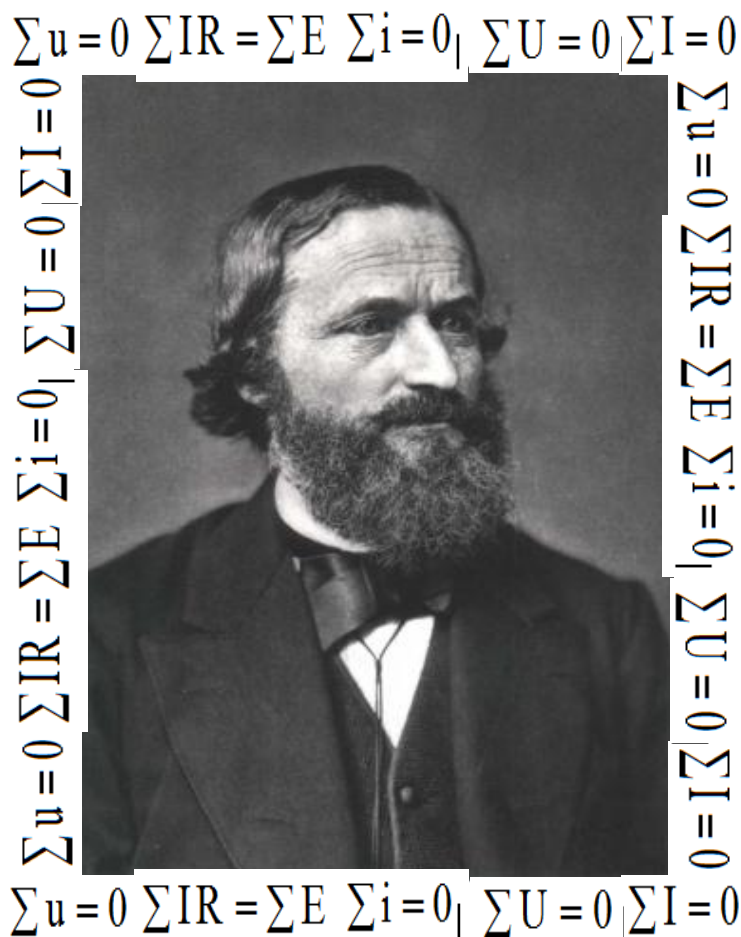


Ж. А. Ген, Т. Л. Сазонова, Д. А. Тонн

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.
МАТЕРИАЛЫ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА,
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ
И КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

Учебное пособие



Воронеж 2024

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Воронежский государственный технический университет»

Ж. А. Ген, Т. Л. Сазонова, Д. А. Тонн

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.
МАТЕРИАЛЫ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА,
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ
И КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

Учебное пособие

Воронеж 2024

УДК 621.3(07)

ББК 31.21я7

Г34

Рецензенты:

*кафедра энергетики Международного института
компьютерных технологий (г. Воронеж);*

*Д. Г. Козлов, канд. техн. наук, доцент кафедры электротехники
и автоматики Воронежского государственного аграрного университета
им. императора Петра I*

Ген, Ж. А.

Теоретические основы электротехники. Материалы лабораторного практикума, практических занятий и курсовой работы: учебное пособие
Г34 [Электронный ресурс]/ Ж. А. Ген, Т. Л. Сазонова, Д. А. Тонн. – Электрон. текстовые и граф. данные (2,1 Мб). – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2024. – 1 электрон. опт. диск (DVD-ROM): цв. – Систем. требования: ПК 500 и выше; 256 Мб ОЗУ; Windows 10; SVGA с разрешением 1024x768; Adobe Acrobat; CD-ROM дисковод; мышь. – Загл. с экрана.

ISBN 978-5-7731-1177-1

В пособии изложены рекомендации к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники», материалы практических занятий, задания и методические указания по выполнению курсовой работы по всем изучаемым разделам дисциплины.

Издание предназначено для студентов второго курса направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профили «Электропривод и автоматика», «Электроснабжение») заочной формы обучения.

Ил. 59. Табл. 23. Библиогр.: 11 назв.

УДК 621.3(07)

ББК 31.21я7

*Издается по решению редакционно-издательского совета
Воронежского государственного технического университета*

ISBN 978-5-7731-1177-1

© Ген Ж. А., Сазонова Т. Л.,
Тонн Д. А., 2024

© ФГБОУ ВО «Воронежский
государственный технический
университет», 2024

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Теоретические основы электротехники» является одной из основных для изучения профилирующих дисциплин студентами электротехнических специальностей. Это в полной мере относится к направлению подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профили «Электропривод и автоматика», «Электроснабжение» заочной формы обучения, по учебному плану которых изучение данной дисциплины осуществляется в течение двух семестров.

Изучение данной дисциплины позволит студентам заочной формы обучения:

- освоить методы расчетов установившихся и неуставившихся режимов работы линейных электрических цепей на примере электрических цепей постоянного тока;
- освоить методы расчетов установившихся режимов работы линейных электрических цепей переменного тока;
- получить практические навыки по исследованию электрических цепей и обработке результатов измерений.

Студенты заочной формы обучения много самостоятельно работают с учебной литературой. Материал данного учебного пособия, представленный в сжатом виде, позволит им наиболее эффективно использовать время при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники». Данное учебное пособие поможет студентам более глубоко изучить материал по дисциплине «Теоретические основы электротехники», самостоятельно выполнить курсовую работу.

В учебное пособие вошел материал по основным разделам, изучаемым в дисциплине «Теоретические основы электротехники» студентами электротехнических направлений. Учебное пособие может быть использовано при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники» студентами всех форм обучения.

РАЗДЕЛ I. ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

Указания по технике безопасности

Во время выполнения лабораторных работ студенты должны выполнять следующие правила:

1. К выполнению работ студенты допускаются только после проведения преподавателем инструктажа по технике безопасности и пожарной безопасности. Запись об инструктаже заносится в соответствующий журнал и подтверждается личной подписью в нем каждого студента.

2. Все работы по сборке исследуемой электрической цепи проводятся только при отключенном напряжении. Напряжение на лабораторный стенд подается с помощью пакетного переключателя - поворот по часовой стрелке на один оборот. При этом на передней панели стенда загораются сигнальные лампы. Замена элементов электрической цепи также выполняется при отключенном напряжении.

3. При сборке электрической цепи запрещается пользоваться проводами с неисправной изоляцией и без наконечников или штырей. Необходимо следить за надежностью крепления (зажима) наконечников или штырей токонесущих проводов.

4. Напряжение на исследуемые электрические цепи подается **только с разрешения преподавателя после проверки правильности сборки схемы.**

5. Запрещается прикасаться к неизолированным частям устройств, находящихся под напряжением.

6. Не разрешается оставлять без присмотра лабораторную установку, находящуюся под напряжением.

7. О неисправностях в лабораторной установке необходимо немедленно уведомить преподавателя или лаборанта.

8. После окончания работы разборка исследуемой электрической цепи должна производиться при отключенном напряжении и только после разрешения преподавателя.

9. В аварийных ситуациях для быстрого отключения напряжения студент должен нажать красную кнопку **АВАРИЙНОГО ОТКЛЮЧЕНИЯ**, предусмотренную на каждом стенде.

10. В случае поражения работающего электрическим током цепь должна быть немедленно отключена от источника питания. Пострадавшему должна быть оказана первая помощь. При необходимости следует вызвать скорую медицинскую помощь.

Требования к подготовке и оформлению лабораторных работ

1. До выполнения лабораторной работы необходимо изучить соответствующий раздел дисциплины «Теоретические основы электротехники».

2. Лабораторные работы выполняются бригадами, состоящими не более чем из трех студентов (по указанию преподавателя). Каждой бригаде преподавателем присваивается порядковый номер.

3. Лабораторные работы выполняются по вариантам. Номер варианта соответствует номеру бригады.

4. Для допуска к выполнению лабораторной работы необходимо представить рабочую тетрадь по лабораторным работам с результатами предварительных расчетов.

Рабочая тетрадь по всем лабораторным работам в электронном виде размещена в ЭИОСе ВГТУ и должна быть заранее распечатана на листах формата А4.

5. Рабочая тетрадь должна содержать:

- а) титульный лист;
- б) номер, название и цель лабораторной работы;
- в) электрические схемы лабораторной установки и расчетные схемы замещения;
- г) предварительные расчеты;
- д) таблицы, в которые заносятся экспериментальные и расчетные данные;
- е) графики и диаграммы, построенные по расчетным и экспериментальным данным;
- ж) выводы по работе.

Графики и диаграммы выполняются по ГОСТу с помощью чертежных инструментов в выбранном масштабе.

6. Полученные результаты экспериментов, сделанных во время выполнения лабораторной работы, **обязательно проверяются и подписываются преподавателем.**

7. Защита осуществляется каждым студентом путем решения задач по тематике лабораторной работы и ответов на контрольные вопросы. Контрольные вопросы приведены в конце каждой лабораторной работы.

1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальная проверка выполнения законов Кирхгофа; исследование распределения потенциалов в сложной электрической цепи; проверка выполнения баланса мощностей.

Описание лабораторной установки

В работе исследуется электрическая цепь, содержащая два источника ЭДС и три резистора. Схема электрической цепи приведена на рис. 1.1. Источники энергии и резисторы установлены в блоках лабораторного стенда. В схему включаются резисторы, сопротивления которых согласно варианту выбираются по данным табл. 1.1.

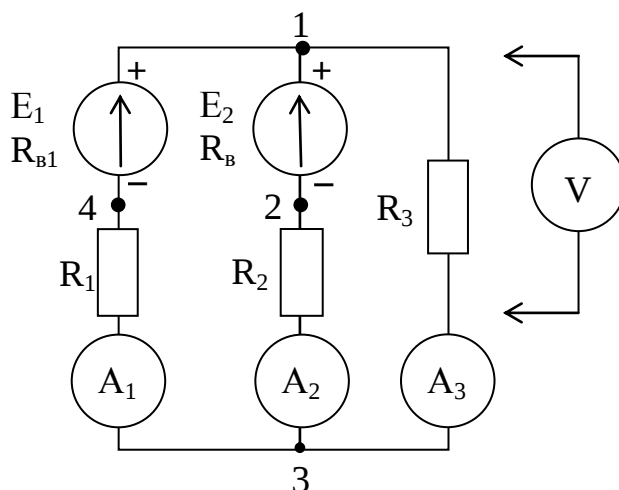


Рис. 1.1

Измерительные приборы:

- переносной вольтметр;
- амперметры Э59 0,25÷1,0 А – 3 шт.

Задание на подготовительную работу

Повторить разделы дисциплины «ТОЭ», в которых изучаются:

- законы Ома и Кирхгофа;
- методы анализа электрических цепей, основанные на этих законах;
- построение потенциальных диаграмм для контура электрической цепи;
- составление и проверка баланса мощностей.

Распечатать рабочую тетрадь по лабораторным работам.

Ознакомиться с программой лабораторной работы и с содержанием рабочей тетради.

Таблица 1.1

№ варианта	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	Номер точки с φ=0
1	75	100	150	1
2	150	75	30	2
3	100	160	75	3
4	35	75	100	4
5	35	100	75	4
6	40	75	30	3
7	100	75	35	2
8	35	75	150	1
9	35	100	40	2
10	75	165	35	4
11	150	100	75	1
12	75	165	100	3

Программа работы

1. Измерить ЭДС E₁ и E₂ источников, расположенных на лабораторном стенде.

Для этого включить питание лабораторного стенда и измерить напряжение на зажимах источников ЭДС E₁ и E₂ в режиме холостого хода. Данные измерений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

E ₁ , В	E ₂ , В	U _{E1} , В	U _{E2} , В	I ₁ , А	I ₂ , А	I ₃ , А	U _{R1} , В	U _{R2} , В	U _{R3} , В

2. Собрать исследуемую электрическую цепь (рис. 1.1). Номиналы сопротивлений резисторов R₁÷R₃ согласно варианту указаны в табл. 1.1.

3. Измерить токи в ветвях цепи и напряжения на зажимах источников ЭДС E₁ и E₂ и резисторов R₁, R₂, R₃. Данные измерений занести в табл. 1.2.

4. По данным измерений п. 3 рассчитать сопротивления резисторов и внутренние сопротивления источников ЭДС. Данные расчетов занести в табл. 1.3.

Расчет выполняется на основании закона Ома для пассивного и активного участков цепи:

- сопротивление приемников: $R_n = \frac{U_{Rn}}{I_n}$;

- внутренне сопротивления источников ЭДС, работающих в режиме генератора: $R_{Bn} = \frac{E_n - U_{En}}{I_n}$;

- внутренне сопротивления источников ЭДС, работающих в режиме приемника: $R_{B_n} = \frac{U_{E_n} - E_n}{I_n}$.

Таблица 1.3

$R_{B1}, \text{Ом}$	$R_{B2}, \text{Ом}$	$R_1, \text{Ом}$	$R_2, \text{Ом}$	$R_3, \text{Ом}$

5. Измерить потенциалы точек схемы относительно точки, потенциал которой принимается равным нулю. Номер точки, потенциал которой принимается за нулевой, указан согласно варианту в табл. 1.1. Данные измерений занести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

$\varphi_1, \text{В}$	$\varphi_2, \text{В}$	$\varphi_3, \text{В}$	$\varphi_4, \text{В}$

Для измерения потенциалов черный наконечник вольтметра подключают к узлу, потенциал которого, согласно варианту, принимается равным нулю. Тогда, подключая красный наконечник к остальным точкам цепи, можно измерить их потенциалы.

6. Составить схему замещения исследуемой цепи.

На схеме замещения реальные источники ЭДС показывают в виде последовательного соединения идеального источника и его внутреннего сопротивления (рис. 1.2). Измеренные ЭДС источников и рассчитанные значения их внутренних сопротивлений берутся из данных табл. 1.2 и 1.3. Сопротивления нагрузочных резисторов берутся из данных табл. 1.3.

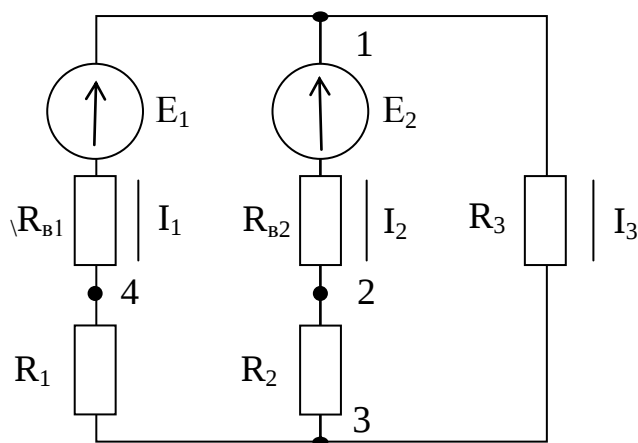


Рис. 1.2

7. Определить направления токов в ветвях электрической цепи.

Для этого необходимо проанализировать распределение потенциалов (табл. 1.4) на зажимах резисторов. И учитывая, что в резисторе ток направлен от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом, определить

направление тока. Направления токов указать на схеме замещения цепи (рис. 1.2).

8. Для схемы замещения исследуемой цепи (рис. 1.2) составить систему уравнений по законам Кирхгофа, необходимую для определения токов в ветвях схемы.

Подставить в полученную систему уравнений численные значения токов, сопротивлений и ЭДС из данных табл. 1.2 и 1.3. Убедиться в выполнении законов Кирхгофа.

9. Для контура, содержащего оба источника ЭДС, построить потенциальную диаграмму, используя данные табл. 1.2 и 1.3.

10. Для схемы замещения исследуемой электрической цепи составить уравнение баланса мощностей и проверить его выполнение.

11. Сделать выводы по проделанной лабораторной работе.

Контрольные вопросы

1. Схема электрической цепи. Основные элементы электрической схемы.

2. Закон Ома. Применение закона Ома для определения напряжения и тока на участке, содержащем источник ЭДС.

3. Законы Кирхгофа.

4. Схемы замещения реальных источников электрической энергии. Эквивалентное преобразование реального источника тока в источник ЭДС.

5. Определение токов в ветвях разветвленной электрической схемы путем непосредственного применения законов Кирхгофа.

6. Как в лабораторной работе определялись сопротивления приемников и внутренние сопротивления источников электрической энергии.

7. Как в лабораторной работе определялись мощности источников и приемников электрической энергии.

8. Поясните составление уравнения баланса мощностей для исследуемой цепи.

9. Режимы работы источников электрической энергии. В каком режиме работают источники энергии исследуемой цепи.

10. Потенциальная диаграмма и порядок ее построения.

2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы: экспериментальное определение параметров пассивных элементов электрической цепи; построение векторных диаграмм для последовательного соединения элементов по опытным данным.

Описание лабораторной установки

На рис. 2.1 и 2.2 приведены схемы исследуемых электрических цепей.

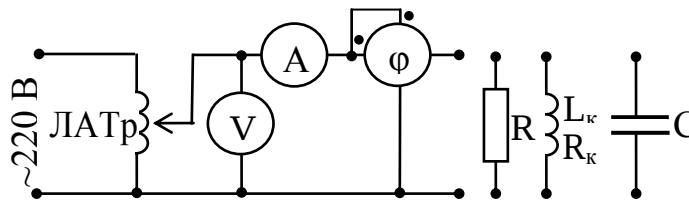


Рис. 2.1

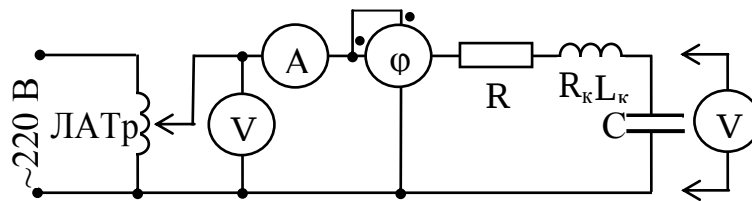


Рис. 2.2

Питание электрической цепи осуществляется от лабораторного автотрансформатора ЛАТр, позволяющего регулировать входное напряжение в пределах от 0 до 250 В.

В качестве приемников используются:

- катушка однофазного универсального трансформатора с параметрами R_k , L_k (с клеммами 1-2-3, сердечник разомкнут);
- батарея конденсаторов, емкость которой можно изменять от 0 до 34,75 мкФ;
- резисторы с сопротивлениями $R_1=75$ Ом, $R_2=100$ Ом, $R_3=150$ Ом.

Измерительные приборы:

- переносной вольтметр - 1 шт.;
- амперметр типа Э59 0÷1 А - 1 шт.;
- фазометр электродинамической системы.

Задание на подготовительную работу

Повторить разделы дисциплины «Теоретические основы электротехники», в которых рассматриваются вопросы расчета однофазных цепей синусоидального тока и построение векторных диаграмм.

Ознакомиться с программой лабораторной работы и с содержанием рабочей тетради.

Программа работы

1. Собрать цепь по схеме рис. 2.1, поочередно подключая резистор, индуктивную катушку и конденсатор, которые, согласно варианту, указаны в табл. 2.1.

Таблица 2.1

№ варианта	Резистор	Катушка	Конденсатор
1	$R_1=75 \text{ Ом}$	клеммы 2-3	$C=10 \text{ мкФ}$
2	$R_2=100 \text{ Ом}$	клеммы 1-2	$C=15 \text{ мкФ}$
3	$R_3=150 \text{ Ом}$	клеммы 2-3	$C=20 \text{ мкФ}$
4	$R_1=75 \text{ Ом}$	клеммы 1-3	$C=25 \text{ мкФ}$
5	$R_2=100 \text{ Ом}$	клеммы 2-3	$C=30 \text{ мкФ}$
6	$R_3=150 \text{ Ом}$	клеммы 1-3	$C=10 \text{ мкФ}$
7	$R_1=75 \text{ Ом}$	клеммы 1-2	$C=15 \text{ мкФ}$
8	$R_2=100 \text{ Ом}$	клеммы 2-3	$C=20 \text{ мкФ}$
9	$R_3=150 \text{ Ом}$	клеммы 1-2	$C=25 \text{ мкФ}$
10	$R_1=75 \text{ Ом}$	клеммы 1-3	$C=30 \text{ мкФ}$
11	$R_2=100 \text{ Ом}$	клеммы 2-3	$C=15 \text{ мкФ}$
12	$R_3=150 \text{ Ом.}$	клеммы 1-2	$C=30 \text{ мкФ}$

2. На входе цепи с помощью ЛАТРа установить напряжение **70-120 В**, чтобы *ток в цепи не превышал 1 А*.

Измерить ток и угол сдвиг фаз между напряжением и током соответствующего элемента. Результаты измерений заносятся в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Приемник	Измерено			Вычислено			
Резистор	$U_R, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$\varphi_R, \text{ град}$	$z, \text{ Ом}$	$R, \text{ Ом}$	$X, \text{ Ом}$	
Индуктивная катушка	$U_k, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$\varphi_k, \text{ град}$	$z, \text{ Ом}$	$R_k, \text{ Ом}$	$X_k, \text{ Ом}$	$L, \text{ Гн}$
Конденсатор	$U_C, \text{ В}$	$I, \text{ А}$	$\varphi_C, \text{ град}$	$z, \text{ Ом}$	$R_C, \text{ Ом}$	$X_C, \text{ Ом}$	$C, \text{ мкФ}$

3. Рассчитать параметры резистора, индуктивной катушки и конденсатора по данным табл. 2.2.

4. Собрать цепь по схеме рис. 2.2 используя элементы, указанные согласно варианту в табл. 2.1.

5. Измерить ток и напряжения на всех участках цепи при напряжении питания **70-120 В**, чтобы *ток в цепи не превышал 1 А*. Показания измерительных приборов записать в табл. 2.3.

Таблица 2.3

$I_1, \text{А}$	$\varphi, \text{град}$	$U_R, \text{В}$	$U_K, \text{В}$	$U_C, \text{В}$	$U_{\text{вх}}, \text{В}$

6. Построить векторную диаграмму тока и напряжений на участках цепи, используя экспериментально полученные значения тока и напряжений из табл. 2.3.

Методические указания к пункту 3

Определение параметров пассивного двухполюсника опытным путем

Параметры пассивных двухполюсников определяют опытным путем, используя измеренные ток I и напряжение U рассматриваемого элемента, а также угол сдвига фаз φ между этими величинами.

Измерение осуществляется с помощью приборов - амперметра, вольтметра и фазометра. Схема электрической цепи, используемая для опытного определения параметров элементов, приведена на рисунке 2.3.

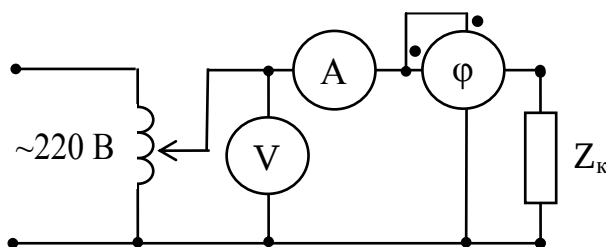


Рис. 2.3

Определение параметров индуктивной катушки

На схеме замещения реальная катушка индуктивности изображена в виде последовательного соединения ее активного и реактивного сопротивлений.

Для определения активного сопротивления катушки R_K и индуктивности L_K , катушку и измерительные приборы подключают к сети переменного тока согласно схеме, показанной на рис. 2.3.

С помощью приборов измеряем действующие значения напряжения на зажимах цепи U , тока I и с помощью фазометра угол сдвига фаз φ_K между ними. По измеренным значениям рассчитаем:

- полное сопротивление катушки $z_K = \frac{U_K}{I}$;

- активную и реактивную составляющие сопротивления катушки по формулам, которые можно легко получить из треугольника сопротивлений

$$R_K = z_K \cos \varphi_K; \quad X_L = z_K \sin \varphi_K.$$

Так как $X_L = \omega L = 2\pi f L$, то индуктивность катушки определяется как:

$$L_K = \frac{X_L}{\omega} = \frac{X_L}{2\pi f}.$$

Аналогичным образом можно определить параметры резистора и конденсатора.

С учетом того, что реактивное сопротивление конденсатора

$$X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi f C),$$

емкость конденсатора можно рассчитать как:

$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{2\pi f X_C}.$$

Методические указания к пункту 6

Построение векторных диаграмм по опытными данным

Векторные диаграммы на основании опытных данных строятся на миллиметровой бумаге в следующей последовательности.

Векторная диаграмма строится для последовательного соединения элементов, по которым протекает один и тот же ток. Поэтому примем начальную фазу тока ψ_i равной нулю. Вектор тока $\dot{I}$ в выбранном масштабе токов m_i совмещаем с осью действительных чисел на комплексной плоскости (рис. 2.4).

