A$, это значит, что потенциал т.п равен потенциалу т. А, и на диаграмме точка п совпадает с точкой А и напряжения на двух других фазах возрастают до линейного $U_{Bn} = -U_{AB}$, $U_{Cn} = U_{CA}$. В трехпроводной схеме соединения с несимметричной нагрузкой, приведенной на рис.2, режим обрыва фазы А недопустим, так как в этом случае фазы В и С оказываются соединенными последовательно в резонансе напряжения, общее индуктивное сопротивление $x = x_L - x_C$ стремится к нулю, а ток в контуре – к бесконечности.

Схема, приведенная на рис.2, имеет замечательное свойство источника тока, это значит, что ток в фазе А не зависит от сопротивления нагрузки r при изменении его в значительных пределах (кроме $r \rightarrow \infty$):

$$I_A = (U_A - U_{nN}) \frac{1}{r} = (U_A - U_A + U_A \sqrt{3} \frac{r}{x}) \frac{1}{r} = \frac{\sqrt{3} U_A}{x}.$$

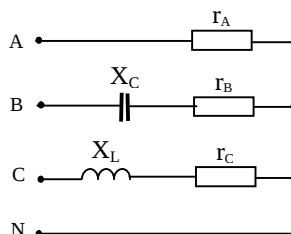
Это справедливо при условии, что реактивные элементы L и C приняты идеальными.

5.2.3. Ваттметры, включенные на схеме (см. рис.2), регистрируют активную мощность передачи энергии. Для расчета их показаний берут скалярное произведение соответствующих значений тока и напряжения:

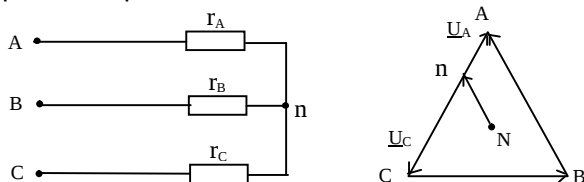
$$P_{w_1} = I_A U_{AC} \cos(I_A \wedge U_{AC}); P_{w_2} = I_B U_{BC} \cos(I_B \wedge U_{BC}).$$

6. Контрольные задачи

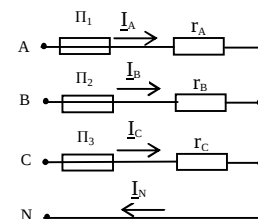
1. Симметричный трехфазный приемник, соединенный звездой, имеет сопротивление фазы $Z_1 = 9 \text{ Ом}$. Другой симметричный приемник соединен треугольником и подключен к той же сети. Каково сопротивление фазы Z_2 второго приемника, если известно, что линейные токи обоих приемников одинаковы?



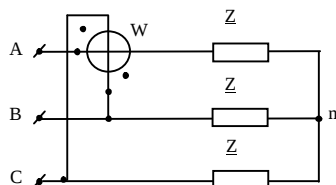
- Активная мощность потребления энергии приемником $P=4950$ Вт, напряжение сети $U_{\text{л}} = 380$ В, $I_A = 10$ А, $I_B = 10$ А, коэффициент мощности фазы А $\cos\varphi_A = 1,0$, фазы В $\cos\varphi_B = 0,5$, С $\cos\varphi_C = 0,5$. Определить ток I_C , сопротивления r_C и x_L , а также реактивную мощность потребления энергии.
- В схеме наблюдается аварийный режим ($r_A < r_B < r_C$). Определить характер и место аварийного режима по приведенной векторной диаграмме.



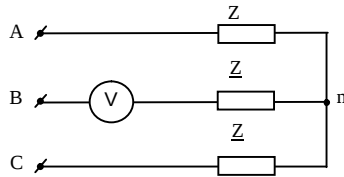
- В электрической цепи $r_B = r_C = 2r_A$. Как изменятся токи, если перегорит предохранитель Π_1 ? Пояснить с помощью векторной диаграммы.



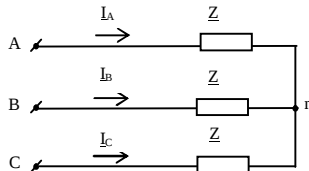
- Каково по характеру сопротивление $\underline{Z}$ симметричного трехфазного приемника, если, несмотря на наличие питающего напряжения, ваттметр показывает ноль?



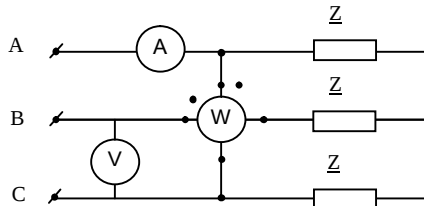
- Во сколько раз изменится величина активной мощности потребления энергии, если симметричный приемник, соединенный звездой без нейтрали, пересоединить в треугольник при неизменном линейном напряжении?
- Что покажет вольтметр, включенный в цепь симметричного трехфазного приемника, если линейное напряжение питающей сети равно U ? Пояснить при помощи векторной диаграммы.