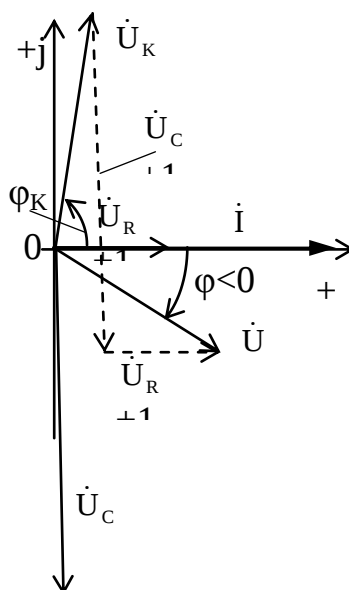


Рис. 2.4

Все остальные вектора напряжений строим относительно вектора тока.

Вектор напряжения на резисторе сдвинут относительно тока на угол φ_R (см. данные табл. 2.2). Как правило, этот угол практически равен нулю. Поэтому на векторной диаграмме вектор напряжения резистора совпадает по фазе с вектором тока.

Напряжение индуктивной катушки сдвинуто относительно тока на угол φ_K (см. данные табл. 2.2). Угол φ_K положительный, поэтому на векторной диаграмме напряжение катушки опережает ток по фазе на этот угол.

Напряжение конденсатора сдвинуто относительно тока на угол φ_C (см. данные табл. 2.2). Угол φ_C отрицательный и, как правило, этот угол близок к девяноста градусам. На векторной диаграмме напряжение конденсатора отстает от тока по фазе на угол $\varphi_C \approx 90^\circ$.

Сумма векторов напряжений резистора, катушки и конденсатора даст входное напряжение $\dot{U}$, сдвиг фаз φ между этим напряжением и током известен (см. данные табл. 2.3).

На полученной векторной диаграмме (рис. 2.4) проверяем соблюдение второго закона Кирхгофа:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_K + \dot{U}_C.$$

Контрольные вопросы

1. Мгновенное значение синусоидального тока и его временная диаграмма.
2. Изображение синусоидальных величин векторами и комплексными числами.
3. Действия с комплексными числами.
4. Временные и векторные диаграммы токов и напряжений при включении в цепь синусоидального тока активного, индуктивного и емкостного элементов.
5. Понятие активной и реактивной мощности.
6. Режим резонанса напряжений в цепи синусоидального тока. Добротность резонансного контура.
7. По данным, полученным в лабораторной работе, поясните ход резонансных кривых.
8. Определение параметров приемников, включаемых в цепь синусоидального тока, опытным путем.
9. Поясните порядок построения векторных диаграмм для различных режимов работы цепи по отчету по лабораторной работе.
10. Закон Ома и Законы Кирхгофа в комплексной форме записи.
11. Определение комплексного сопротивления при последовательном, параллельном и смешанном соединении приемников.
12. На примере электрической схемы, рассматриваемой в лабораторной работе, поясните алгоритм расчета токов и напряжений в цепях синусоидального тока.
13. Построение векторных диаграмм. Как на векторной диаграмме показывается угол сдвига фаз между напряжением и током участка цепи.
14. На векторной диаграмме, построенной по экспериментальным данным, покажите выполнение второго закона Кирхгофа.

3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ НАГРУЗКИ ЗВЕЗДОЙ И ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы: исследование работы трехфазных цепей при соединении фаз нагрузки «звездой» и «треугольником» при симметричных и несимметричных режимах.

Описание лабораторной установки

В работе исследуются электрические цепи, схемы которых показаны на рис. 3.1 и 3.2.

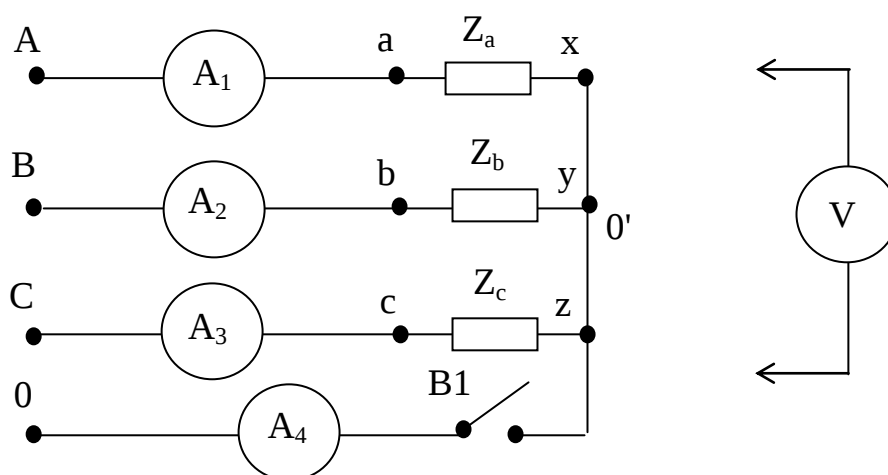


Рис. 3.1

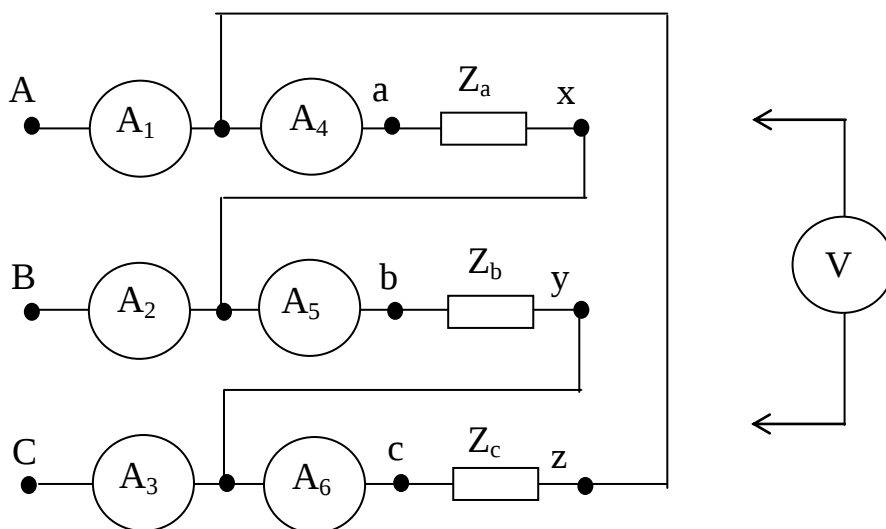


Рис. 3.2

Питание цепи осуществляется от трехфазной сети с линейным напряжением 220 В, частотой 50Гц (клеммы А, В, С, 0 универсального стенда).

Выключатель В1 в нейтральном проводе дает возможность исследовать четырехпроводную и трехпроводную цепи.

В качестве однофазных приемников используются три ламповых реостата, расположенных в центральной части на универсальном стенде (клеммы АХ, ВУ, СЗ). Активное сопротивление полностью включенных ламповых реостатов 330 Ом. Фаза, в которой осуществляются все изменения нагрузки, выбирается согласно варианту по табл. 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
фаза	а	в	с	а	в	с	с	а	в	в	с	а

Таблица 3.2

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
фаза	ав	вс	са	вс	са	ав	вс	са	ав	вс	ав	са

Измерительные приборы:

- амперметр Э59 0,25÷1,0 А - 4 шт;
- амперметр Э59 1÷2 А - 3 шт.;
- переносной вольтметр - 1 шт.

Задание на подготовительную работу

Повторить разделы дисциплины по теме «Трехфазные цепи»; ознакомиться с программой лабораторной работы и с содержанием рабочей тетради.

Программа работы

А) Исследование трехфазной цепи при соединении фаз нагрузки «звездой»

1. Собрать электрическую цепь рис. 3.1.
2. Измерить токи и напряжения в схемах с нейтральным и без нейтрального провода для следующих режимов:
 - а) симметричная активная нагрузка - в каждую фазу включены все пять ламп лампового реостата;
 - б) несимметричная активная нагрузка, обусловленная уменьшением нагрузки одной из фаз - в одной из фаз согласно варианту (табл. 3.1) выключают две лампы;
 - в) обрыв нагрузки в одной из фаз - в одной из фаз все лампы лампового реостата выключаются;
 - г) короткое замыкание (**КЗ**) одной из фаз **трехпроводной** цепи - в одной из фаз согласно варианту (табл. 3.1) начало и конец фазы приемника соединяются проводником. Данные измерений занести в табл. 3.3.

Таблица 3.3

Режим	Схема	$U_{ab},$ В	$U_{bc},$ В	$U_{ca},$ В	$U_a,$ В	$U_b,$ В	$U_c,$ В	$U_0,$ В	$I_a,$ А	$I_b,$ А	$I_c,$ А	$I_0,$ А
Равномерная нагрузка	С н.пр.											
	Без н.пр.											
Уменьшение нагрузки в фазе	С н.пр.											
	Без н. пр.											
Обрыв в фазе	С н.пр.											
	Без н.пр.											
КЗ в фазе	Без н.пр.											

3. Рассчитать активную и реактивную мощности приемников для всех режимов, пользуясь данными табл. 3.3.

4. По данным измерений построить векторные диаграммы токов и напряжений для всех исследуемых режимов.

5. Сделать выводы по работе.

Б) Исследование трехфазной цепи при соединении фаз нагрузки «треугольником»

1. Собрать электрическую цепь рис. 3.2.

2. Измерить токи и напряжения в трехфазной цепи для следующих режимов:

а) симметричная активная нагрузка - в каждую фазу включены все пять ламп лампового реостата;

б) несимметричная активная нагрузка, обусловленная уменьшением нагрузки одной из фаз - в одной из фаз согласно варианту (табл. 3.2) выключают две лампы;

в) обрыв одной из фаз приемника - в одной из фаз приемника согласно варианту (табл. 3.2) выключаются все лампы лампового реостата;

г) обрыв линейного провода одной из фаз генератора -отсоединяется провод, соединяющий согласно варианту (табл. 3.2) начало одной из фаз приемника с началом фазы генератора; для этого достаточно выключить автоматический предохранитель в соответствующей фазе.

Данные измерений занести в табл. 3.4.

3. Рассчитать активную и реактивную мощности приемников для всех режимов, пользуясь данными табл. 3.4.

4. По данным измерений построить топографические векторные диаграммы напряжений, совмещенные с векторной диаграммой токов и для всех исследуемых режимов.

5. Сделать выводы по работе.

Таблица 3.4

Режим	$U_{ab}, В$	$U_{bc}, В$	$U_{ca}, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$I_{ab}, А$	$I_{bc}, А$	$I_{ca}, А$
Равномерная нагрузка									
Уменьшение нагрузки в фазе									
Обрыв фазы приемника									
Обрыв лин. провода									

Методические указания к пункту 4

Построение векторных диаграмм по опытным данным

Перед построением векторных диаграмм необходимо выбрать масштабы для построения векторов:

- масштаб для построения токов m_I ;
- масштаб для построения напряжений m_U .

Построение диаграмм по опытным данным для цепи, фазы которой соединены по схеме «звезда», начинают с построения векторов линейных напряжений генератора. Для этого в масштабе напряжений, зная действующие значения трех линейных напряжений U_{AB} , U_{BC} , U_{CA} , посредством засечек, сделанных с помощью циркуля, строят равносторонний треугольник, образованный векторами линейных напряжений (рис. 3.3).

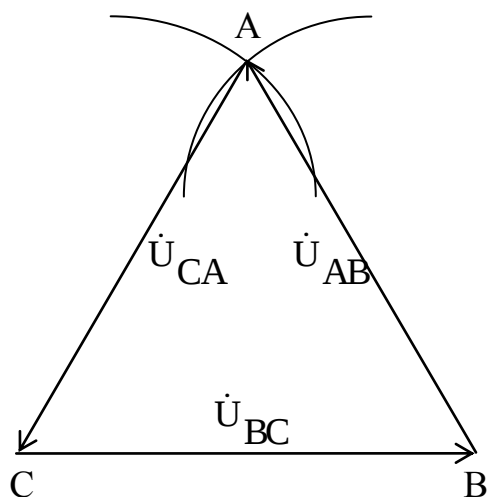


Рис. 3.3

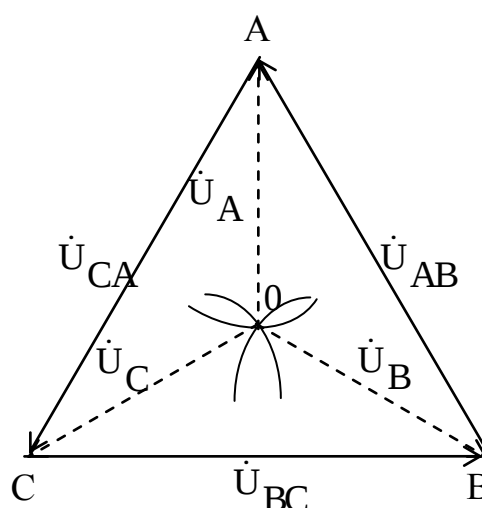


Рис. 3.4

Из точек А, В и С, полученного треугольника линейных напряжений, откладывают с помощью циркуля отрезки, соответствующие в выбранном масштабе действующим значениям фазных напряжений генератора U_A , U_B , U_C . Точка пересечения дуг определяет координату нулевой точки генератора «0» (рис. 3.4).

Затем из точек А, В и С в масштабе напряжений откладывают отрезки, соответствующие действующим значениям напряжений приемников U_a , U_b , U_c (рис. 3.5). Получаем координату нулевой точки нагрузки «0'». Соединив точки «0» и «0'», построим вектор напряжения смещения нейтрали U_{00} .

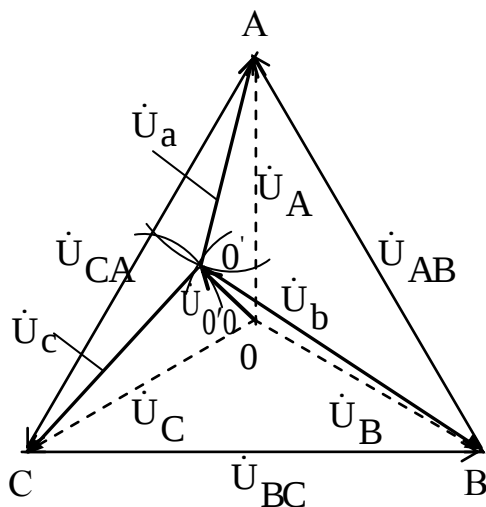


Рис. 3.5

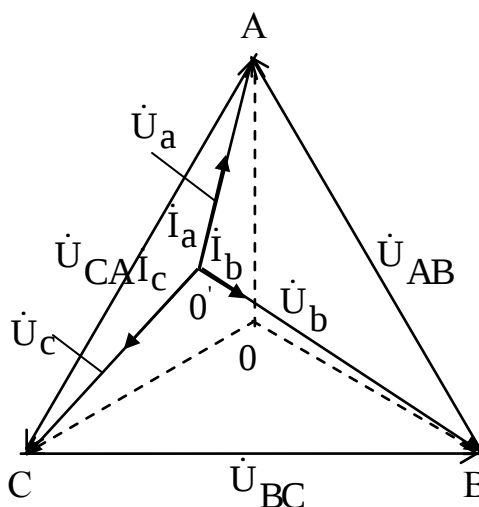


Рис. 3.6

В исследуемой цепи нагрузка в фазах приемника носит чисто активный характер. Поэтому вектора фазных токов в выбранном масштабе откладываются совпадающими с векторами фазных напряжений нагрузки (рис. 3.6).

В схеме с нулевым проводом фазные напряжения нагрузки и генератора равны. Ток нулевого провода строят на векторной диаграмме, как векторную сумму фазных токов нагрузки.

В схеме без нулевого провода сумма фазных токов нагрузки равна нулю.

Построение диаграмм по опытным данным для цепи, фазы которой соединены по схеме «*треугольник*», также начинают с построения векторов линейных напряжений генератора, аналогично построению линейных напряжений для предыдущего случая. Фазные напряжения нагрузки равны соответствующим линейным напряжениям генератора.

Нагрузка в фазах приемника носит чисто активный характер. Поэтому вектора фазных токов I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} в выбранном масштабе откладывают совпадающими с векторами фазных напряжений нагрузки (рис. 3.7).

Векторы линейных токов I_A , I_B , I_C строят как векторную разность соответствующих фазных токов, согласно первому закону Кирхгофа (рис. 3.8).

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

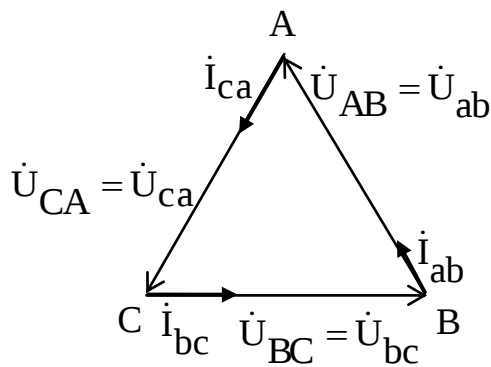


Рис. 3.7

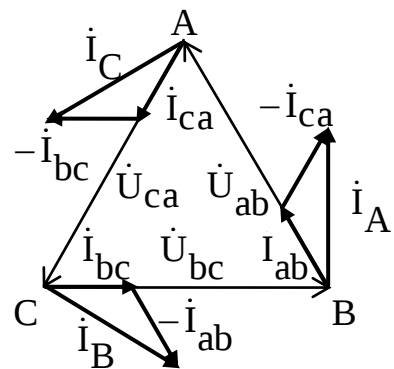


Рис. 3.8

Контрольные вопросы

1. Получение симметричной трехфазной системы ЭДС.
2. Соединение фаз трехфазного генератора по схеме «звезда» и «треугольник».
3. Соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении фаз трехфазного генератора по схеме «звезда» и «треугольник».
4. Расчет токов и напряжений трехфазной цепи в различных режимах работы при соединении фаз нагрузки по схеме «звезда» при наличии и отсутствии нулевого провода.
5. Соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями в трехфазной цепи при соединении фаз нагрузки по схеме «звезда» при симметричной нагрузке.
6. Построение векторных диаграмм по опытным данным для схемы при соединении фаз «звездой».
7. Расчет мощностей в трехфазных цепях при симметричной и несимметричной нагрузках.
8. Расчет токов и напряжений в трехфазной цепи при соединении фаз нагрузки по схеме «треугольник» для различных режимов работы.
9. Соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями в трехфазной цепи при соединении фаз нагрузки по схеме «треугольник» при симметричной нагрузке.
10. Расчет мощностей в трехфазных цепях при симметричной и несимметричной нагрузках.
11. Построение векторных топографических диаграмм по опытным данным.

4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИК

Цель работы: исследование режимов работы пассивного четырехполюсника, определение коэффициентов А- формы записи уравнений четырехполюсника, характеристического сопротивления, постоянной передачи.

Описание лабораторной установки

Схема исследуемой цепи приведена на рис. 4.1.

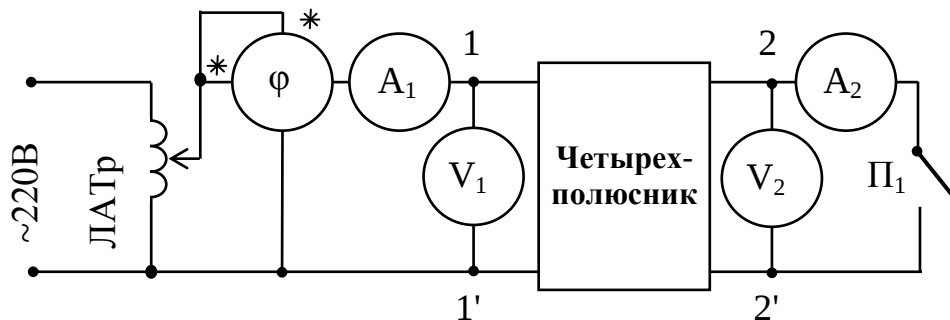


Рис. 4.1

В качестве источника питания используется сеть переменного тока лабораторного стенда напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Напряжение на входе исследуемой цепи устанавливается с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТР).

Схема соединения элементов четырехполюсника согласно варианту приведена в табл. 4.1.

Параметры элементов четырехполюсника:

- резисторы $R=100\text{ Ом}$, $R_1 = 150\text{ Ом}$;
- конденсаторы $C = 10\text{ мкФ}$ и $C_1 = 30\text{ мкФ}$;
- катушка однофазного универсального трансформатора с индуктивностью $L_k = 0,4\text{ Гн}$ и активным сопротивлением $R_k = 23\text{ Ом}$ (клеммы 2-3, сердечник разомкнут).

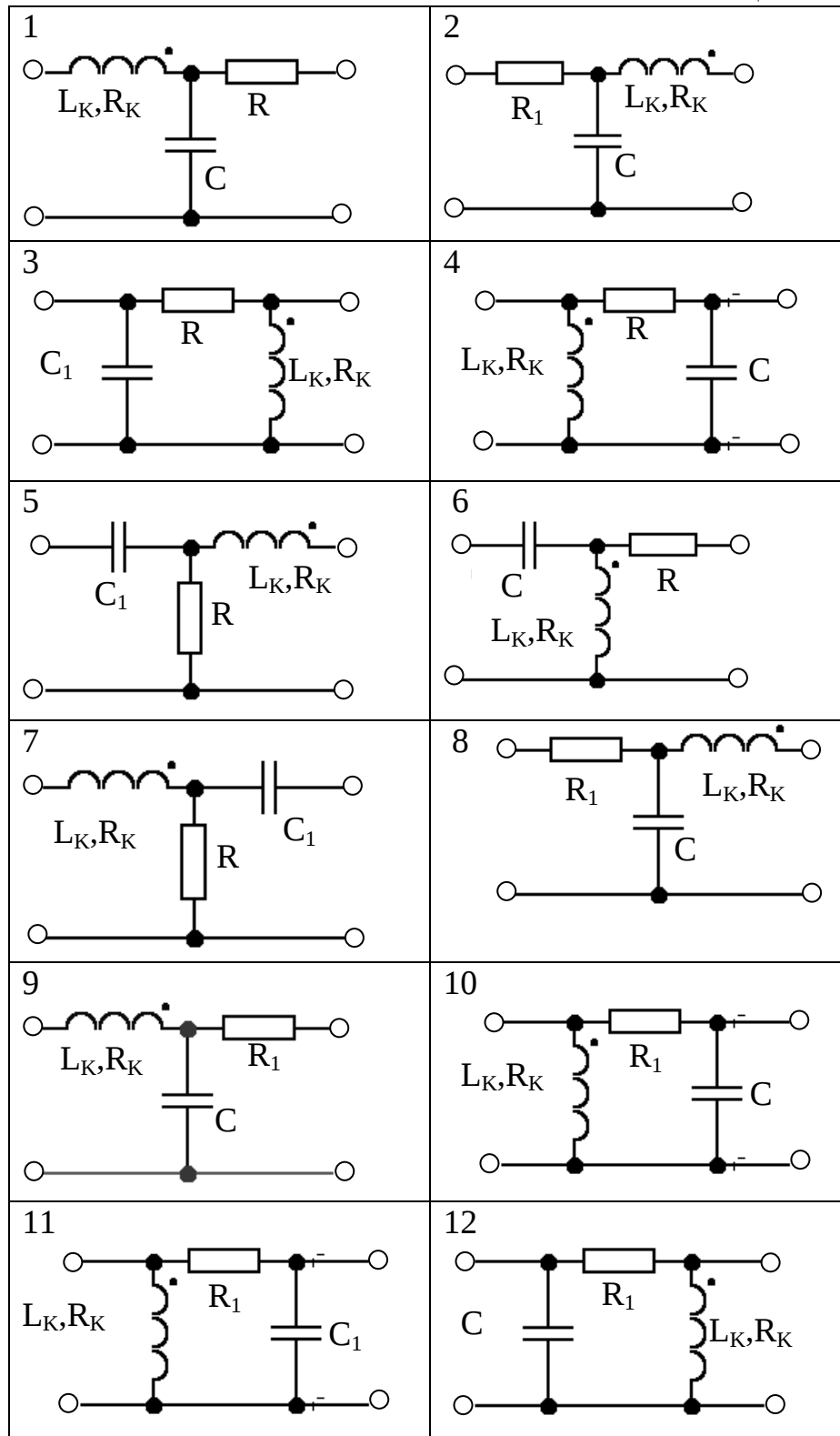
Измерительные приборы:

- амперметры типа Э 359 0,25 - 1,0 А - 2 шт.;
- вольтметры типа Э 359 150-300 В - 2 шт.;
- фазометр.

Задание на подготовительную работу

Изучить материал по теме “Четырехполюсники”, ознакомиться с программой лабораторной работы и с содержанием рабочей тетради.

Таблица 4.1



2. Рассчитать коэффициенты A , B , C , D четырехполусника, заданного согласно варианту в табл. 4.1. Результаты расчетов занести в табл. 4.2.

3. Произвести расчет входных и выходных токов и напряжений в режимах холостого хода и короткого замыкания при прямом и обратном

включении четырехполюсника при питании от источника напряжением 100 В. Результаты расчетов занести в табл. 4.3.

Таблица 4.2

Коэффициенты	A	B, Ом	C, Сим	D
Расчет				
Эксперимент				

Таблица 4.3

Способ включения	Режим	Измерено						Вычислено					
		U ₁ , В	I ₁ , А	φ ₁ , °	U ₂ , В	I ₂ , А	φ ₂ , °	U ₁ , В	I ₁ , А	φ ₁ , °	U ₂ , В	I ₂ , А	φ ₂ , °
Прямое включен.	хх												
	кз												
Обратное включен.	хх												
	кз												

Программа работы

1. Собрать исследуемую электрическую цепь (рис. 4.1). Схема соединения элементов четырехполюсника и их параметры согласно варианту заданы в табл. 4.1.

2. При питании четырехполюсника со стороны первичных зажимов (1 -1') провести опыты холостого хода и короткого замыкания ($U_{\text{пит}} = 100 \text{ В}$). Результаты измерений занести в табл. 4.3.

3. Провести опыты холостого хода и короткого замыкания для обратного включения четырехполюсника (питание со стороны зажимов 2-2').

При этом необходимо учитывать, что вольтметр V_1 и амперметр A_1 будут показывать *выходные* напряжение и ток, а вольтметр V_2 и амперметр A_2 - *входные*. Фазометр в этом случае измерит угол сдвига фаз между векторами напряжения U_2 и тока I_2 . Результаты измерений занести в табл. 4.3.

4. По результатам проведенных опытов холостого хода и короткого замыкания рассчитать комплексные входные сопротивления при прямом и обратном включении четырехполюсника.

5. Вычислить коэффициенты A, B, C, D четырехполюсника. Результаты расчета коэффициентов занести в табл. 4.2. Сравнить их с результатами, полученными в предварительных расчетах.

6. Рассчитать характеристические сопротивления четырехполюсника Z_{1C} , Z_{2C} , постоянную передачи g, коэффициент затухания α и коэффициент фазы β .

7. Построить векторные диаграммы токов и напряжений для режимов холостого хода и короткого замыкания при прямом и обратном включении четырехполюсника, используя расчетные данные.

8. Сделать выводы о проделанной работе.

Методические указания к пункту 7

Построение линейных векторных диаграмм четырехполюсников

Для проверки правильности расчетов коэффициентов четырехполюсника A, B, C, D можно воспользоваться линейными векторными диаграммами.

Для этого вычисленные по экспериментальным данным значения коэффициентов четырехполюсника A, B, C, D необходимо представить в показательной форме записи:

$$A = |A| \cdot e^{j\alpha}; B = |B| \cdot e^{j\beta}; C = |C| \cdot e^{j\gamma}; D = |D| \cdot e^{j\delta}.$$

При построении векторных диаграмм для каждого из рассматриваемых режимов работы четырехполюсника необходимо выбрать опорный вектор.

Так для режима **холостого хода** при прямом включении четырехполюсника в качестве опорного вектора принимаем вектор выходного напряжения U_2 , который располагаем на плоскости произвольно, например, вертикально (рис. 4.2). Длина вектора U_2 должна соответствовать измеренному значению выходного напряжения в соответствии с выбранным масштабом.

Согласно **A-формы** записи уравнений четырехполюсника для режима холостого хода:

$$\dot{U}_{1XX} = A\dot{U}_{2XX}; \quad \dot{I}_{1XX} = C\dot{U}_{2XX}.$$

Из этой системы уравнений получаем вектор входного напряжения U_{1XX} , умножив длину вектора выходного напряжения U_{2XX} на модуль коэффициента A и повернув полученный вектор на угол α , а вектор входного тока I_{1XX} - умножив длину вектора выходного напряжения U_{2XX} на модуль коэффициента C и повернув полученный вектор на угол γ (рис. 4.2).

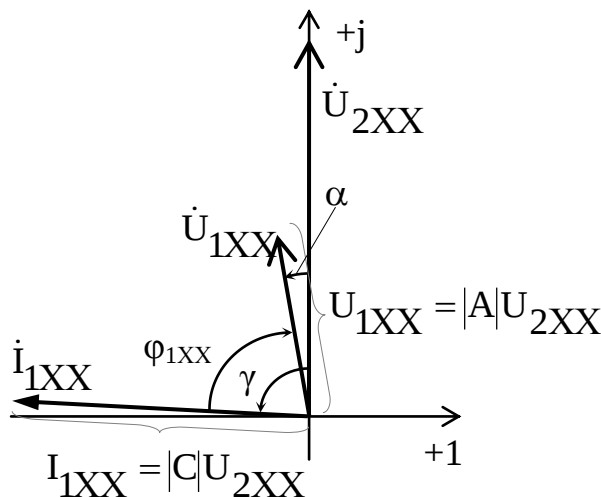


Рис. 4.2

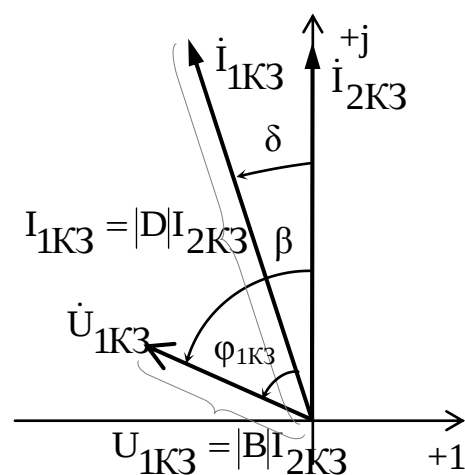


Рис. 4.3

Если длины векторов входного напряжения U_{1XX} и входного тока I_{1XX} совпадут с их экспериментальными значениями, а также угол сдвига фаз между

ними будет соответствовать измеренному значению ϕ_{1XX} , тогда коэффициенты А и С были вычислены правильно.

Для режима **короткого замыкания** при прямом включении четырехполюсника в качестве опорного вектора выбираем вектор выходного тока I_{2K3} , длина которого соответствует измеренному значению (с учетом выбранного масштаба) и направляем его на комплексной плоскости вертикально (рис. 4.3).

А - форма записи уравнений четырехполюсника для режима короткого замыкания:

$$\dot{U}_{1K3} = B\dot{I}_{2K3}; \quad \dot{I}_{1K3} = D\dot{I}_{2K3}.$$

Из этой системы уравнений получаем вектор входного напряжения U_{1K3} умножением длины вектора выходного тока I_{2K3} на модуль коэффициента В и поворотом полученного вектора на угол β , а вектор входного тока I_{1K3} - умножением длины вектора выходного тока I_{2K3} на модуль коэффициента D и поворотом полученного вектора на угол δ (рис. 4.3).

Длины векторов входного напряжения U_{1K3} и входного тока I_{1K3} должны совпадать с их измеренными значениями, а также угол сдвига фаз между ними ϕ_{1K3} должен соответствовать экспериментальному значению, тогда коэффициенты В и D вычислены правильно.

Аналогично строим векторные диаграммы для режимов холостого хода (рис. 4.4) и короткого замыкания (рис. 4.5) для обратного включения четырехполюсника, используя **В-форму** записи уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{2XX} &= D\dot{U}_{1XX}; & \dot{U}_{2K3} &= B\dot{I}_{1K3}; \\ \dot{I}_{2XX} &= C\dot{U}_{1XX}; & \dot{I}_{2K3} &= A\dot{I}_{1K3}. \end{aligned}$$

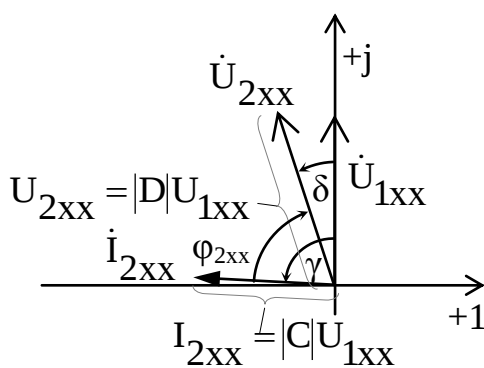


Рис. 4.4

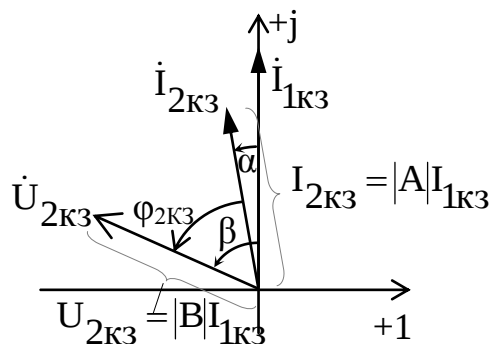


Рис. 4.5

Примечание: Для всех векторных диаграмм применяются одни масштабы, как по току, так и по напряжению. Тогда на всех векторных диаграммах длина вектора питающего напряжения выглядит одинаково, что соответствует условиям эксперимента.

Контрольные вопросы

1. Какие устройства называют четырехполосником. Приведите примеры четырехполосников.
2. Формы записи уравнений четырехполосников.
3. Определение коэффициентов А-формы записи уравнений четырехполосника аналитическими методами.
4. Определение коэффициентов А-формы записи уравнений четырехполосника по опытным данным для режимов холостого хода и короткого замыкания.
5. Согласованный режим работы четырехполосника. Характеристическое сопротивление. Определение характеристического сопротивления по опытным данным.
6. Постоянная передачи. Коэффициенты затухания и фазы.

5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы: исследование переходных процессов в линейных электрических цепях постоянного тока.

Описание лабораторной установки

Для получения устойчивой картины переходного процесса на экране осциллографа исследуемые цепи подключают к источнику прямоугольных импульсов – транзисторному ключу (рис. 5.1).

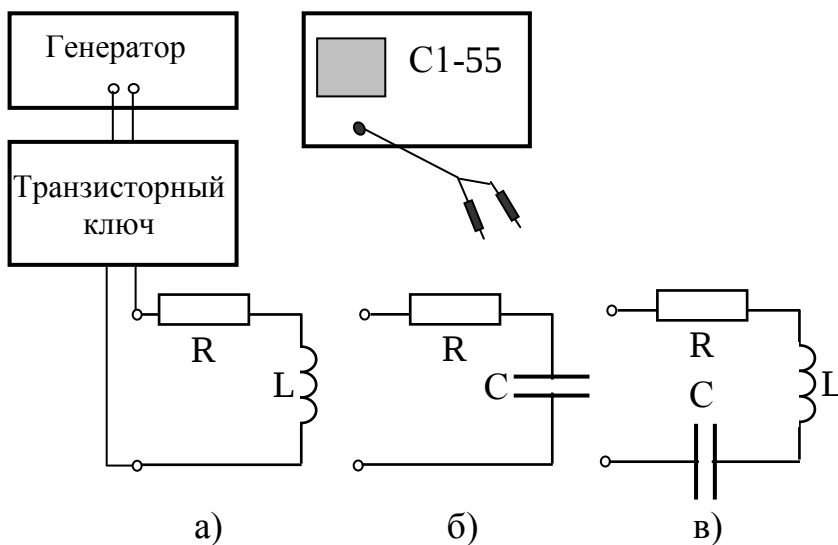


Рис. 5.1

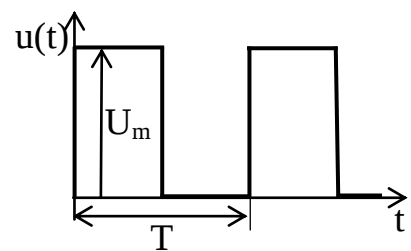


Рис. 5.2

Форма выходного сигнала показана на рис. 5.2. Амплитуда выходного сигнала транзисторного ключа $U_m = 10$ В.

Транзисторный ключ управляется звуковым генератором (рис. 5.1). Частота коммутации ключа равна частоте сигнала генератора. Для исследования цепи важен момент коммутации и интервал времени до следующего включения.

Для того чтобы за время, равное половине длительности прямоугольных импульсов, переходный процесс успевал завершиться, необходимо выполнение условия $t_{\text{пп}} \leq T/2$. А так как время переходного процесса $t_{\text{пп}} = 5\tau$, то длительность прямоугольного импульса определяется как $T/2 = 5\tau$ или $T = 10\tau$. Частота прямоугольных импульсов (частота сигнала генератора) $f = 1/T$.

Для экспериментального снятия кривых переходного процесса используется осциллограф С1-55, позволяющий учитывать масштабы напряжения и времени.

Резистор с сопротивлением R представляет собой магазин сопротивлений $0 \div 10000 \text{ Ом}$.

Конденсатор с емкостью C - блок конденсаторов универсального стенда $0 \div 34.75 \text{ мкФ}$.

Катушка с индуктивностью L - обмотка однофазного универсального трансформатора на разомкнутом сердечнике из комплекта стенда.

Катушка с *разомкнутым сердечником*:

- клеммы 2-3 – $L=0,5 \text{ Гн}$;
- клеммы 1-3 – $L=0,16 \text{ Гн}$;
- клеммы 1-2 – $L=0,18 \text{ Гн}$.

Катушка *без сердечника*:

- клеммы 2-3 – $L=0,016 \text{ Гн}$;
- клеммы 1-3 – $L=0,09 \text{ Гн}$.

Задание на подготовительную работу

Изучить теоретический материал по теме “Классический метод расчёта переходных процессов”, ознакомиться с программой лабораторной работы и с содержанием рабочей тетради.

Произвести расчет переходных процессов в цепи первого порядка (рис. 5.1, а) в соответствии с вариантом задания, приведённым в табл. 5.1, при коммутации питающего напряжения с $U_m = 0$ на напряжение $U_m = 10 \text{ В}$. Построить график требуемого переходного процесса. Определить постоянную времени этого процесса и указать её величину на графике.

Таблица 5.1

№ варианта	$R, \text{ Ом}$	$L, \text{ Гн}$	Искомая функция
1	1200	0,18	$u_R(t)$
2	400	0,16	$u_L(t)$
3	800	0,5	$i(t)$
4	1000	0,5	$u_R(t)$
5	600	0,18	$i(t)$
6	450	0,16	$u_L(t)$
7	800	0,18	$u_R(t)$
8	650	0,5	$i(t)$
9	450	0,18	$u_L(t)$
10	400	0,5	$i(t)$
11	900	0,16	$u_R(t)$
12	850	0,5	$u_L(t)$

Произвести расчет переходного процесса в схеме рис. 5.1, б в соответствии с вариантом задания по данным табл. 5.2. Построить график требуемого переходного процесса. Рассчитать постоянную времени этого процесса и показать ее на графике.

Таблица 5.2

№ варианта	R, Ом	C, мкФ	Искомая функция
1	600	1	$u_R(t)$
2	300	0,5	$u_C(t)$
3	500	0,25	$i(t)$
4	350	0,75	$u_R(t)$
5	400	0,5	$i(t)$
6	700	0,75	$u_C(t)$
7	550	0,25	$u_R(t)$
8	800	0,5	$i(t)$
9	650	0,75	$u_C(t)$
10	900	0,5	$i(t)$
11	450	1	$u_R(t)$
12	650	0,25	$u_C(t)$

Произвести расчет переходного процесса в цепи второго порядка (рис. 5.1, в) соответствии с вариантом задания по данным табл. 5.3. Построить график требуемого переходного процесса. Рассчитать период свободных колебаний, длительность переходного процесса. Определить значение критического сопротивления.

Таблица 5.3

№ варианта	R, Ом	L, Гн	C, мкФ	Искомая функция
1	60	0,009	0,25	$u_R(t)$
2	30	0,016	0,5	$u_C(t)$
3	50	0,009	0,25	$i(t)$
4	35	0,016	0,75	$u_L(t)$
5	40	0,009	0,5	$i(t)$
6	55	0,016	0,75	$u_C(t)$
7	55	0,009	0,25	$u_R(t)$
8	40	0,016	0,5	$u_L(t)$
9	65	0,009	0,75	$u_C(t)$
10	50	0,016	0,5	$i(t)$
11	45	0,009	0,75	$u_R(t)$
12	65	0,016	0,25	$u_L(t)$

Рассчитать необходимую длительность и частоту прямоугольных импульсов на выходе транзисторного ключа для каждой цепи.

Программа работы

1. Подключить транзисторный ключ к выходу звукового генератора (рис. 5.1, а). Установить на выходе генератора напряжение 5 – 10 В и расчетную

частоту. Подключить осциллограф к клеммам Выход транзисторного ключа. Убедиться, что выходное напряжение имеет вид последовательности прямоугольных импульсов.

2. Подключить к выходу транзисторного ключа цепь, собранную по схеме рис. 5.1, а с параметрами элементов, выбранными согласно варианту по данным табл. 5.1.

Получить на экране осциллографа требуемую кривую переходного процесса. Для чего осциллограф необходимо подключить к исследуемому элементу. Снять в масштабе исследуемую кривую, используя сетку экрана осциллографа и установленные масштабы напряжения и времени (В/дел.; сек/дел.). По графику определить постоянную времени и сравнить ее с расчетной.

3. Подключить к выходу транзисторного ключа цепь, собранную по схеме рис. 5.1, б с параметрами элементов, выбранными согласно варианту по данным табл. 5.2.

Получить на экране осциллографа требуемую кривую переходного процесса. По полученному графику определить постоянную времени и сравнить ее с расчетной.

4. Собрать схему рис. 5.1, в по данным табл. 5.3. Снять требуемую кривую переходного процесса. По полученному графику определить постоянную времени, период и количество свободных колебаний, сравнить их значения с расчетными.

5. Изменяя сопротивление резистора R , подобрать такое его значение, при котором колебательный переходный процесс станет апериодическим. Сравнить полученное значение критического сопротивления $R_{кр}$ с расчетным.

6. Сделать выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Причины возникновения переходных процессов.
2. Законы коммутации.
3. Классический метод расчета. Алгоритм расчета.
4. Определение принужденной составляющей переходной функции.
5. Составление характеристического уравнения.
6. Определение свободной составляющей переходной функции.
7. Начальные условия. Независимые начальные условия. Определение зависимых начальных условий.
8. Постоянная времени. Физический смысл постоянной времени. Графическое определение постоянной времени.

РАЗДЕЛ II. САМОСТОЯТЕЛЬНЫЕ РАБОТЫ

6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА №1 РАСЧЕТ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Линейная электрическая цепь постоянного тока содержит идеальный источник ЭДС и резисторы. Схема рассматриваемой электрической цепи изображена на рис. 6.1, номер схемы выбирается согласно варианту - по последней цифре номера зачетной книжки студента. Параметры резисторов выбирают по данным табл. 6.1 по предпоследней цифре номера зачетной книжки.

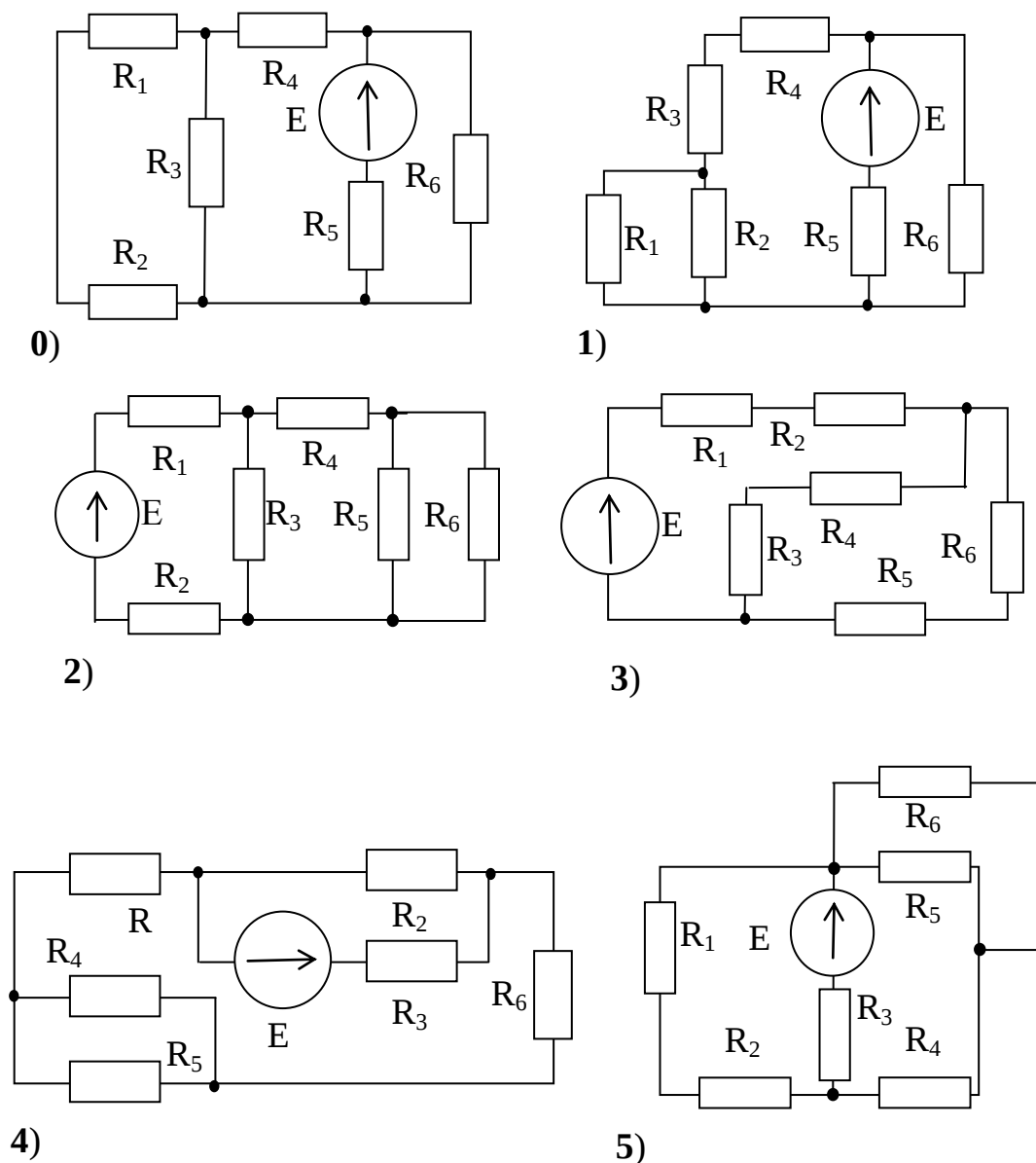
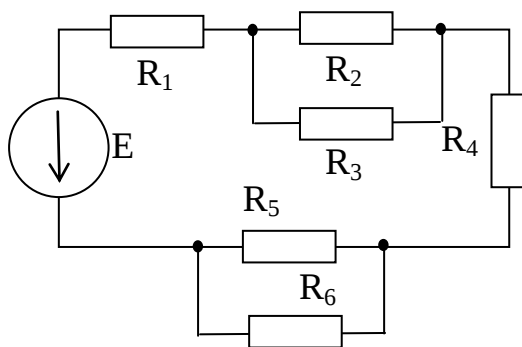
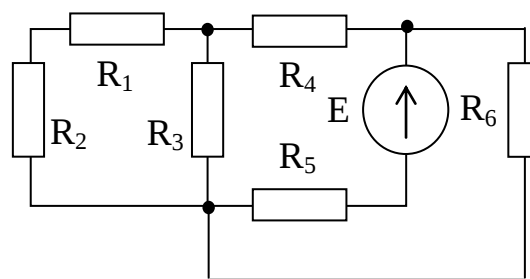


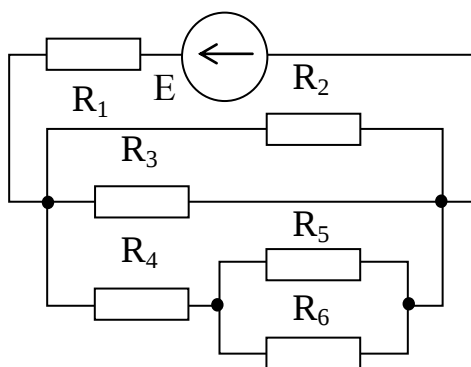
Рис. 6.1



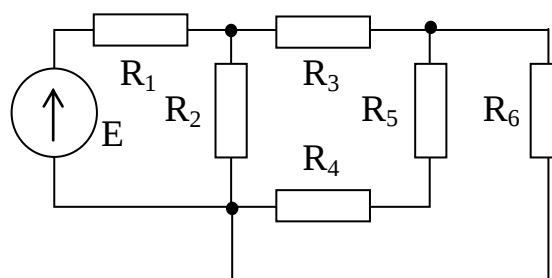
6)



7)



8)



9)

Рис. 6.1 (продолжение)

Обратная задача

Величина ЭДС источника энергии выбирают по данным табл. 6.1 по предпоследней цифре номера зачетной книжки.