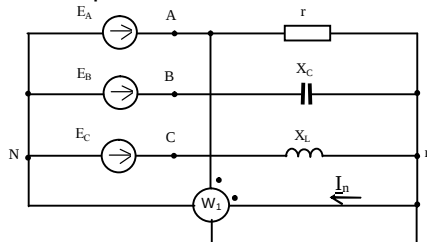
8. Как изменятся линейные токи симметричной звезды без нейтрали, если фазу A закоротить? I – линейный ток при симметричной нагрузке.



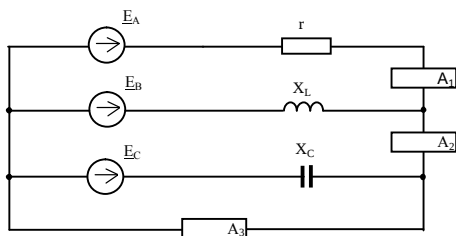
9. Симметричный трехфазный приемник питается от трехфазной сети. Вольтметр и амперметр показывают соответственно $U = 380$ В; $I = 3$ А, что покажет ваттметр, если сопротивления $\underline{Z}$ – чисто активные?



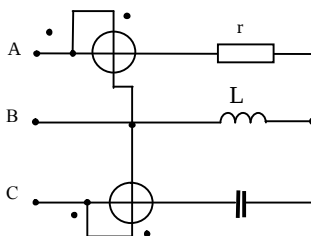
10. Параметры цепи: $U_{\phi} = 100$ В; $r = x_C = x_L = 10$ Ом. Определить показание ваттметра.



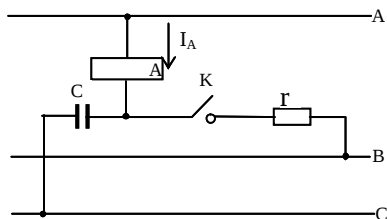
11. Три приемника питаются от трехфазного источника, соединенного в звезду. Сопротивления приемников одинаковы по модулю. Определить показания второго и третьего амперметров, если первый показывает 1 А. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.



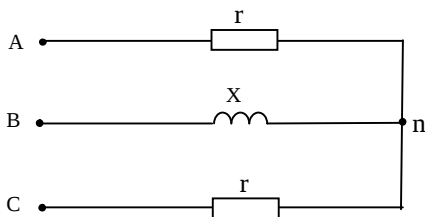
12. Определить показания ваттметров и построить векторную диаграмму токов и напряжений, если $r = x_C = x_L = 10 \text{ Ом}$.



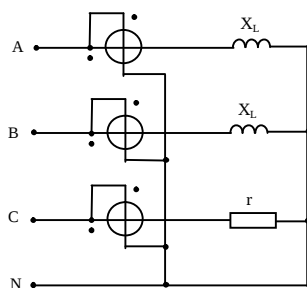
13. Определить отношение токов, регистрируемых амперметром А, до и после замыкания ключа К. Известно, что источник симметричный и $r = x_C$.



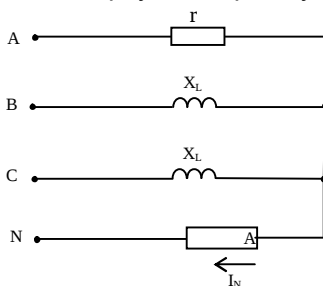
14. Рассчитать коэффициент мощности ($\cos \varphi$) трехфазной нагрузки при $r = x = 1 \text{ Ом}$, $U_\phi = 100 \text{ В}$. Трехфазный источник напряжения симметричный.



15. $U_\phi = 100 \text{ В}$, $r = x_L = 1 \text{ Ом}$. Рассчитать показания ваттметров.



16. $U_{\phi} = 100 \text{ В}$, $r = x_L = 1 \text{ Ом}$. Рассчитать ток в нейтральном проводе I_N . Построить векторную диаграмму токов и напряжений.



Библиографический список

1. СМК-О-СМГТУ-31-06. Лабораторная работа: общие требования. Магнитогорск, 2007.
2. ГОСТ 2.702-75. ЕСКД. Правила выполнения электрических схем.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники Т.1. Л.: Энергоиздат, 1981.
4. Основы теории цепей / Г.В.Зевеке, П.А.Ионкин, А.В.Нетушил, С.В.Страхов. М.: Энергоатомиздат, 1989.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Гардарики, 1999.

Содержание

Предисловие.....	3
Лабораторная работа №2.....	4
Лабораторная работа №5.....	29
Лабораторная работа №6.....	41
Лабораторная работа №7.....	52
Лабораторная работа №8.....	65
Библиографический список.....	75