Задание:

1. Составить систему уравнений по законам Кирхгофа, необходимую для определения токов во всех ветвях схемы.
2. Рассчитать токи во всех ветвях схемы методом эквивалентных преобразований.
3. Проверить выполнение баланса мощностей.

Прямая задача

Значение тока в одном из резисторов выбирают по данным табл. 6.1 по предпоследней цифре номера зачетной книжки.

Задание:

1. Рассчитать ЭДС источника и значения токов во всех ветвях схемы. Расчет выполнять с помощью законов Ома и Кирхгофа.
2. Построить потенциальную диаграмму для любого контура, содержащего источник ЭДС.

Таблица 6.1

№ вар.	К обратной задаче	К прямой задаче	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом
	E , В	I_{R_k} , А						
0	20	$I_{R_3} = 0,5$	30	20	15	50	25	25
1	25	$I_{R_2} = 1,5$	10	20	15	30	30	20
2	20	$I_{R_5} = 2,5$	20	10	30	15	45	25
3	30	$I_{R_4} = 0,2$	10	10	20	30	20	15
4	35	$I_{R_5} = 1,0$	20	20	35	10	15	15
5	45	$I_{R_6} = 2,0$	30	20	15	50	30	25
6	20	$I_{R_2} = 0,5$	10	20	15	30	40	20
7	35	$I_{R_3} = 1,5$	20	10	30	15	15	25
8	15	$I_{R_6} = 2,5$	10	10	20	30	30	15
9	25	$I_{R_4} = 0,5$	20	20	35	10	20	15

Пример расчета обратной задачи

1. Для схемы рис. 6.2 составить систему уравнений по законам Кирхгофа, необходимую для определения токов в ветвях.

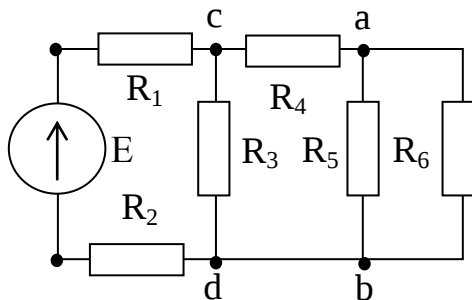


Рис. 6.2

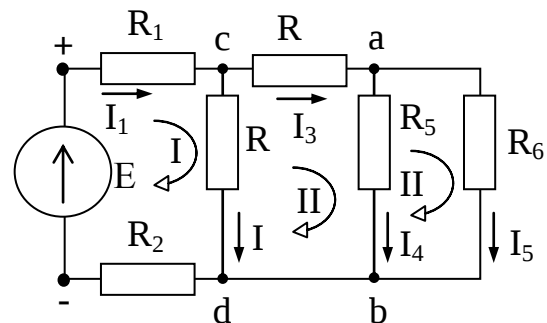


Рис. 6.3

Решение.

Покажем на схеме положительное направление токов во всех ветвях. Так как электрическая цепь имеет только один источник электрической энергии, то все токи в ветвях возникают от действия этого источника. Токи направлены от точки с самым высоким потенциалом «+» на источнике ЭДС к точке с самым низким потенциалом «-» (рис. 6.3).

Точки d и b соединены проводником, сопротивление которого равно нулю, поэтому они имеют одинаковый потенциал. Их можно объединить в один узел. Тогда схема имеет пять ветвей с неизвестными токами, три узла.

Для определения пяти неизвестных токов необходимо составить по законам Кирхгофа систему из пяти уравнений.

По первому закону Кирхгофа составим два уравнения, то есть на одно уравнение меньше, чем количество узлов в схеме:

для узла «с»: $-I_1 + I_2 + I_3 = 0$;

для узла «а»: $-I_3 + I_4 + I_5 = 0$.

Недостающие три уравнения составим по второму закону Кирхгофа. Выбираем три контура, произвольно выбранное направление обхода которых, показано на рис. 9.3:

для контура I: $R_1 I_1 + R_3 I_2 + R_2 I_1 = E$;

для контура II: $R_4 I_3 + R_5 I_4 - R_3 I_2 = 0$;

для контура III: $R_6 I_5 - R_5 I_4 = 0$.

Система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} -I_1 + I_2 + I_3 = 0; \\ -I_3 + I_4 + I_5 = 0; \\ R_1 I_1 + R_3 I_2 + R_2 I_1 = E; \\ R_4 I_3 + R_5 I_4 - R_3 I_2 = 0; \\ R_6 I_5 - R_5 I_4 = 0. \end{cases}$$

2. Рассчитать токи во всех ветвях схемы рис. 6.2 методом эквивалентных преобразований.

Величина ЭДС источника: $E = 40 \text{ В}$.

Параметры элементов схемы:

$R_1 = 2 \text{ Ом}$, $R_2 = 3 \text{ Ом}$, $R_3 = 10 \text{ Ом}$, $R_4 = 6 \text{ Ом}$, $R_5 = 8 \text{ Ом}$, $R_6 = 8 \text{ Ом}$.

Решение.

Цепь содержит один источник ЭДС. Токи в такой цепи направлены от точки с самым высоким потенциалом на источнике ЭДС «е» к точке с самым низким потенциалом «f», и мы можем сразу показать правильные положительные направления токов ветвей (рис. 6.4).

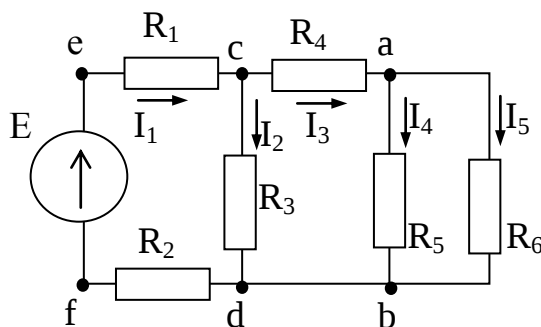


Рис. 6.4

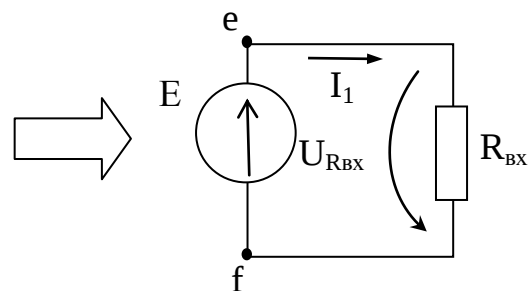


Рис. 6.5

Решение задачи будем находить методом эквивалентных преобразований. Путем последовательных преобразований определим входное сопротивление цепи относительно зажимов источника ЭДС, то есть приведем схему к виду рис. 6.5. В цепи, содержащей один источник и один приемник электрической энергии, напряжение на зажимах приемника равно ЭДС и ток, протекающий по цепи, может быть определен с помощью закона Ома:

$$I_1 = \frac{U_{R_{BX}}}{R_{BX}} = \frac{E}{R_{BX}}.$$

Рассчитаем входное сопротивление цепи относительно зажимов e-f. Пятая и четвертая ветви соединены параллельно, поэтому их эквивалентное сопротивление, найденное относительно зажимов a-b, находим:

$$R_{ab} = \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6} = \frac{8 \cdot 8}{8 + 8} = 4, \text{ Ом.}$$

Сопротивление третьей ветви и найденное сопротивление R_{ab} соединены последовательно:

$$R_{cab} = R_4 + R_{ab} = 6 + 4 = 10, \text{ Ом.}$$

Относительно зажимов c-d сопротивления второй ветви и сопротивление R_{cab} соединены параллельно:

$$R_{cd} = \frac{R_3 R_{cab}}{R_3 + R_{cab}} = \frac{10 \cdot 10}{10 + 10} = 5, \text{ Ом.}$$

Относительно зажимов источника ЭДС сопротивление R_{cd} и суммарное сопротивление первой ветви соединены последовательно, поэтому входное сопротивление находим:

$$R_{BX} = R_1 + R_{CB} + R_2 = 2 + 5 + 3 = 10, \text{ Ом.}$$

Ток ветви с источником ЭДС определяем по закону Ома:

$$I_1 = \frac{E}{R_{BX}} = \frac{40}{10} = 4, \text{ А.}$$

Ток второй ветви определим из уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа для контура, образованного первой и второй ветвями:

$$(R_1 + R_2)I_1 + R_3 I_2 = E,$$

$$\text{откуда } I_2 = \frac{E - (R_1 + R_2)I_1}{R_3} = \frac{40 - (2 + 3)4}{10} = 2, \text{ А.}$$

Ток третьей ветви найдем с помощью уравнения, составленного по первому закону Кирхгофа для узла «с»:

$$-I_1 + I_2 + I_3 = 0 \Rightarrow I_3 = I_1 - I_2 = 4 - 2 = 2, \text{ А.}$$

Для определения тока четвертой ветви составим уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, образованного второй, третьей и четвертой ветвями:

$$-R_3 I_2 + R_4 I_3 + R_5 I_4 = 0,$$

тогда ток четвертой ветви найдем как:

$$I_4 = \frac{R_3 I_2 - R_4 I_3}{R_5} = \frac{10 \cdot 2 - 6 \cdot 2}{8} = 1, \text{ А.}$$

Ток пятой ветви найдем с помощью уравнения, составленного по первому закону Кирхгофа для узла «а»:

$$-I_3 + I_4 + I_5 = 0,$$

откуда $I_5 = I_3 - I_4 = 2 - 1 = 1, \text{ A}$.

3. Проверить выполнение баланса мощностей для схемы рис. 6.2. Значение токов ветвей и параметры элементов схемы из п.2.

Решение.

Согласно закону сохранения энергии мощность, вырабатываемая источниками энергии, равна суммарной мощности приемников электрической энергии. Уравнение баланса мощностей имеет вид: $\sum_{k=1}^n P_{\text{ист}} = \sum_{k=1}^n P_{\text{пр}}$.

Мощность источника ЭДС: $P_E = EI_1 = 40 \cdot 4 = 160, \text{ Вт}$.

Сумма мощностей приемников:

$$\sum_{k=1}^n P_{\text{пр}} = I_1^2(R_1 + R_2) + I_2^2 R_3 + I_3^2 R_4 + I_4^2 R_5 + I_5^2 R_6 = \\ = 4^2 \cdot (2 + 3) + 2^2 \cdot 10 + 2^2 \cdot 6 + 1^2 \cdot 8 + 1^2 \cdot 8 = 160, \text{ Вт}.$$

Проверка: $P_E = \sum_{k=1}^n P_{\text{пр}} \Rightarrow 160 \text{ Вт} = 160 \text{ Вт}$, баланс мощностей выполняется.

Пример расчета прямой задачи

1. В схеме электрической цепи (рис. 6.6) известен ток четвертой ветви $I_4 = 0,2 \text{ A}$.

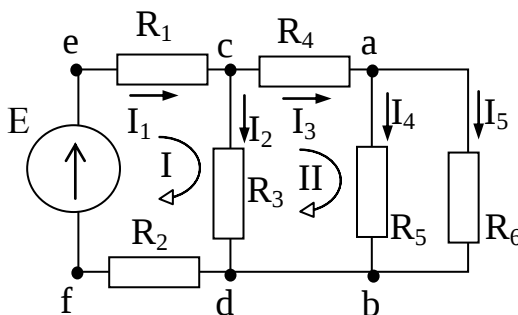


Рис. 6.6

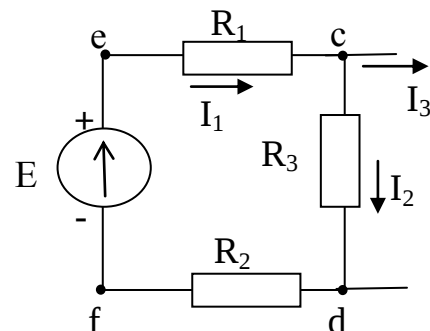


Рис. 6.7

Определить ЭДС источника питания, если сопротивления резисторов: $R_1 = 50 \text{ Ом}$, $R_2 = 80 \text{ Ом}$, $R_3 = 20 \text{ Ом}$, $R_4 = 30 \text{ Ом}$, $R_5 = 30 \text{ Ом}$, $R_6 = 60 \text{ Ом}$.

Расчет выполнять с помощью законов Ома и Кирхгофа.

Решение.

На основании закона Ома определим напряжение на зажимах четвертой ветви $U_{ab} = R_5 I_4 = 30 \cdot 0,2 = 6, \text{ В}$.

Четвертая и пятая ветви соединены параллельно, тогда ток пятой ветви определим

$$I_5 = \frac{U_{ab}}{R_6} = \frac{6}{60} = 0,1, \text{ A}.$$

Составив уравнение по первому закону Кирхгофа для узла *a*, определим ток третьей ветви

$$I_3 = I_4 + I_5 = 0,2 + 0,1 = 0,3, \text{ А.}$$

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для второго контура

$$R_4 I_3 + R_5 I_4 - R_3 I_2 = 0.$$

Откуда выразим и определим ток второй ветви

$$I_2 = \frac{R_4 I_3 + R_5 I_4}{R_3} = \frac{30 \cdot 0,3 + 30 \cdot 0,1}{20} = 0,6, \text{ А.}$$

Входной ток рассчитаем, составив уравнение по первому закону Кирхгофа для узла «с»

$$I_1 = I_2 + I_3 = 0,6 + 0,3 = 0,9, \text{ А.}$$

ЭДС источника питания определим, составив уравнение по второму закону Кирхгофа для контура e-c-d-f-e

$$E = R_1 I_1 + R_3 I_2 + R_2 I_1 = 50 \cdot 0,9 + 20 \cdot 0,6 + 80 \cdot 0,9 = 129, \text{ В.}$$

2. Для схемы рис. 6.6 построить потенциальную диаграмму для контура e-c-d-f-e, содержащего источник ЭДС.

Решение.

Примем потенциал узла «е» равным нулю $\varphi_e = 0$ (рис. 6.7). Относительно этого узла рассчитаем потенциалы остальных точек в контуре.

При расчете потенциалов необходимо помнить, что на участке цепи с резистором ток всегда протекает от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом.

Распределение потенциалов на участке с идеальным источником ЭДС не зависит от тока, а зависит только от полярности источника.

$$\varphi_e = 0, \text{ В;}$$

$$\varphi_c = \varphi_e - R_1 I_1 = 0 - 50 \cdot 0,9 = -45, \text{ В;}$$

$$\varphi_d = \varphi_c - R_3 I_2 = -45 - 20 \cdot 0,6 = -57, \text{ В;}$$

$$\varphi_f = \varphi_d - R_2 I_1 = -57 - 80 \cdot 0,9 = -129, \text{ В;}$$

$$\varphi_e = \varphi_f + E = -129 + 129 = 0, \text{ В.}$$

В прямоугольной системе координат построим потенциальную диаграмму (рис. 6.8).

По оси абсцисс в выбранном масштабе сопротивлений m_R откладываем сопротивления в том порядке, в каком они встречаются при обходе цепи. По оси ординат в выбранном масштабе для потенциалов m_φ откладываем значения рассчитанных потенциалов.

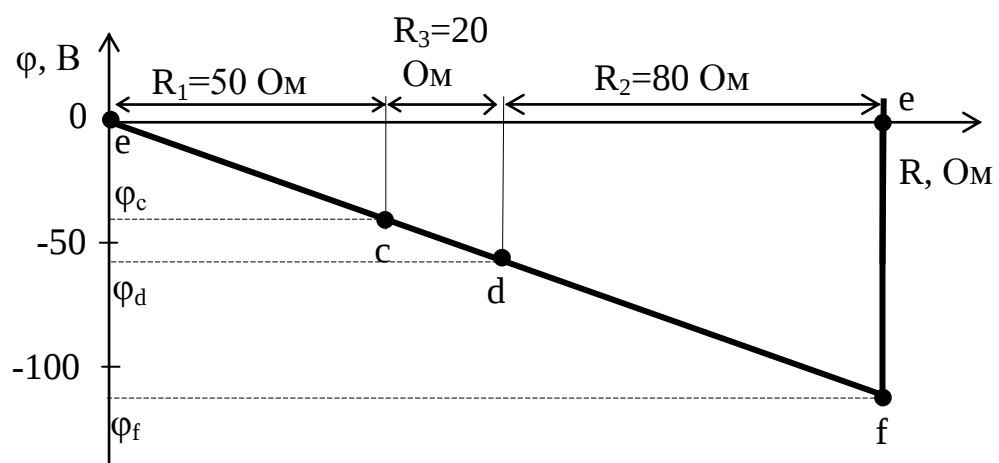


Рис. 6.8

7. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА № 2 АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

В линейных электрических цепях с активными и реактивными элементами осуществляется коммутация, производимая идеальным ключом.

Схемы электрических цепей изображены на рис. 7.1 и 7.2, параметры элементов цепей указаны в табл. 7.1.

Таблица 7.1

№ вар.	E, В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	L, мГн	C, мкФ
0	20	40	30	10	10	15
1	10	20	60	15	100	20
2	50	25	25	20	10	25
3	10	5	10	5	20	10
4	50	100	50	150	100	30
5	40	20	40	30	100	50
6	40	20	40	30	200	10
7	100	200	100	200	150	50
8	50	20	30	100	250	20
9	200	150	250	200	300	100

Номер схемы электрической цепи на рис. 7.1 и 7.2 выбирается по последней цифре номера зачетной книжки студента; параметры элементов схемы выбираются по таблице по предпоследней цифре номера зачетной книжки.

Задание:

1. Рассчитать классическим методом:

а) в схеме рис. 7.1 переходные функции напряжения и тока конденсатора;
б) в схеме рис. 7.2 переходные функции тока и напряжения индуктивной катушки.

2. В интервале времени от 0 до $5/|p|$ построить графики переходных функций тока и напряжения, рассчитанных в п.1.

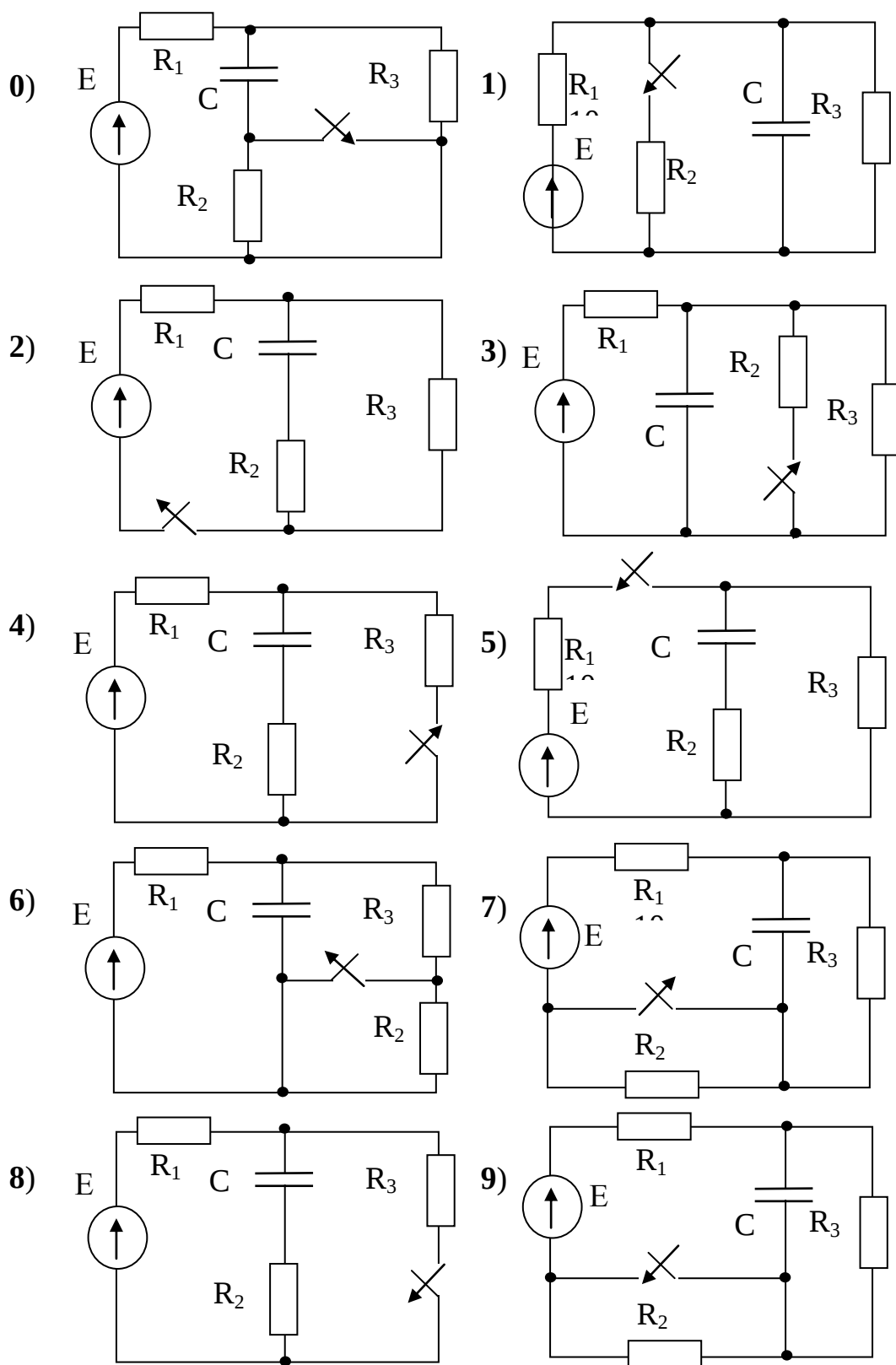


Рис. 7.1

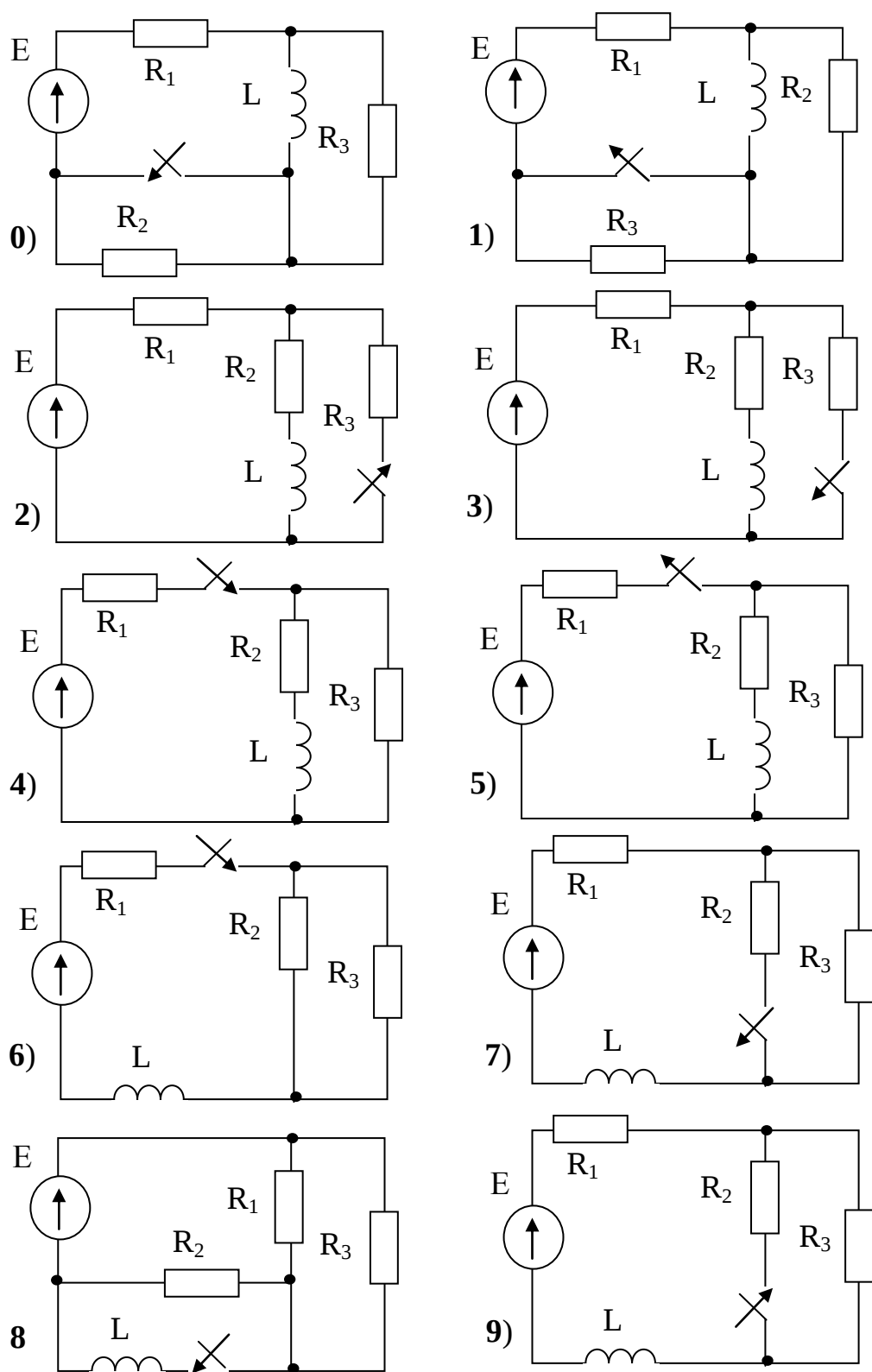


Рис. 7.2

А) Пример расчета переходного процесса в цепи с конденсатором

В цепи, схема которой приведена на рис. 7.3, происходит коммутация. Рассчитать переходные функции напряжения и тока конденсатора и построить их временные зависимости.

Исходные данные для расчета:

$E=20\text{ В}$, $R_1=R_2=R_3=10\text{ Ом}$,

$R_4=30\text{ Ом}$, $C=10\text{ мкФ}$.

Решение.

1. До коммутации цепь работает в установившемся режиме, ключ замкнут. Цепь подключена к источнику постоянной ЭДС ($E=\text{const}$), частота которой равна нулю ($\omega=0$), следовательно, емкостное сопротивление конденсатора равно бесконечности $X_C=1/(\omega C)=1/(0 \cdot C)=\infty$, поэтому в ветви с конденсатором ток отсутствует. Докоммутационная схема замещения цепи представлена на рис. 7.4.

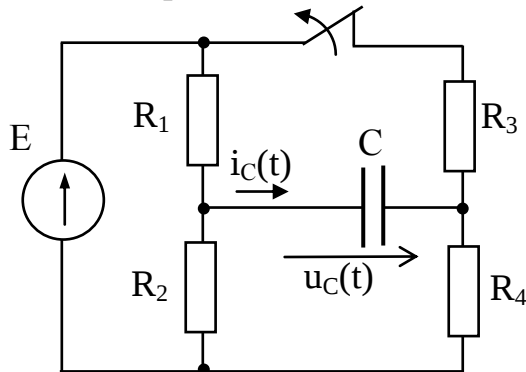


Рис. 7.3

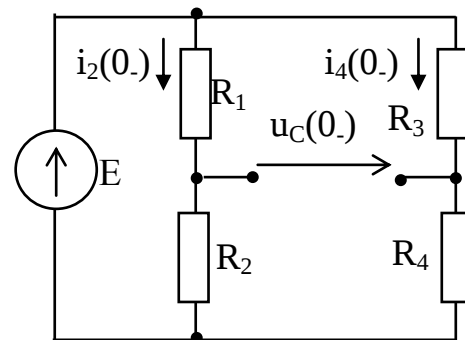


Рис. 7.4

В параллельных ветвях протекают токи:

$$i_2(0_-) = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{20}{10 + 10} = 1\text{ А}, \quad i_4(0_-) = \frac{E}{R_3 + R_4} = \frac{20}{10 + 30} = 0,5\text{ А}.$$

Напряжение конденсатора найдем по второму закону Кирхгофа

$$u_C(0_-) = R_2 i_2(0_-) - R_4 i_4(0_-) = 10 \cdot 1 - 30 \cdot 0,5 = -5, \text{ В}.$$

2. Определим независимые начальные условия.

Согласно второму закону коммутации напряжение конденсатора не может измениться мгновенно, поэтому значение этого напряжения непосредственно после коммутации будет равно его докоммутационному значению:

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = -5\text{ В}.$$

3. Определим, пользуясь алгоритмом расчета переходных процессов, функцию изменения во времени напряжения конденсатора как

$$u_C(t) = u_{C\text{св}}(t) + u_{C\text{пр}}.$$

Ток конденсатора рассчитаем по закону Ома, записанному для мгновенных значений

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}.$$

4. Принужденное значение напряжения конденсатора определим, рассчитав токи и напряжения в установившемся режиме в цепи после коммутации (рис. 7.5).

Ток в четвертом резисторе отсутствует и в цепи протекает только ток

$$i_{2ПР} = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{20}{20} = 1, \text{ А},$$

тогда напряжение конденсатора

$$u_{СПР} = R_2 i_{2ПР} = 10 \cdot 1 = 10 \text{ В}.$$

5. Составим *характеристическое уравнение*. На рис. 7.6, а представлена пассивная часть схемы после коммутации.

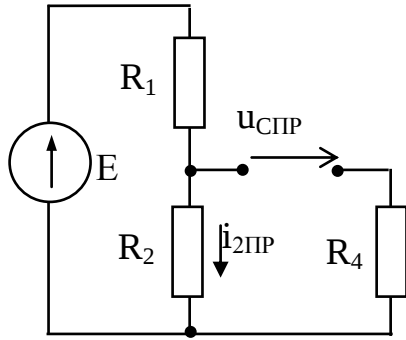
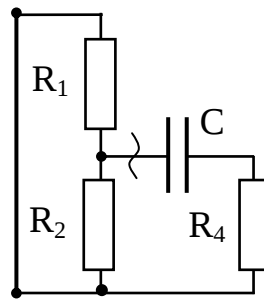
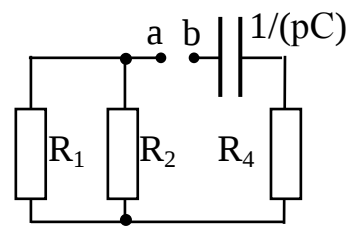


Рис. 7.5



а)



б)

Рис. 7.6

В рассматриваемой цепи источник ЭДС заменен короткозамкнутым участком, входное сопротивление находим относительно любых разомкнутых зажимов. На рис. 7.6, б конденсатор заменен операторным сопротивлением $1/(pC)$. Характеристическое уравнение получаем, приравнявая выражение для входного сопротивления относительно разомкнутых зажимов аб к нулю и находим его корень:

$$Z_{ab}(p) = \frac{1}{pC} + R_4 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 0.$$

$$p = -\frac{1}{C(R_4 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2})} = -\frac{10^5}{30 + 5} = -2857, \text{ с}^{-1}.$$

6. Так как характеристическое уравнение имеет один корень, свободная составляющая напряжения имеет вид:

$$u_{Ссв}(t) = B e^{-2857t}.$$

Искомая функция напряжения:

$$u_C(t) = u_{Ссв}(t) + u_{СПР} = B e^{-2857t} + 10, \text{ В}.$$

6. Определим *постоянную интегрирования* В.

Для этого, рассмотрим искомую функцию напряжения в момент времени $t=0_+$: $u_C(0_+) = B + 10$.

Начальное значение напряжения конденсатора

$$u_C(0_+) = -5 \text{ В}.$$

Получим уравнение

$$B + 10 = -5 \Rightarrow B = -15 \text{ В.}$$

7. Искомая переходная функция напряжения

$$u_C(t) = -15e^{-2857t} + 10, \text{ В.}$$

Определим переходную функцию тока в ветви с конденсатором с помощью закона Ома:

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} = \frac{d(-15e^{-2857t} + 10)}{dt} = 10 \cdot 10^{-6} (-15)(-2857)e^{-2857t} = 0,428e^{-2857t}, \text{ А.}$$

8. Графики временных зависимостей переходных функций напряжения и тока конденсатора представлены на рис. 7.7.

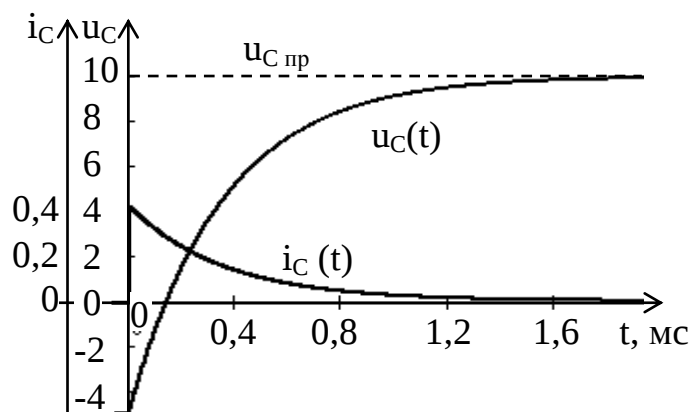


Рис. 7.7

Б) Пример расчета переходного процесса в цепи с катушкой индуктивности

В цепи, схема которой приведена на рис. 7.8, происходит коммутация. Рассчитать переходные функции напряжения и тока индуктивной катушки и построить их временные зависимости. Расчет выполнить классическим методом.

Исходные данные для расчета:

$$E = 30 \text{ В, } R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ Ом, } L = 1 \text{ мГн.}$$

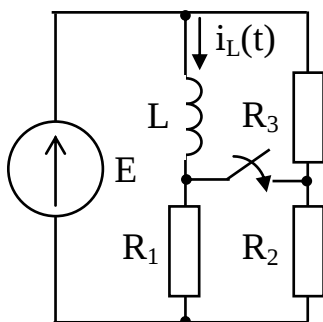


Рис. 7.8

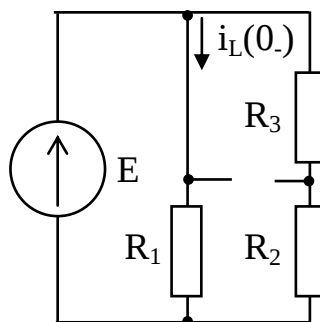


Рис. 7.9

Решение.

1. Учитывая, что в цепи постоянного тока в установившемся режиме идеальная индуктивная катушка представляет собой участок с сопротивлением равным нулю, легко рассчитать ток катушки в схеме до коммутации (рис. 7.9):

$$i_L(0-) = \frac{E}{R_1} = \frac{30}{10} = 3, \text{ A.}$$

2. Определим *независимые начальные условия*. Согласно первому закону коммутации ток индуктивной катушки в момент коммутации не может измениться мгновенно и в первый момент остается равным докоммутационному значению:

$$i_L(0_+) = i_L(0_-) = 3 \text{ A.}$$

3. Определение переходных функций начнем с нахождения тока индуктивной катушки, как суммы свободной и принужденной составляющих

$$i_L(t) = i_{L\text{св}}(t) + i_{L\text{пр}}.$$

Напряжение на зажимах катушки найдем с помощью закона Ома для мгновенных значений

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}.$$

4. *Принужденное значение* тока катушки рассчитаем в установившемся режиме цепи после коммутации (рис. 7.10). Так как индуктивная катушка представляет собой короткозамкнутый участок цепи, то ток в резисторе R_3 отсутствует, а ток катушки определим, как:

$$i_{L\text{пр}} = \frac{E}{R_1 R_2 / (R_1 + R_2)} = \frac{30}{5} = 6, \text{ A.}$$

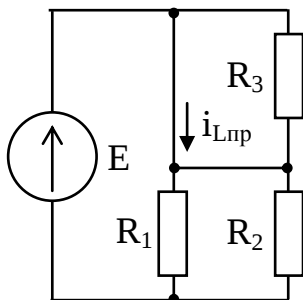
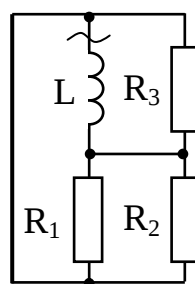
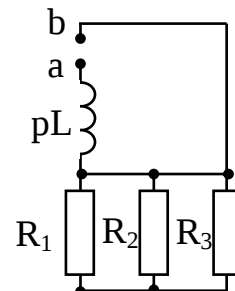


Рис. 7.10



а)



б)

Рис. 7.11

5. Составим *характеристическое уравнение* путем определения входного сопротивления $Z(p)$ пассивной части цепи после коммутации (рис. 7.11, а).

В рассматриваемой цепи источник напряжения заменяется короткозамкнутым участком, а индуктивная катушка операторным сопротивлением pL . Находим входное сопротивление относительно разомкнутых входных зажимов цепи ab (рис. 7.11, б):

$$Z(p) = pL + \frac{R_1 R_2 R_3}{R_1 R_2 + R_2 R_3 + R_1 R_3} = 1 \cdot 10^{-3} p + \frac{10 \cdot 10 \cdot 10}{10 \cdot 10 + 10 \cdot 10 + 10 \cdot 10} = 10^{-3} p + \frac{1000}{300} = 0.$$

Характеристическое уравнение имеет вид

$$10^{-3} p + 3,333 = 0 \Rightarrow p = -3333 \text{ c}^{-1}.$$

6. Так как уравнение имеет один корень, то свободную составляющую тока катушки запишем, как

$$i_{L_{CB}}(t) = Ae^{pt} = Ae^{-3333t}.$$

Искомая функция тока

$$i_L(t) = i_{L_{CB}}(t) + i_{L_{пр}} = Ae^{-3333t} + 6.$$

Для нахождения *постоянной интегрирования* A рассмотрим искомую функцию тока в момент времени $t=0_+$:

$$i_L(0_+) = A + 6.$$

Согласно первому закону коммутации $i_L(0_+) = 3$ А, то получим уравнение $A + 6 = 3 \Rightarrow A = -3$ (А).

7. Переходная функция тока катушки

$$i_L(t) = -3e^{-3333t} + 6, \text{ А.}$$

Напряжение индуктивной катушки:

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = 10^{-3} \frac{d(-3e^{-3333t} + 6)}{dt} = 10^{-3}(-3)(-3333)e^{-3333t} = 10e^{-3333t}, \text{ В.}$$

8. Графики временных зависимостей переходных функций напряжения и тока катушки представлены на рис. 7.12.

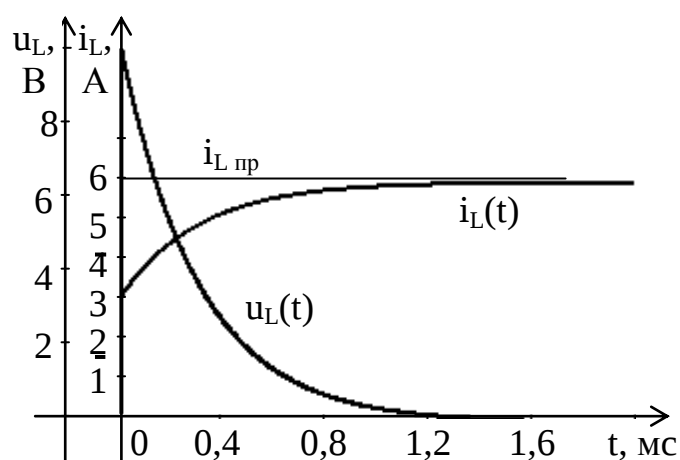


Рис. 7.12

Раздел III. КУРСОВАЯ РАБОТА

Требования к оформлению курсовой работы

1. Курсовую работу выполняют на одной стороне листа белой бумаги формата А4, соблюдая следующие размеры полей: верхнее – 20 мм, нижнее – 10 мм, левое - 20 мм; правое - 10 мм.

Текст набирают в редакторе Microsoft Word шрифтом Times New Roman, кегль 14, черного цвета с межстрочным интервалом 1 и абзацным отступом первой строки 1,25 см. Текст необходимо отформатировать по ширине страницы.

2. Работа должна быть сброшюрована, страницы пронумерованы арабскими цифрами в центре нижней части страницы, нумерация сквозная по всему документу.

3. Текст курсовой работы содержит следующие структурные элементы:

- титульный лист;
- задание на курсовую работу (не обязательно);
- содержание;
- введение;
- основная часть;
- заключение;
- библиографический список;
- приложения.

Каждый структурный элемент начинают с новой страницы. Страница должна быть заполнена не менее чем на третью часть.

Заголовки структурных элементов печатают прописными буквами, располагают по центру строки без точки в конце. Расстояние между заголовками и текстом равно одной строке.

4. Титульный лист является первой страницей курсовой работы, но на нем номер страницы не указывается. Пример оформления титульного листа приведен в приложении. Форму титульного листа заполняют на компьютере или от руки четким почерком пастой только одного цвета (фиолетового или синего).

В строке «Профиль» указывается профиль подготовки («Электропривод и автоматика» или «Электроснабжение»).

В строке «Курсовая работа защищена» после защиты работы будет проставлена дата защиты, подпись преподавателя, в строке «Оценка» - оценка.

5. Форму задания на курсовую работу заполняют на компьютере или от руки четким почерком пастой только одного цвета (фиолетового или синего).

В начале задания записывают данные для расчета, приводят чертеж исходной схемы.

7. Содержание включает все структурные элементы курсовой работы с указанием номеров страниц, с которых они начинаются.

8. Введение не нумеруют как раздел. Во введении обозначается техническая проблема, ее место и значение для соответствующей области практики, ее актуальность, обосновывается методика решения.

9. Основную часть делят на разделы, подразделы и пункты. Разделы и подразделы имеют заголовки и соответствующую нумерацию.

В начале основной части работы приводят чертеж схемы согласно варианту с указанием направлений токов и напряжений, приводят топологический анализ схемы исследуемой цепи.

Выполнение расчетов начинают со следующего листа. Все вычисления и преобразования сопровождают пояснениями. Единицы измерений должны соответствовать системе СИ.

10. Заключение должно содержать обобщения и краткие выводы по выполнению работы. Заключение не нумеруется как раздел.

11. Библиографический список должен содержать сведения об источниках, использованных при выполнении курсовой работы.

12. Приложения являются продолжением курсовой работы.

13. В конце работы необходима подпись студента и дата выполнения задания.

Иллюстрации (схемы, графики, диаграммы, таблицы) выполняют карандашом с помощью чертежных инструментов или на компьютере по Госстандарту.

1) Иллюстрации располагают непосредственно после текста, в котором они упоминаются впервые или выносят в приложения. На все приложения в тексте дают ссылки.

Иллюстрации нумеруют арабскими цифрами сквозной нумерацией или по разделам.

Например, Рис. 1. Название рисунка
или

Рис. 1.1. Название рисунка.

2) Номер таблицы и её название располагают над таблицей.

Например,

Таблица 1 - Название таблицы

3) При построении диаграмм вычисляют масштабы, например, напряжений, токов и т.д. Полученные результаты округляют до значений $1 \cdot 10^n$, $2 \cdot 10^n$ или $5 \cdot 10^n$, где n – любое целое положительное или отрицательное число или ноль.

По осям графиков следует наносить деления с числовыми обозначениями физических величин. В конце оси через запятую указывается размерность.

4) Математические формулы и уравнения набирают в редакторе формул. Их следует выделять в отдельную строку и располагать по центру строки.

Формулы и уравнения записывают в общем виде и затем производят подстановку числовых значений, приводят промежуточные расчеты, далее указывают результат вычисления и единицу измерения, которая проставляется без скобок. При многократном вычислении по одной формуле приводят только пример единичного расчёта.

8. Задание на курсовую работу по теме «Расчет и измерения электрических величин в линейных электрических цепях синусоидального тока»

ЧАСТЬ 1. РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Дана схема электрической цепи однофазного синусоидального тока, содержащая источник ЭДС, резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы.

Номер схемы выбирается на рис. 8.1 по последней цифре номера зачетной книжки студента.

ЭДС источника изменяется во времени по синусоидальному закону:

$$e(t) = E_m \sin(314t + \Psi_e).$$

Параметры R , L , C элементов схемы, амплитуда E_m и начальная фаза Ψ_e источника ЭДС выбираются по данным табл. 8.1 по предпоследней цифре номера зачетной книжки.

Таблица 8.1

№ варианта	R_1 , Ом	R_2 , Ом	L_1 , Гн	L_2 , Гн	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ	E_m , В	Ψ_e , град.
0	80	160	0,5	1,1	10	30	141,4	-30°
1	100	150	0,8	0,6	20	10	70,7	150°
2	50	60	0,3	1,2	30	20	84,85	45°
3	60	180	0,25	0,9	10	40	282,8	120°
4	145	100	0,45	0,85	20	20	212,13	-45°
5	80	280	0,5	0,8	30	15	141,4	-120°
6	45	60	0,6	1,2	10	25	42,43	-150°
7	60	70	0,35	1,1	20	30	84,85	-60°
8	90	250	0,8	0,2	30	10	14,14	60°
9	100	60	0,35	0,55	40	20	70,7	30°

1. На основании законов Кирхгофа записать систему уравнений для расчета токов во всех ветвях схемы в двух формах: а) дифференциальной; б) символической.

2. Рассчитать комплексные действующие значения токов во всех ветвях схемы и напряжения на всех её элементах.

3. Построить векторную диаграмму токов и напряжений исследуемой цепи. На диаграмме проверить соблюдение законов Кирхгофа.

4. Изобразить расчетную электрическую схему, содержащую приборы, предназначенные для измерения тока, напряжения, мощности или угла сдвига фаз между током ветви и напряжением на ее пассивной части.

Измеряемые электрические величины указаны в табл. 8.2 согласно варианту. Индекс тока, напряжения и угла сдвига фаз указывает на порядковый номер ветви, а индекс мощности – на порядковый номер резистора.

Таблица 8.2

№ варианта	Измеряемые величины			
	I	U	P	φ
0	I_2	-	-	φ_3
1	I_2	-	P_2	-
2	-	U_1	-	φ_1
3	I_1	-	-	φ_2
4	-	U_3	P_2	-
5	I_1	-	-	φ_1
6	I_1	-	P_1	-
7	I_2	-	P_2	-
8	-	U_2	-	φ_1
9	-	U_3	P_2	-

Выбранные измерительные приборы должны быть электромагнитной и электродинамической систем, соответствовать роду тока и пределу измерения.

5. Рассчитать активную, реактивную и полную мощности приемников и источника электрической энергии цепи. Проверить выполнение баланса мощностей. Определить коэффициент мощности нагрузки.

6. Записать мгновенные значения тока и напряжения на зажимах ветви, в которой выполняются измерения электрических величин. Построить в одних осях координат временные диаграммы этих функций. На диаграммах показать амплитудные значения тока и напряжения, их начальные фазы и угол сдвига фаз между напряжением и током в ветви. Записать закон изменения во времени ЭДС источника питания.

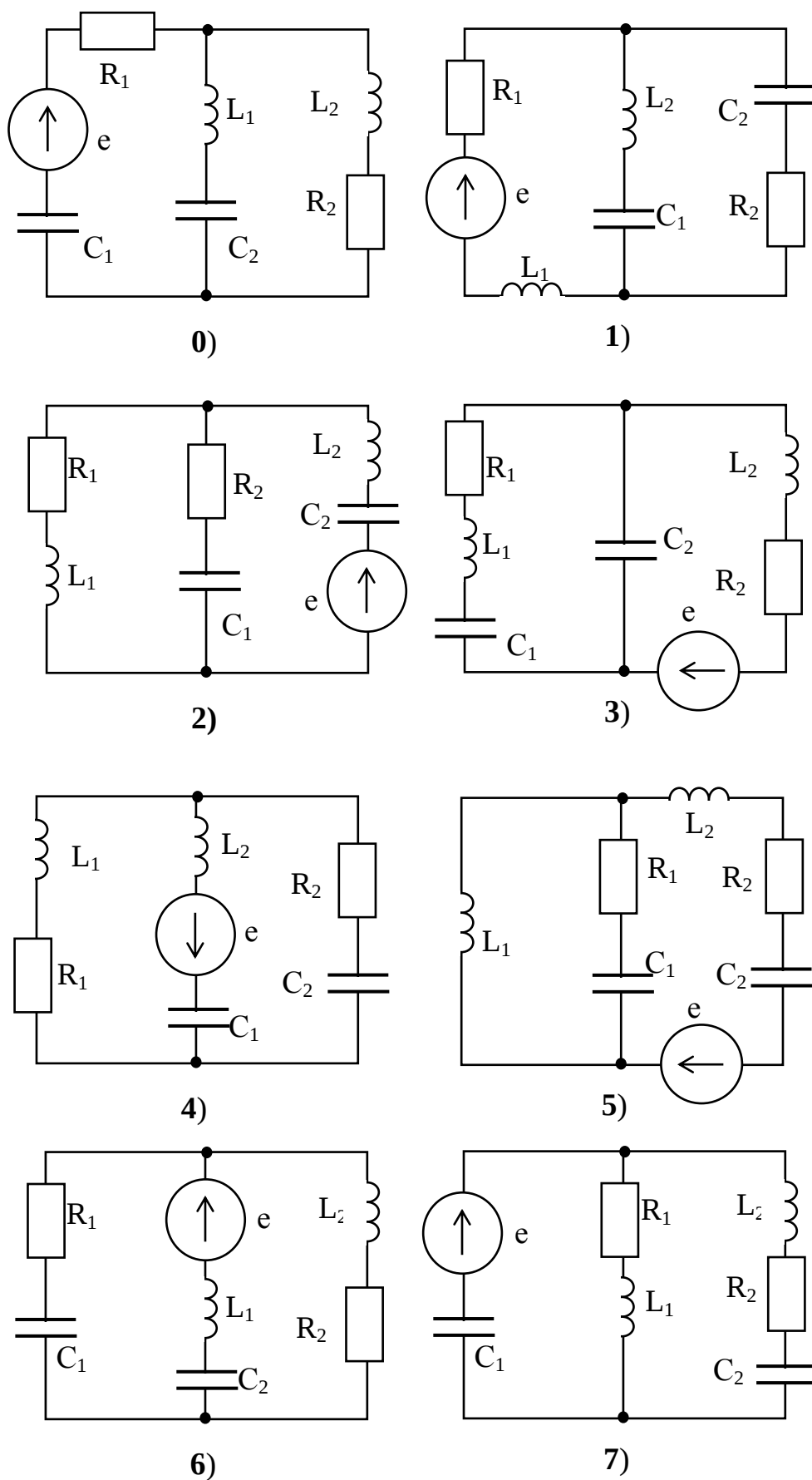


Рис. 8.1

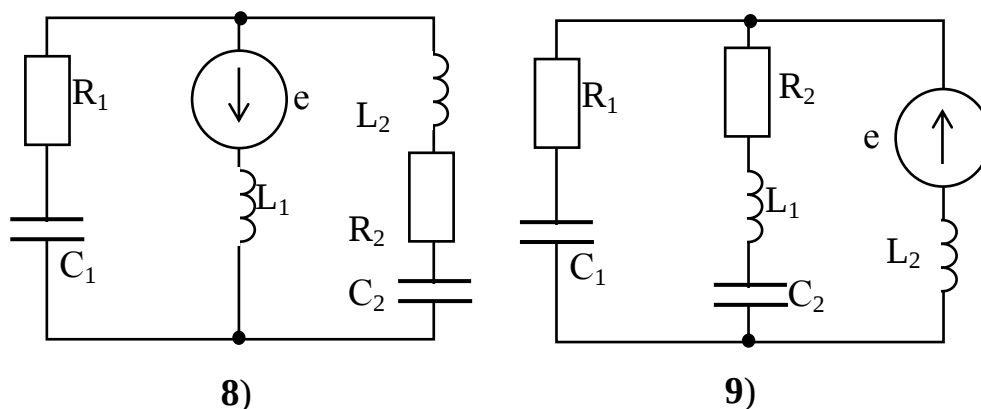


Рис. 8.1 (продолжение)

ЧАСТЬ 2. РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

К трехфазному трансформатору, фазы вторичной обмотки которого соединены звездой, подключена нагрузка в виде трехфазного симметричного приемника и трех однофазных приемников, схемы соединения фаз которых показаны на рис. 8.2.

ЭДС вторичных обмоток трансформатора, параметры фаз приемников и несимметричный режим работы заданы в табл. 8.3.

Номер схемы выбирается на рис. 8.2 по последней цифре номера зачетной книжки студента; ЭДС, параметры фаз приемников и несимметричный режим работы выбираются по данным табл. 8.3 согласно варианту по предпоследней цифре номера зачетной книжки.

1. Рассчитать фазные и линейные токи и напряжения полнофазного режима цепи. Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов.

2. Рассчитать фазные и линейные токи и напряжения неполнофазного режима цепи (режим короткого замыкания, обрыв линейного провода, обрыв фазы)). Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов.

Внимание! Если неполнофазный режим обусловлен коротким замыканием в одной из фаз, то нейтральный провод отключается.

3. Вычислить активную, реактивную и полную мощности полнофазного режима работы трехфазной цепи. Проверить выполнение баланса мощностей.

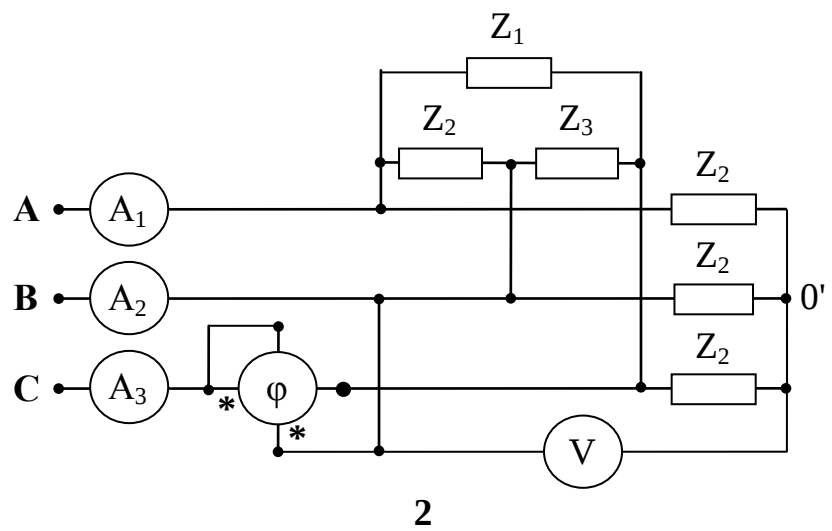
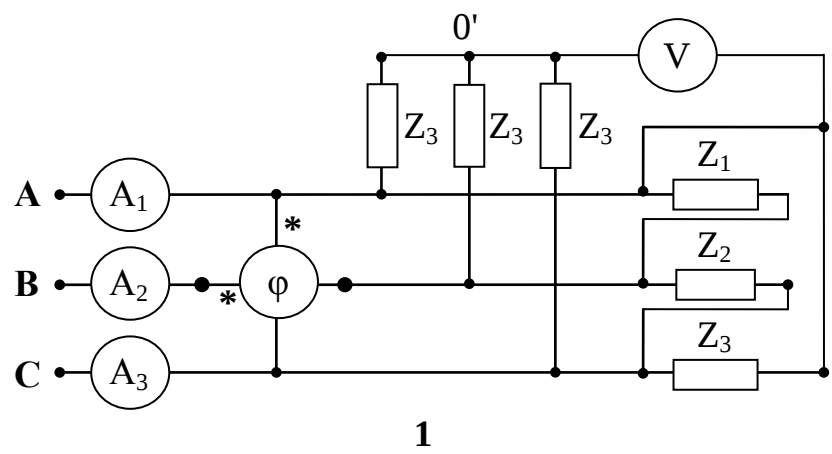
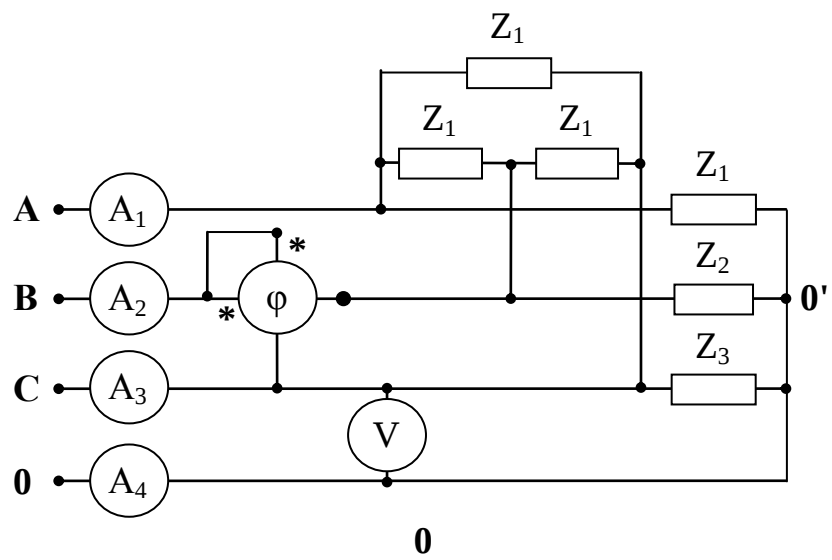


Рис. 8.2

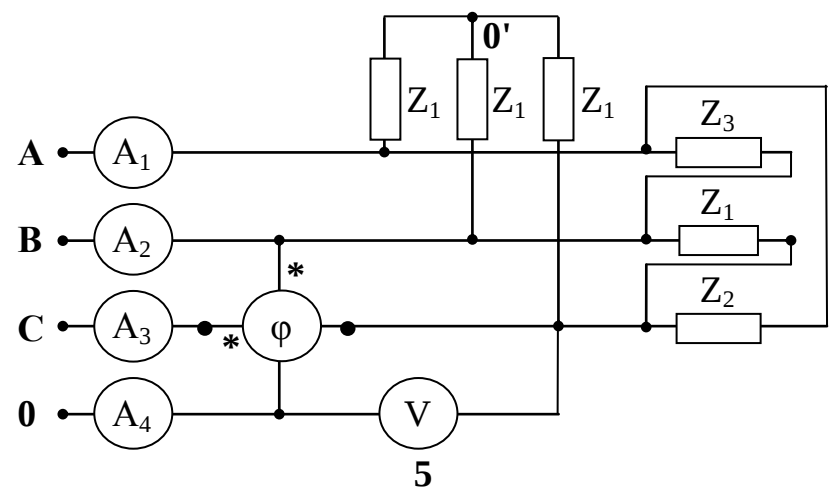
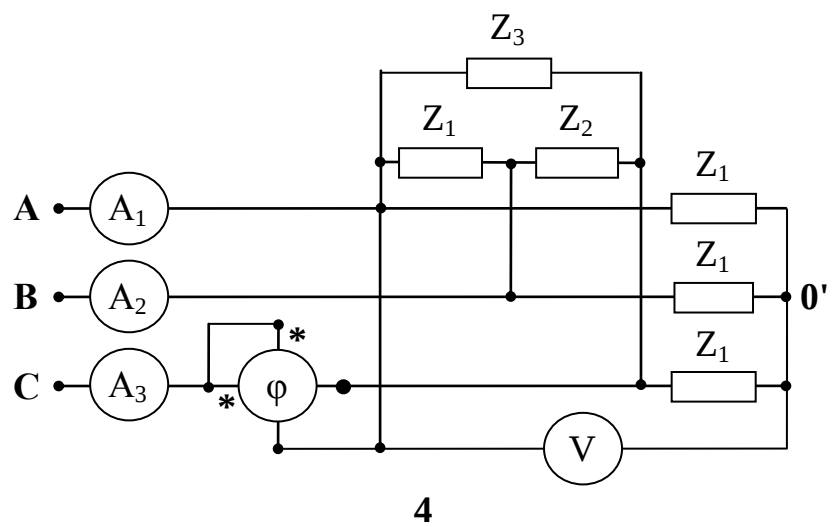
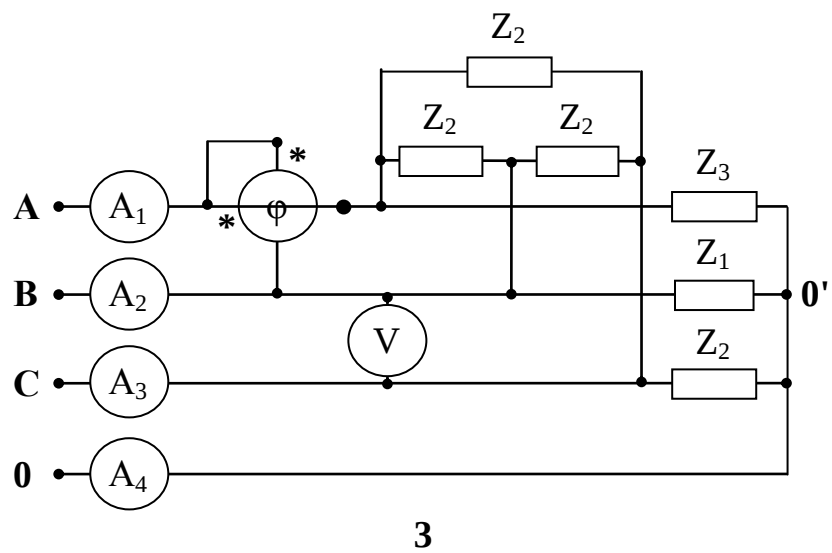


Рис. 8.2 (продолжение)

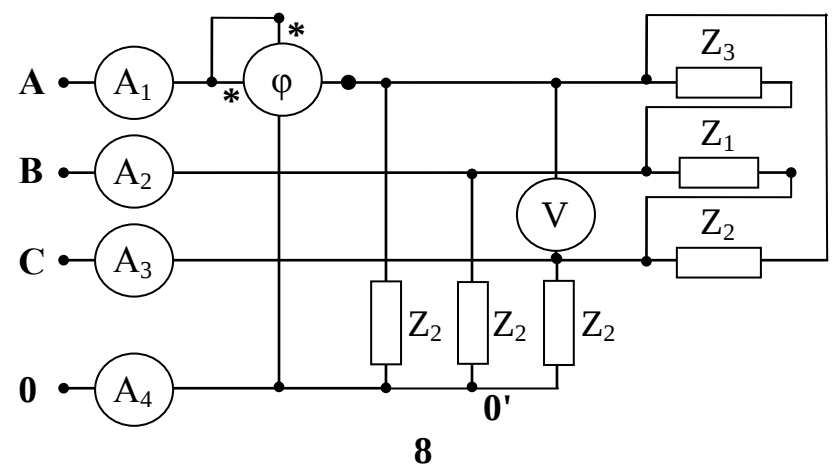
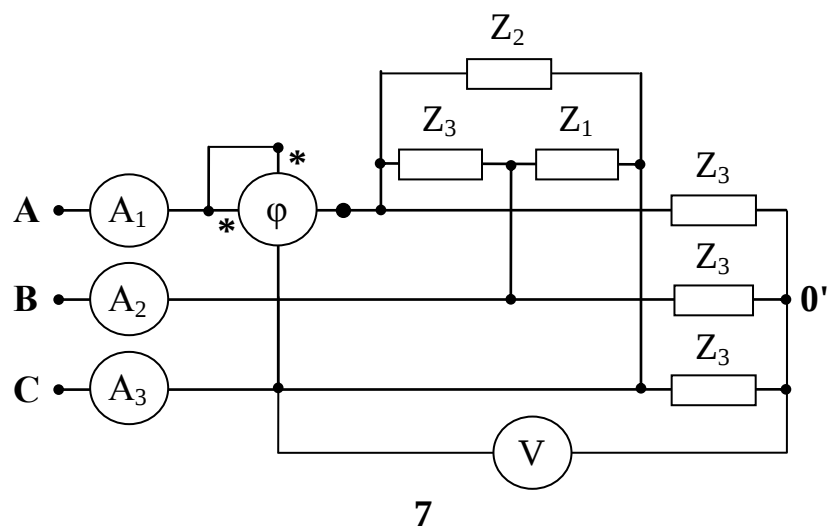
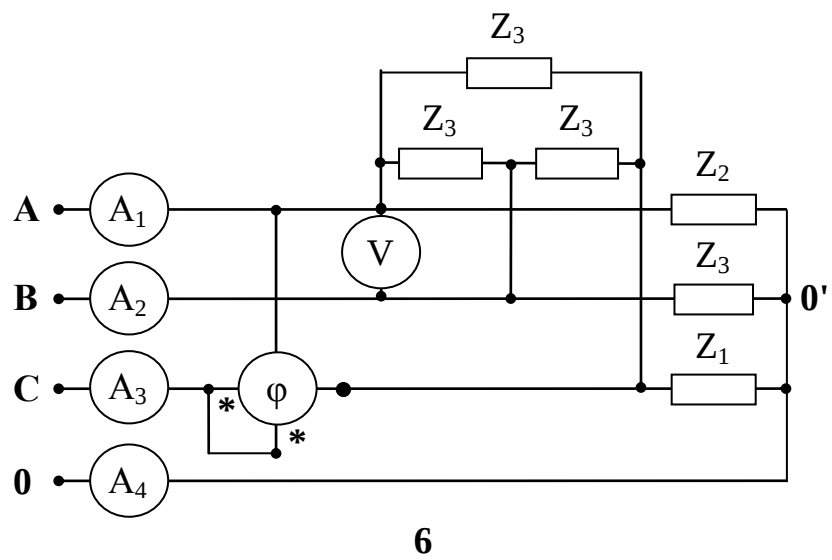


Рис. 8.2 (продолжение)

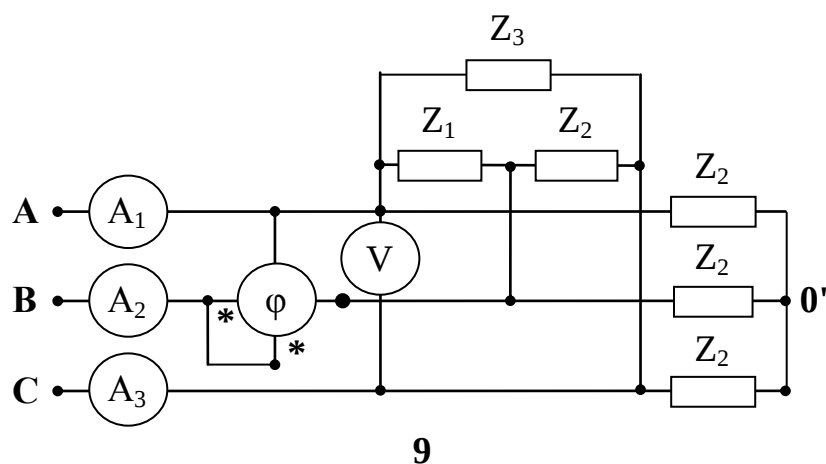


Рис. 8.2 (окончание)

Таблица 8.3

№ вари- анта	E, В	Параметры приемников									Причина несимметрии
		Z ₁			Z ₂			Z ₃			
		R ₁ , Ом	X _{L1} Ом	X _{C1} , Ом	R ₂ , Ом	X _{L2} , Ом	X _{C2} , Ом	R ₃ , Ом	X _{L3} , Ом	X _{C3} , Ом	
0	127	3	-	4	-	7	5	2	2	-	Z _{c1} =0
1	220	5	5	-	3	-	4	-	8	19	обрыв с1
2	380	6	-	8	-	12	2	7	3	-	Z _{a1} =0
3	220	4	-	4	-	3	9	2	4	-	обрыв а2
4	127	-	3	4	3	4	-	2	-	6	Z _{c2} =∞
5	380	6	-	-	4	2	6	-	10	4	Z _{b1} =∞
6	220	-	6	8	2	-	2	6	5	-	обрыв с2
7	127	6	-	8	3	3	-	-	7	2	обрыв b1
8	220	-	11	-	4	-	4	4	4	-	Z _{b2} =0
9	220	4	1	5	-	-	6	3	4	-	Z _{a2} =∞

Методические указания

1) При расчете схем замещения расчетной цепи необходимо учесть следующее:

- индуктивностью обмотки трансформатора можно пренебречь, активное сопротивление обмотки можно не учитывать;
- сопротивления проводников равны нулю, поэтому проводник соединяет точки с одинаковым потенциалом;
- обмотки амперметров и токовые обмотки ваттметров имеют бесконечно малые сопротивления;
- внутреннее сопротивление вольтметра и сопротивление обмотки напряжения ваттметра обладают бесконечно большим сопротивлением.

2) При работе с таблицей следует обратить внимание на то, что если в таблице вместо сопротивления элемента стоит прочерк, это означает отсутствие элемента в схеме.

3) В последней колонке таблицы:

- запись «обрыв a_1 » означает обрыв линейного провода, подключаемого к фазе «а» приемника Z_1 схемы рис. 17.1;

- обозначение $Z_{c1}=\infty$ и $Z_{c1}=0$ соответствуют обрыву или короткому замыканию фазы «с» приемника Z_1 схемы рис. 17.1.

4) При расчете трехфазной электрической цепи рекомендуется оперировать с комплексными действующими значениями;

5) При расчете токов рекомендуется придерживаться следующего алгоритма расчета: сначала необходимо определить токи в фазах нагрузки, затем - токи в линейных проводах, соединяющих приемник с трехфазной сетью, затем токи в линейных проводах сети можно вычислить по первому закону Кирхгофа.

9. Примеры выполнения курсовой работы

Часть 1. РАСЧЕТ И ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Дана электрическая цепь, схема которой приведена на рис. 9.1.

Параметры элементов цепи: $R_1 = 50 \text{ Ом}$, $R_2 = 100 \text{ Ом}$, $\omega L_1 = 200 \text{ Ом}$, $\omega L_2 = 50 \text{ Ом}$, $1/(\omega C_1) = 100 \text{ Ом}$, $1/(\omega C_2) = 150 \text{ Ом}$.

1. Для электрической цепи (рис. 9.1) составить на основе законов Кирхгофа систему уравнений для расчета токов в ветвях схемы в дифференциальной и символической формах.

Решение.

Так как схема содержит один источник электрической энергии, положительные направления токов в ветвях показываем согласно направлению ЭДС. Направления обхода контуров выбираем произвольно.

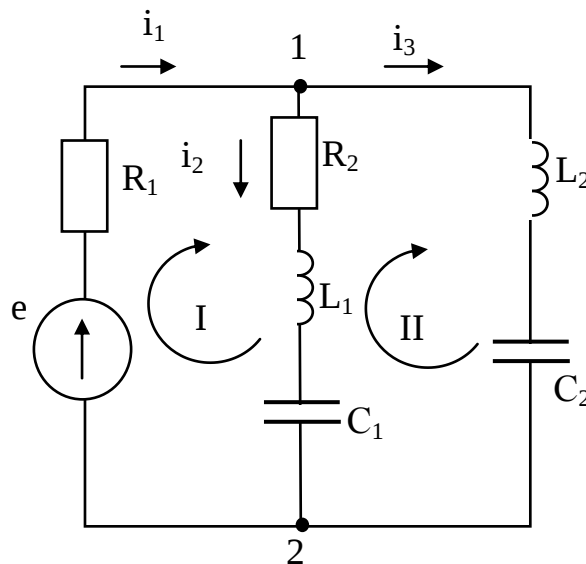


Рис. 9.1

Число уравнений, составляемых по законам Кирхгофа, должно соответствовать количеству неизвестных токов. Рассматриваемая цепь имеет три ветви с неизвестными токами, поэтому система уравнений состоит из трех уравнений.

ЭДС источника питания $e(t) = E_m \sin(\omega t + \psi_e)$.

По первому закону Кирхгофа составляется на одно уравнение меньше, чем количество узлов в цепи. Цепь имеет два узла, поэтому по первому закону Кирхгофа составляем одно уравнение. Недостающие два уравнения составляем по второму закону Кирхгофа для двух независимых контуров, направление обхода которых показано на рис. 9.1.

Связь между мгновенными значениями токов и напряжений на элементах цепи:

для резистора $u_R(t) = Ri(t)$;

для катушки индуктивности $u_L(t) = L \frac{di(t)}{dt}$;

для конденсатора $u_C(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt$.

С учетом этого запишем систему уравнений в *дифференциальной форме записи*:

$$\begin{cases} i_1 - i_2 - i_3 = 0 & (\text{узел } 1), \\ R_1 i_1 + L_1 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + \frac{1}{C_1} \int i_2 dt = e(t) & (\text{контур } I), \\ \frac{1}{C_2} \int i_3 dt + L_2 \frac{di_3}{dt} - \frac{1}{C_1} \int i_2 dt - R_2 i_2 - L_1 \frac{di_2}{dt} = 0 & (\text{контур } II). \end{cases}$$

Запишем систему уравнений в символической форме записи. Для этого от функций времени перейдем к изображению синусоидальных функций времени комплексными числами. Соответственно дифференциальные и интегральные зависимости между напряжениями и токами в цепях синусоидального тока, мы заменяем линейными зависимостями между комплексными токами и напряжениями:

$$e(\omega t) = E_m \sin(\omega t + \psi) \quad \Rightarrow \quad \dot{E} = E e^{j\psi}$$

$$i(\omega t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i) \quad \Rightarrow \quad \dot{I} = I e^{j\psi_i}$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} \quad \Rightarrow \quad \dot{U}_L = j\omega L \dot{I}$$

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt \quad \Rightarrow \quad \dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I}$$

$$u_R = Ri \quad \Rightarrow \quad \dot{U}_R = R \dot{I}$$

На схеме (рис. 9.2) покажем положительные направления комплексных токов и обозначим комплексные сопротивления всех элементов.

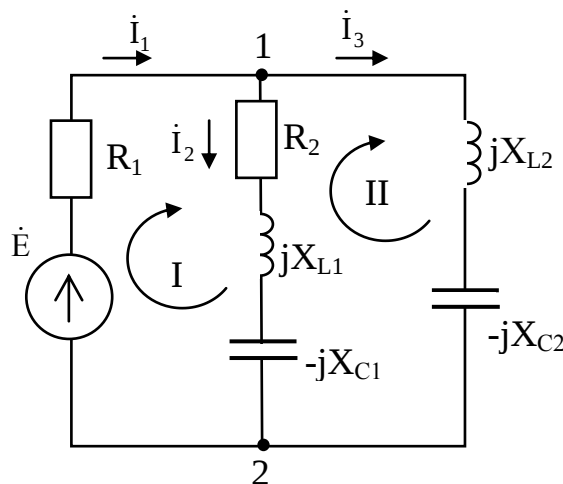


Рис. 9.2

Система уравнений, записанная для схемы (рис. 9.2) по законам Кирхгофа будет иметь вид:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0; \\ R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_2 + R_2 \dot{I}_2 + (-j/\omega C_1) \dot{I}_2 = \dot{E}; \\ (-j/\omega C_2) \dot{I}_3 + j\omega L_2 \dot{I}_3 - (-j/\omega C_1) \dot{I}_2 - R_2 \dot{I}_2 - j\omega L_1 \dot{I}_2 = 0. \end{cases}$$

2. Рассчитать токи в ветвях цепи, схема которой представлена на рис. 9.2.

Решение.

Расчет цепи будем выполнять в комплексной форме записи, для чего перейдем от мгновенного значения ЭДС к комплексному:

$$e(t) = 50 \sin(\omega t), \text{ В} \Rightarrow \dot{E} = \frac{70,5}{\sqrt{2}} e^{j0^\circ} = 50 e^{j0^\circ}, \text{ В.}$$

Определим комплексные сопротивления ветвей:

$$Z_1 = R_1 = 50, \text{ Ом};$$

$$Z_2 = R_2 + jX_{L1} - jX_{C1} = 100 + j200 - j100 = 100\sqrt{2}e^{j45^\circ}, \text{ Ом};$$

$$Z_3 = jX_{L2} - jX_{C2} = j50 - j150 = 100e^{-j90^\circ}, \text{ Ом.}$$

Для того чтобы по закону Ома определить ток на входе цепи, необходимо рассчитать эквивалентное комплексное сопротивление цепи относительно зажимов источника ЭДС.

Сопротивления второй и третьей ветвей соединены параллельно, поэтому их эквивалентное сопротивление относительно узлов 1-2 можно рассчитать:

$$Z_{23} = \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3} = \frac{100\sqrt{2}e^{j45^\circ} \cdot 100e^{-j90^\circ}}{100 + j100 - j100} = \frac{10000\sqrt{2}e^{-j45^\circ}}{100} = 100\sqrt{2}e^{-j45^\circ} = 100 - j100, \text{ Ом.}$$

Относительно входных зажимов источника ЭДС сопротивление первой ветви и сопротивление Z_{23} соединены последовательно, поэтому входное сопротивление всей цепи можно определить как сумму комплексных сопротивлений:

$$Z = Z_1 + Z_{23} = 50 + 100 - j100 = 150 - j100 = \sqrt{150^2 + 100^2} e^{\text{jarctg} \frac{-100}{150}} = 180,28 e^{-j33,7^\circ}, \text{ Ом.}$$

Ток ветви с источником ЭДС

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}}{Z} = \frac{50e^{j0^\circ}}{180,28e^{-j33,7^\circ}} = 0,277e^{j33,7^\circ} = 0,23 + j0,154, \text{ А.}$$

Напряжение на зажимах параллельных ветвей:

$$\dot{U}_{12} = Z_{23} \dot{I}_1 = 100\sqrt{2}e^{-j45^\circ} \cdot 0,277e^{j33,7^\circ} = 39,1e^{-j11,3^\circ}, \text{ В.}$$

Зная напряжения параллельных ветвей, можно определить токи в этих ветвях по закону Ома

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_{12}}{Z_2} = \frac{39,1e^{-j11,3^\circ}}{141e^{j45^\circ}} = 0,277e^{-j56,3^\circ} = 0,154 - j0,23, \text{ А};$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{12}}{Z_3} = \frac{39,1e^{-j11,3^\circ}}{100e^{-j90^\circ}} = 0,391e^{j78,7^\circ} = 0,076 + j0,384, \text{ А.}$$

3. Построить векторную диаграмму токов и напряжений на всех элементах цепи, схема которой приведена на рис. 16.3.

Решение.

Для построения векторной диаграммы рассчитаем напряжения на всех элементах цепи:

$$\dot{U}_{R1} = R_1 \dot{I}_1 = 50 \cdot 0,277e^{j33,7^\circ} = 13,85e^{j33,7^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{L1} = jX_{L1} \dot{I}_2 = j200 \cdot 0,277e^{-j56,3^\circ} = 200e^{j90^\circ} \cdot 0,277e^{-j56,3^\circ} = 55,4e^{j33,7^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{R2} = R_2 \dot{I}_2 = 100 \cdot 0,277e^{-j56,3^\circ} = 27,7e^{-j56,3^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{C1} = -jX_{C1} \dot{I}_2 = -j100 \cdot 0,277e^{-j56,3^\circ} = 100e^{-j90^\circ} \cdot 0,277e^{-j56,3^\circ} = 27,7e^{-j146,3^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{C2} = -jX_{C2} \dot{I}_3 = 150e^{-j90^\circ} \cdot 0,391e^{j78,7^\circ} = 58,65e^{-j11,3^\circ}, \text{ В},$$

$$\dot{U}_{L2} = jX_{L2} \dot{I}_3 = 50e^{j90^\circ} \cdot 0,391e^{j78,7^\circ} = 19,55e^{j168,7^\circ}, \text{ В}.$$

Построим векторную диаграмму токов и напряжений цепи (рис. 9.3).

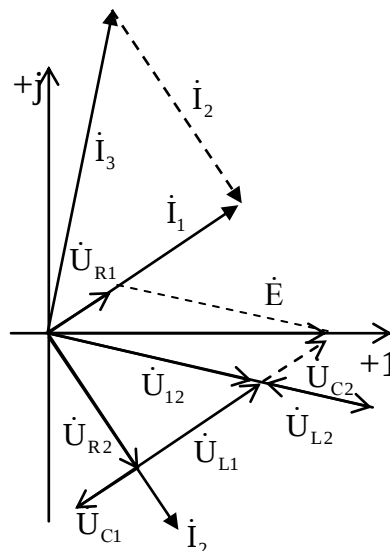


Рис. 9.3

Для этого на комплексной плоскости в соответствующих масштабах тока m_i и напряжения m_u построим векторы рассчитанных токов и напряжений со своими начальными фазами.

Построение векторной диаграммы удобно выполнять в следующем порядке:

- на комплексной плоскости в масштабе тока m_i построим векторы $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_3$ токов ветвей;

- построим вектор напряжения второй ветви, как сумму напряжений на всех ее элементах.

Векторы напряжений на комплексной плоскости построим в том порядке, в котором они записаны в уравнении:

построим вектор напряжения $\dot{U}_{R2}$, который совпадает по фазе с вектором тока второй ветви $\dot{I}_2$;

из конца вектора напряжения $\dot{U}_{R2}$ построим вектор напряжения $\dot{U}_{C1}$, учитывая, что напряжение конденсатора отстает от тока на угол -90° ;

из конца вектора напряжения $\dot{U}_{C1}$ построим вектор напряжения идеальной индуктивной катушки $\dot{U}_{L1}$, который опережает ток по фазе на угол 90° ;

вектор напряжения $\dot{U}_{12}$ построим, как сумму векторов напряжений резистора, катушки и конденсатора:

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_{R2} + \dot{U}_{C1} + \dot{U}_{L1}.$$

- построим вектор напряжения на зажимах третьей ветви, как сумму напряжений на идеальной индуктивной катушки L_2 и конденсатора C_2 , учтя что напряжения идеальной индуктивной катушки $\dot{U}_{L2}$ опережает ток третьей ветви $\dot{I}_3$ по фазе на угол 90° , а напряжение конденсатора отстает от тока на угол -90° ;

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{L2};$$

- вторая и третья ветви соединены параллельно, поэтому на векторной диаграмме должно выполняться равенство векторов напряжения второй и третьей ветвей

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_{L1} + \dot{U}_{R2} + \dot{U}_{C1} = \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{L2}.$$

- построим вектор напряжения на приемниках первой ветви, которая содержит только один элемент – резистор R_1 , напряжение которого совпадает по фазе с током первой ветви $\dot{I}_1$;

- построим вектор напряжения на зажимах источника ЭДС $\dot{U}_E = \dot{E}$, как сумму напряжений $\dot{E} = \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{12}$, согласно второму закону Кирхгофа;

- если расчеты в задаче выполнены правильно, то на векторной диаграмме будет хорошо видно выполнение законов Кирхгофа

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3,$$

$$\dot{E} = \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{12},$$

$$\dot{U}_{12} = \dot{U}_{L1} + \dot{U}_{R2} + \dot{U}_{C1} = \dot{U}_{C2} + \dot{U}_{L2}.$$

4. Выбор измерительных приборов. *Электроизмерительными приборами* называют средства электрических измерений, предназначенные для выработки сигналов измерительной информации, т.е. сигналов, функционально связанных с измеряемыми физическими величинами, в форме доступной для непосредственного восприятия наблюдателем. Они весьма разнообразны по своему принципу действия и конструктивному исполнению вследствие различных требований, предъявляемых к ним. К ним относятся, например, амперметр, вольтметр, ваттметр, фазометр, счетчик электрической энергии.

Электроизмерительные приборы, показания которых являются непрерывными функциями изменений измеряемых величин, называются аналоговыми приборами.

Общими характеристиками электроизмерительных приборов являются: статические погрешности, вариации показаний, чувствительность к измеряемой величине, диапазон измерений, собственное потребление приборами мощности, время установления показаний прибора, надежность прибора [9,10].

В данной работе в качестве электроизмерительных приборов необходимо использовать электромеханические измерительные приборы. Электромеханические показывающие приборы (амперметры, вольтметры, ваттметры и т.д.) составляют большую группу электроизмерительных приборов.

В каждом электромеханическом приборе имеются две основные части – подвижная и неподвижная. На обеих или на одной из них расположены обмотки и соответствующие зажимы, через которые к прибору подводятся ток или напряжение. Механические силы и вращающий момент этих сил, действующий на подвижную часть механизма, возникают в результате взаимодействия магнитных или электрических полей, которые могут создаваться током, напряжением, намагниченными или наэлектризованными телами.

Совокупность деталей, образующих подвижную и неподвижную части прибора, называют *измерительным механизмом* (ИМ). ИМ можно рассматривать как преобразователь электрической величины в механическое перемещение. В зависимости от физических явлений, положенных в основу создания вращающего момента, различают следующие измерительные механизмы:

- *магнитоэлектрические*, основанные на воздействии магнитного поля постоянного магнита на ток в обмотке подвижной катушки;
- *электромагнитные*, основанные на воздействии магнитного поля тока в обмотке на пластины из магнитомягкого ферромагнитного материала, намагничиваемые этим полем;
- *электродинамические*, основанные на воздействии магнитного поля тока одной катушки на ток в другой катушке;
- *ферродинамические*, имеющие принцип действия аналогичный электродинамическим приборам, но в которых магнитное поле усиливается магнитопроводом;
- *индукционные*, основанные на воздействии переменных магнитных полей, пронизывающих подвижный диск механизма, на вихревые токи, возникающие в диске;
- *электростатические*, основанные на взаимодействии двух или нескольких электрически заряженных пластин.

В [9] приведены рисунки конструкций названных измерительных механизмов и рассмотрены их устройство и принцип действия. Так же рассмотрены измерительные приборы, выполненные на их основе.

При черчении электрической схемы исследуемой цепи, в которую включены выбранные ранее электроизмерительные приборы необходимо помнить:

амперметр включается в цепь последовательно с элементами, ток которых он измеряет;

вольтметр подключается параллельно к тем зажимам, напряжение между которыми необходимо измерить;

фазометр и ваттметр имеют две обмотки, одна из которых включается в цепь последовательно (токовая обмотка), а другая (обмотка напряжения) параллельно тому участку цепи, напряжение на зажимах которого необходимо при определении угла сдвига фаз или активной мощности.

Это видно из выражений для угла сдвига фаз между напряжением и током на участке цепи и активной мощности:

угол сдвига фаз между напряжением и током на участке цепи определяется как разность начальных фаз напряжения на этом участке и тока, протекающего по нему:

$$\varphi = \psi_U - \psi_I;$$

активная мощность может быть определена как

$$P = UI \cos \varphi.$$

В том случае, если в предыдущих расчетах не были определены измеряемые угол сдвига фаз или активная мощность в какой-либо из ветвей, необходимо привести формулы для расчета и определить эти величины. Например, угол сдвига фаз между напряжением и током на участке цепи определяется как разность начальных фаз напряжения на этом участке и тока, протекающего по нему: $\varphi = \psi_U - \psi_I$.

5. Рассчитать мощности источника и приемников электрической энергии и проверить выполнение баланса мощностей.

Решение.

Рассчитаем комплексную мощность источника

$$\tilde{S}_E = \dot{U}_E^* I_E = \dot{E}^* I_1,$$

где I_1^* - комплексно сопряженный ток первой ветви.

Если $\dot{I}_1 = 0,277e^{j33,7^\circ}$, А, то $\dot{I}_1^* = 0,277e^{-j33,7^\circ}$, А.

Тогда комплексная мощность источника

$$\tilde{S}_E = \dot{E}^* I_1 = 50e^{j0^\circ} \cdot 0,277e^{-j33,7^\circ} = 13,85e^{-j33,7^\circ}, \text{ ВА.}$$

Запишем комплексную мощность в алгебраической форме записи

$$\tilde{S}_E = S_E e^{j\varphi} = S_E \cdot \cos \varphi + j S_E \cdot \sin \varphi = P_E + j Q_E;$$

$$\tilde{S}_E = 13,85e^{-j33,7^\circ} = 13,85 \cdot \cos(-33,7^\circ) + j 13,85 \cdot \sin(-33,7^\circ) = (11,52 - j 7,685), \text{ ВА,}$$

где $P_E = 11,52$, Вт - активная мощность источника;

$Q_E = -7,685$, ВАр - реактивная мощность источника.

Рассчитаем комплексную мощность приемников цепи

$$\tilde{S}_{\text{пр}\Sigma} = P_{\text{пр}\Sigma} + j Q_{\text{пр}\Sigma},$$

где суммарная активная мощность приемников энергии:

$$P_{\text{пр}\Sigma} = R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2 = 50 \cdot 0,277^2 + 100 \cdot 0,277^2 = 11,51, \text{ Вт};$$

суммарная реактивная мощность приемников

$$Q_{\text{пр}\Sigma} = (X_{L1} - X_{C1}) I_2^2 + (X_{L2} - X_{C2}) I_3^2 = 100 \cdot 0,277^2 + (-100) \cdot 0,391^2 = -7,682, \text{ ВАр}.$$

Тогда суммарная комплексная мощность приемников

$$\tilde{S}_{\text{пр}\Sigma} = P_{\text{пр}\Sigma} + jQ_{\text{пр}\Sigma} = (11,51 - j7,682), \text{ ВАр}.$$

Как видно баланс мощностей выполняется

$$P_E = P_{\text{пр}\Sigma}, \quad Q_E = Q_{\text{пр}\Sigma}.$$

Полная мощность приемников

$$S_{\text{пр}\Sigma} = \sqrt{P_{\text{пр}\Sigma}^2 + Q_{\text{пр}\Sigma}^2} = \sqrt{11,51^2 + (-7,682)^2} = 13,85, \text{ ВА}.$$

Коэффициент мощности нагрузки

$$\cos \varphi = \frac{P_{\text{пр}\Sigma}}{S_{\text{пр}\Sigma}} = \frac{11,51}{13,85} = 0,831.$$

6. Записать мгновенные значения тока второй ветви и напряжения на ее зажимах. Построить временные зависимости этих функций в одних осях координат.

Решение.

В результате расчетов в комплексной форме были получены значения тока и напряжения:

$$\dot{I}_2 = 0,277e^{-j56,3^\circ} \text{ А} \quad \dot{U}_{12} = 39,1e^{-j11,3^\circ} \text{ В}.$$

Переходим от полученных комплексных тока и напряжения к их мгновенным значениям:

$$i_2(t) = \sqrt{2} \cdot 0,277 \sin(\omega t - 56,3^\circ) \text{ А},$$

$$u_{12}(t) = \sqrt{2} \cdot 39,1 \sin(\omega t - 11,3^\circ) \text{ В}.$$

Так как мгновенные значения токов и напряжений в однофазной цепи изменяются по закону синуса, изображение временных характеристик токов, напряжений и ЭДС основано на построении периодической функции времени с периодом

$$T = \frac{1}{f}.$$

В общем виде выражение мгновенного значения синусоидального тока записывается как $i(t) = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ и содержит I_m - амплитуду тока, $(\omega t + \psi_i)$ - фазу, ψ_i - начальную фазу и ω - угловую частоту.

По оси абсцисс откладываем время t или пропорциональную величину ωt , по оси ординат - мгновенную величину тока в рассматриваемый момент времени в соответствующем масштабе.

При построении временных диаграмм необходимо помнить, что если синусоида имеет ненулевую начальную фазу, то она смещается относительно

начала координат:

в случае начальной фазы больше нуля $\psi > 0$ – влево;

в случае начальной фазы меньше нуля $\psi < 0$ – вправо.

Временные зависимости синусоидальных функций могут быть построены с помощью существующих программ, составленных для вычислительной техники или вручную. Временные диаграммы заданных синусоидальных функций построены на рис. 9.4. На диаграммах показаны амплитудные значения тока и напряжения, отложенные в масштабах тока и напряжения, и начальные фазы синусоидальных функций.

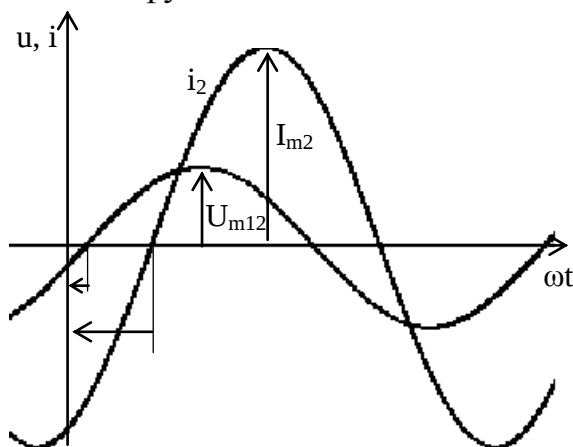


Рис. 9.4

ЧАСТЬ 2. РАСЧЕТ ФАЗНЫХ И ЛИНЕЙНЫХ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ ПОЛНОФАЗНОГО РЕЖИМА ЦЕПИ

1. Фазы нагрузки (рис. 9. 5) *соединены по схеме «звезда» с нейтральным проводом*, сопротивление которого равно нулю. Питание приемников электрической цепи осуществляется от трехфазного источника электрической энергии, фазы которого соединены по схеме «звезда».

Фазное напряжение источника $U_{\phi} = 127 \text{ В}$.

Параметры приемников электрической цепи:

$R = X_L = X_C = 100 \text{ Ом}$.

Рассчитать фазные и линейные токи и напряжения полнофазного режима цепи. Определить активную и реактивную мощности нагрузки. Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов.

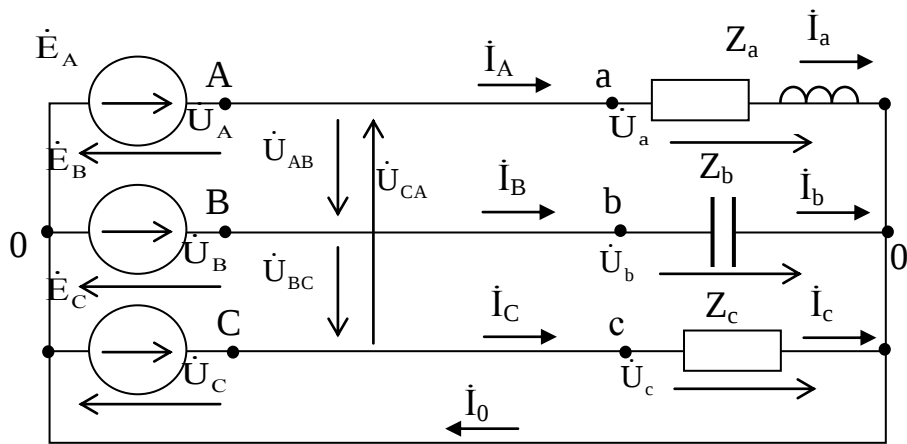


Рис. 9.5

Решение.

Фазные напряжения симметричной системы ЭДС источника одинаковы по величине и сдвинуты друг относительно друга по фазе на угол 120° :

$$\dot{U}_A = 127 e^{j0^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_B = 127 e^{-j120^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_C = 127 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Сопротивления линейных проводов цепи равны нулю, поэтому потенциалы начал фаз приемников равны потенциалам начал фаз источника.

При наличии нейтрального провода, сопротивление которого равно нулю, потенциалы нейтральной точки приемника и нейтральной точки источника равны, принимаем $\dot{\phi}_0 = \dot{\phi}_{0'} = 0$, в этом случае нейтральные точки источника и приемника можно называть нулевыми точками, а провод, соединяющий их – нулевым проводом.

Напряжение смещения нейтрали равно нулю

$$\dot{U}_{0'0} = \dot{\phi}_{0'} - \dot{\phi}_0 = 0.$$

Тогда фазные напряжения приемника будут равны соответствующим фазным напряжениям источника:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A = 127 e^{j0^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_b = \dot{U}_B = 127 e^{-j120^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_c = \dot{U}_C = 127 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Линейные напряжения симметричной системы ЭДС определим из условия, что действующее значение линейного напряжения при соединении фаз по схеме «звезда» в $\sqrt{3}$ раз больше соответствующего фазного напряжения источника и опережает его по фазе на угол 30°

$$\dot{U}_{AB} = \sqrt{3} \dot{U}_A e^{j30^\circ} = \sqrt{3} \cdot 127 e^{j0^\circ + j30^\circ} = 220 e^{j30^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{BC} = \sqrt{3} \dot{U}_B e^{j30^\circ} = \sqrt{3} \cdot 127 e^{j(-120^\circ + 30^\circ)} = 220 e^{-j90^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{CA} = \sqrt{3} \dot{U}_C e^{j30^\circ} = \sqrt{3} \cdot 127 e^{j120^\circ + j30^\circ} = 220 e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Рассчитаем комплексные сопротивления фаз нагрузки:

$$Z_a = R + jX_L = 100 + j100 = 141e^{j45^\circ}, \text{ Ом,}$$

$$Z_b = -jX_C = -j100 = 100e^{-j90^\circ}, \text{ Ом,}$$

$$Z_c = R = 100, \text{ Ом.}$$

Фазные токи приемников равны линейным токам, определим их по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{127e^{j0^\circ}}{141e^{j45^\circ}} = 0,9e^{-j45^\circ}, \text{ А,}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{100e^{-j90^\circ}} = 1,27e^{-j30^\circ}, \text{ А,}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c} = \frac{127e^{j120^\circ}}{100} = 1,27e^{j120^\circ}, \text{ А.}$$

Ток в нулевом проводе определим с помощью первого закона Кирхгофа:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0,9e^{-j45^\circ} + 1,27e^{-j30^\circ} + 1,27e^{j120^\circ} = 0,636 - j0,636 + 1,1 - j0,635 - 0,635 + j1,1 = 1,101 - j0,171 = 1,114e^{-j9^\circ}, \text{ А.}$$

Построим топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 9.6).

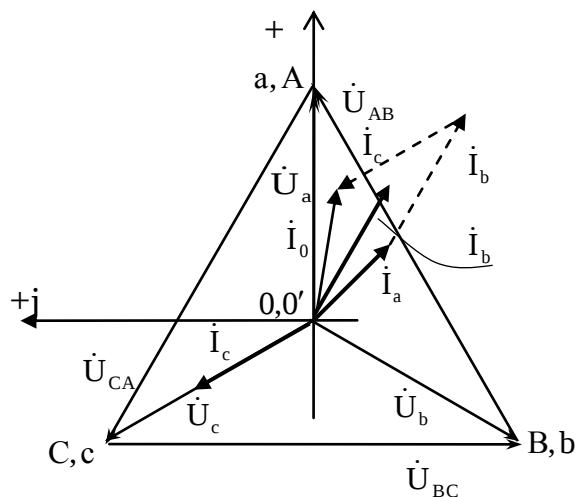


Рис. 9.6

Рассчитаем активную, реактивную и полную мощности приемников:

активная мощность приемников:

$$P = RI_a^2 + RI_c^2 = 100 \cdot 0,9^2 + 100 \cdot 1,27^2 = 242,3, \text{ Вт;}$$

реактивная мощность приемников:

$$Q = X_L I_a^2 - X_C I_b^2 = 100 \cdot 0,9^2 - 100 \cdot 1,27^2 = -80,3, \text{ ВАр;}$$

полная мощность:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{242,3^2 + (-80,3)^2} = 255,3, \text{ ВА.}$$

2. Фазы нагрузки *соединены по схеме «треугольник»*. Питание приемников электрической цепи, схема которой представлена на рис. 9.7,

осуществляется от трехфазного источника электрической энергии, фазы которого соединены по схеме «звезда».

Фазное напряжение источника $U_{\phi} = 127 \text{ В}$.

Комплексные сопротивления фаз приемников:

$$Z_{ab} = jX_L = j100 \text{ Ом},$$

$$Z_{bc} = R - jX_C = 100 - j100 \text{ Ом},$$

$$Z_{ca} = R = 100 \text{ Ом}.$$

Определить фазные и линейные токи и напряжения в трехфазной нагрузке, *соединенной по схеме «треугольник»*. Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов.

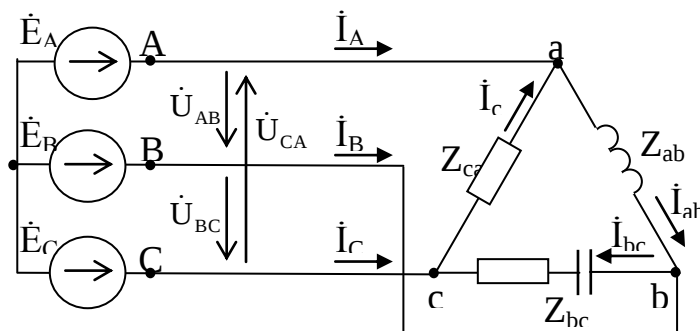


Рис. 9.7

Решение.

Фазные напряжения симметричной системы ЭДС источника:

$$\dot{U}_A = 127 e^{j0^\circ} \text{ В}, \quad \dot{U}_B = 127 e^{-j120^\circ} \text{ В}, \quad \dot{U}_C = 127 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Фазы источника соединены по схеме «звезда», поэтому линейные напряжения равны:

$$\dot{U}_{AB} = 220 e^{j30^\circ} \text{ В}, \quad \dot{U}_{BC} = 220 e^{-j90^\circ} \text{ В}, \quad \dot{U}_{CA} = 220 e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Фазные напряжения приемников, при соединении фаз нагрузки «треугольником», равны линейным напряжениям источника:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = 220 e^{j30^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC} = 220 e^{-j90^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA} = 220 e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Фазные токи определим с помощью закона Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{220 e^{j30^\circ}}{100 e^{j90^\circ}} = 2,2 e^{-j60^\circ} = 1,1 - j1,9 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{220 e^{-j90^\circ}}{141 e^{-j45^\circ}} = 1,41 e^{-j45^\circ} = 1 - j1 \text{ А},$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{220 e^{j150^\circ}}{100} = 2,2 e^{j150^\circ} = -1,9 + j1,1 \text{ А}.$$

Линейные токи рассчитаем, составив уравнения по первому закону

Кирхгофа:

для узла a :

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 2,2e^{-j60^\circ} - 2,2e^{j150^\circ} = 1,1 - j1,9 + 1,9 - j1,1 = 3 - j3 = 4,24e^{-j45^\circ}, \text{ A};$$

для узла b :

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = 1,41e^{-j45^\circ} - 2,2e^{-j60^\circ} = 1 - j1 - 1,1 + j1,9 = -0,1 + j0,9 = 0,906e^{j96^\circ}, \text{ A};$$

для узла c :

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = 2,2e^{j150^\circ} - 1,41e^{-j45^\circ} = -1,9 + j1,1 - 1,1 + j1,1 = -3 + j2,2 = 3,72e^{j144^\circ}, \text{ A}.$$

Построим топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 9.8).

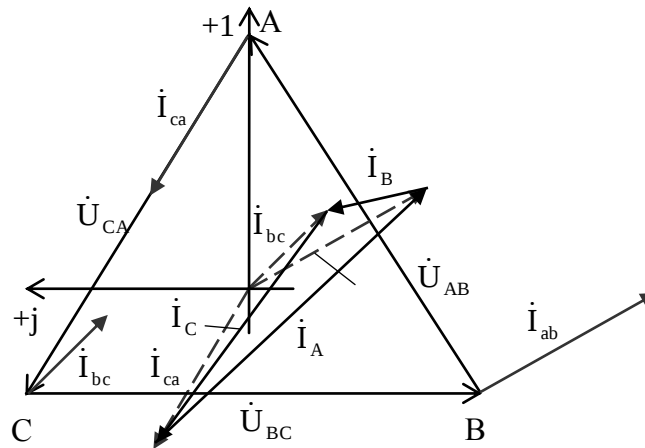


Рис. 9.8

Рассчитаем активную, реактивную и полную мощности приемников:

активная мощность приемников

$$P = RI_{bc}^2 + RI_{ca}^2 = 100 \cdot 1,41^2 + 100 \cdot 2,2^2 = 862,8, \text{ Вт};$$

реактивная мощность приемников

$$Q = X_L I_{ab}^2 - X_C I_{bc}^2 = 100 \cdot 2,2^2 - 100 \cdot 1,41^2 = 284, \text{ ВАр};$$

полная мощность

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{862,8^2 + 284^2} = 908,3, \text{ ВА}.$$

Расчет фазных и линейных токов и напряжений неполнофазного режима цепи

1. В электрической цепи, представленной на рис. 9.9, произошел **обрывом нагрузки** фазы В.

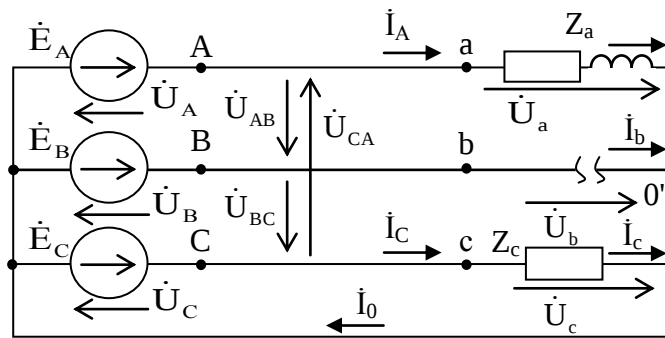


Рис. 9.9

Питание приемников электрической цепи осуществляется от трехфазного источника электрической энергии, фазы которого соединены по схеме «звезда». Фазы нагрузки *соединены по схеме «звезда» с нейтральным проводом*, сопротивление которого равно нулю.

Фазное напряжение источника $U_\phi = 127$ В. Параметры приемников электрической цепи: $R = X_L = 100$ Ом.

Рассчитать фазные и линейные токи и напряжения неполнофазного режима цепи, обусловленного обрывом нагрузки фазы В. Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов.

Решение.

Так как сопротивление нулевого провода равно нулю, то напряжение смещения нейтрали в схеме отсутствует и фазные напряжения приемника равны соответствующим фазным напряжениям источника:

$$\dot{U}_a = \dot{U}_A = 127 e^{j0^\circ} \text{ В}, \quad \dot{U}_b = \dot{U}_B = 127 e^{-j120^\circ} \text{ В}, \quad \dot{U}_c = \dot{U}_C = 127 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Фазные токи приемников, равные линейным токам, определим по закону Ома:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{127 e^{j0^\circ}}{141 e^{j45^\circ}} = 0,9 e^{-j45^\circ} \text{ А}, \quad \dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{\infty} = 0,$$

$$\dot{I}_c = \frac{\dot{U}_c}{Z_c} = \frac{127 e^{j120^\circ}}{100} = 1,27 e^{j120^\circ} \text{ А}.$$

Ток в нулевом проводе определим по первому закону Кирхгофа

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0,9 e^{-j45^\circ} + 0 + 1,27 e^{j120^\circ} = 0,636 - j0,636 - 0,635 + j1,1 = 0,001 + j1,036 = 1,036 e^{j89,9^\circ} \text{ А}.$$

Построим для рассматриваемого режима топографическую диаграмму и векторную диаграмму токов (рис. 9.10).

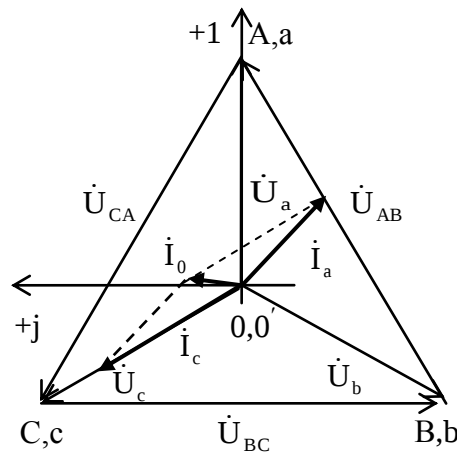


Рис. 9.10

2. В электрической цепи, представленной на рис. 9.11, произошло **короткое замыкание нагрузки в фазе С**.

Питание приемников электрической цепи осуществляется от трехфазного источника электрической энергии, фазы которого соединены по схеме «звезда». Фазы нагрузки **соединены по схеме «звезда»**.

Фазное напряжение источника $U_{\phi} = 127$ В. Параметры приемников электрической цепи: $R = X_L = X_C = 100$ Ом.

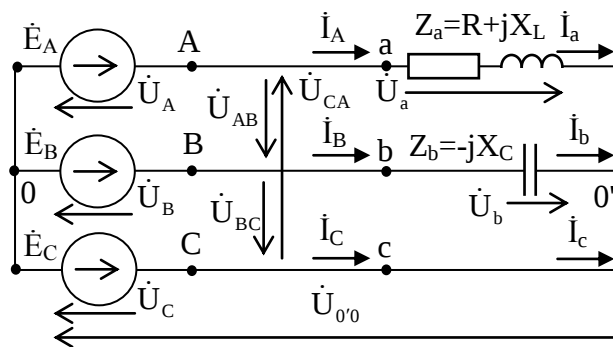


Рис. 9.11

Рассчитать фазные и линейные токи и напряжения неполнофазного режима цепи, обусловленного коротким замыканием нагрузки в фазе С. Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов.

Решение.

Рассмотрим короткое замыкание в фазе «с» приемника (рис. 9.11). Этот режим рассматривается только для *схемы без нулевого провода*, так как в схеме с нулевым проводом при коротком замыкании в одной из фаз приемника замыкается накоротко источник этой фазы, что является аварийным режимом.

Фазные напряжения источника:

$$\dot{U}_A = 127 e^{j0^\circ} \text{ В}, \quad \dot{U}_B = 127 e^{-j120^\circ} \text{ В}, \quad \dot{U}_C = 127 e^{j120^\circ} \text{ В}.$$

Линейные напряжения симметричной системы ЭДС:

$$\dot{U}_{AB} = 220 e^{j30^\circ} \text{ В}, \quad \dot{U}_{BC} = 220 e^{-j90^\circ} \text{ В}, \quad \dot{U}_{CA} = 220 e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

При коротком замыкании в фазе c сопротивление $Z_c = 0$ и, как видно на схеме рис. 9.11, разность потенциалов между нейтральной точкой приемника и нулевой точкой источника равна ЭДС фазы C источника, то есть напряжение смещения нейтрали равно напряжению фазы C источника:

$$\dot{U}_{0'0} = \dot{\phi}_{0'} = \dot{E}_C = \dot{U}_C = 127e^{j120^\circ} = (-63,5 + j110), \text{ В.}$$

Фазные напряжения приемников: $\dot{U}_c = 0$;

$$\dot{U}_a = \dot{\phi}_a - \dot{\phi}_{0'} = \dot{U}_A - \dot{U}_C = -\dot{U}_{CA} = -220e^{j150^\circ} = 220e^{-j30^\circ}, \text{ В,}$$

$$\dot{U}_b = \dot{\phi}_b - \dot{\phi}_{0'} = \dot{U}_B - \dot{U}_C = \dot{U}_{BC} = 220e^{-j90^\circ}, \text{ В.}$$

Токи приемников фаз a и b определим по закону Ома:

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{U}_a}{Z_a} = \frac{220e^{-j30^\circ}}{141e^{j45^\circ}} = 1,56e^{-j75^\circ}, \text{ А,}$$

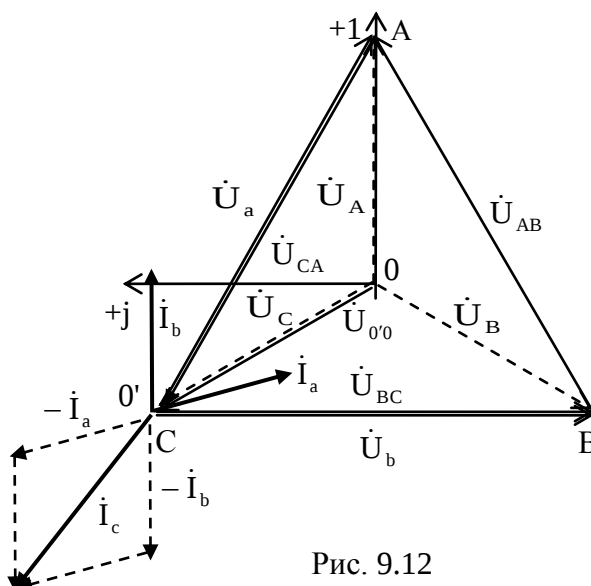
$$\dot{I}_b = \frac{\dot{U}_b}{Z_b} = \frac{220e^{-j90^\circ}}{100e^{-j90^\circ}} = 2,2e^{j0^\circ}, \text{ А.}$$

Ток фазы c определим с помощью первого закона Кирх-гофа. Для схемы без нулевого провода $\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$, тогда

$$\dot{I}_c = -(\dot{I}_a + \dot{I}_b) = -(1,56e^{-j75^\circ} + 2,2e^{j0^\circ}) = -(0,404 - j1,507 + 2,2) = -2,604 + j1,507 = 3,09e^{j150^\circ}, \text{ А.}$$

Линейные токи при соединении фаз нагрузки по схеме «звезда» равны соответствующим фазным токам.

Построим для рассматриваемого режима топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 9.12).



3. В электрической цепи, представленной на рис. 9.13, произошел **обрыв нагрузки в фазе bc** .

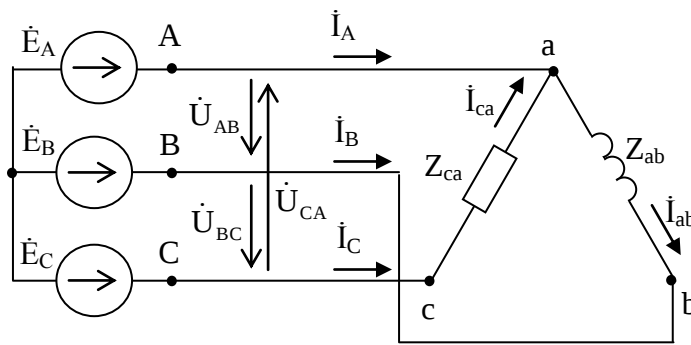


Рис. 9.13

Питание приемников электрической цепи осуществляется от трехфазного источника электрической энергии, фазы которого соединены по схеме «звезда». Фазы нагрузки **соединены по схеме «треугольник»**.

Определить фазные и линейные токи и напряжения в трехфазной нагрузке при обрыве нагрузки в фазе *вс*. Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов.

Фазное напряжение источника $U_\phi = 127 \text{ В}$.

Сопротивления фаз нагрузки:

$Z_{ab} = jX_L = j100 \text{ Ом}$, $Z_{ca} = R = 100 \text{ Ом}$.

Так как в фазе *вс* произошел обрыв нагрузки, то $Z_{bc} = \infty$.

Решение.

Фазы источника соединены по схеме «звезда».

Линейные напряжения источника:

$U_L = \sqrt{3} U_\phi = \sqrt{3} 127 = 220 \text{ В}$.

Фазные напряжения приемников, при соединении фаз нагрузки треугольником, равны линейным напряжениям источника

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = 220e^{j30^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{U}_{BC} = 220e^{-j90^\circ} \text{ В},$$

$$\dot{U}_{ca} = \dot{U}_{CA} = 220e^{j150^\circ} \text{ В}.$$

Фазные токи определяем с помощью закона Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{220e^{j30^\circ}}{100e^{j90^\circ}} = 2,2e^{-j60^\circ} = 1,1 - j1,9 \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{Z_{bc}} = \frac{220e^{-j90^\circ}}{\infty} = 0;$$

$$\dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{Z_{ca}} = \frac{220e^{j150^\circ}}{100} = 2,2e^{j150^\circ} = -1,9 + j1,1 \text{ А}.$$

Линейные токи:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 2,2e^{-j60^\circ} - 2,2e^{j150^\circ} = 1,1 - j1,9 + 1,9 - j1,1 = 3 - j3 = 4,24e^{-j45^\circ}, \text{ A;} \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} = -\dot{I}_{ab} = -2,2e^{-j60^\circ} = 2,2e^{j120^\circ}, \text{ A;} \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ca} = 2,2e^{j150^\circ}, \text{ A.}\end{aligned}$$

Построим топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов (рис. 9.14).

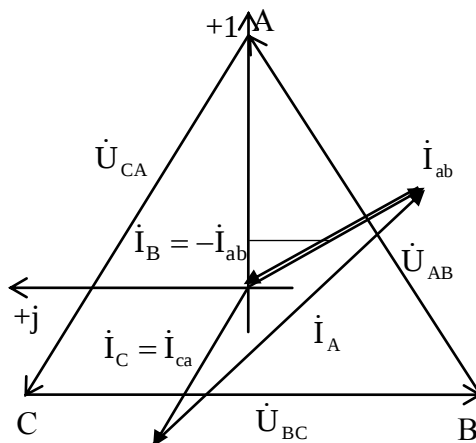


Рис. 9.14

4. В электрической цепи, представленной на рис. 9.15, произошел **обрыв линейного провода фазы C**.

Определить линейные и фазные токи и напряжения в трехфазной цепи, нагрузка которой соединена **по схеме «треугольник»** при обрыве линейного провода фазы C. Построить топографическую диаграмму, совмещенную с векторной диаграммой токов.

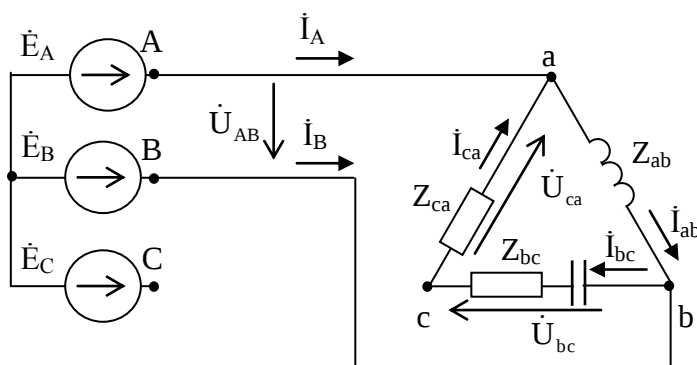


Рис. 9.15

Фазное напряжение источника $U_\phi = 127 \text{ В}$.

Сопротивления фаз нагрузки:

$Z_{ab} = jX_L = j100 \text{ Ом}$, $Z_{bc} = R - jX_C = 100 - j100 \text{ Ом}$, $Z_{ca} = R = 100 \text{ Ом}$.

Решение.

При обрыве линейного провода фазы C $Z_{Cc} = \infty$, потенциал точки c нагрузки будет отличаться от потенциала точки C источника. Рассматриваемая

нагрузка будет подключена на одно линейное напряжение $\dot{U}_{AB} = 220e^{j30^\circ}$ В.

Напряжение нагрузки фазы ab :

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = 220e^{j30^\circ} \text{ В.}$$

Нагрузки фаз bc и ca соединены последовательно:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab} = \dot{U}_{bc} + \dot{U}_{ca}.$$

При решении задачи необходимо помнить, что условно-положительные направления токов и напряжений, принятые в трехфазных цепях, остаются неизменными.

Фазные токи определим по закону Ома:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_{ab}} = \frac{220e^{j30^\circ}}{100e^{j90^\circ}} = 2,2e^{-j60^\circ} = 1,1 - j1,9, \text{ А};$$

$$\dot{I}_{bc} = \dot{I}_{ca} = \frac{-\dot{U}_{ab}}{Z_{bc} + Z_{ca}} = \frac{-220e^{j30^\circ}}{100 + 100 - j100} = \frac{220e^{-j150^\circ}}{223,6e^{-j27^\circ}} = 0,98e^{-j123^\circ} = -0,53 - j0,82, \text{ А.}$$

Линейные токи определим с помощью первого закона Кирхгофа

$$\dot{I}_A = -\dot{I}_B = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} = 2,2e^{-j60^\circ} - 0,98e^{-j123^\circ} = 1,1 - j1,9 + 0,53 + j0,82 = 1,63 - j1,08 = 1,96e^{-j34^\circ}, \text{ А.}$$

Ток в линейном проводе фазы C отсутствует.

Фазные напряжения приемников:

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{AB} = 220e^{j30^\circ} \text{ В};$$

$$\dot{U}_{bc} = Z_{bc} \dot{I}_{bc} = 141e^{-j45^\circ} \cdot 0,98e^{-j123^\circ} = 138e^{-j168^\circ}, \text{ В};$$

$$\dot{U}_{ca} = Z_{ca} \dot{I}_{ca} = 100 \cdot 0,98e^{-j123^\circ} = 98e^{-j123^\circ}, \text{ В.}$$

Топографическая диаграмма, совмещенная с векторной диаграммой токов построена на рис. 9.16.

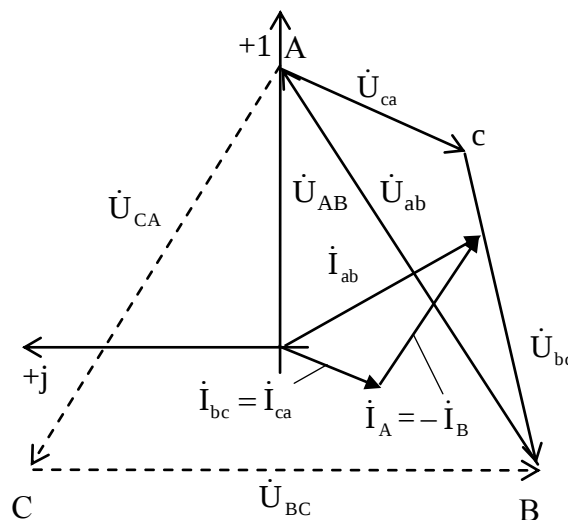


Рис. 9.16

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данное учебное пособие содержит материал, необходимый для успешного освоения студентами, подготавливаемыми по направлению «Электроэнергетика и электротехника» профилей «Электропривод и автоматика» и «Электроснабжение» дисциплины «Теоретические основы электротехники», а также материал специальных дисциплин, базирующихся на ней.

Материал учебного пособия охватывает практически все разделы дисциплины: цепи постоянного и однофазного переменного токов, трехфазные цепи, цепи с несинусоидальными периодическими токами и напряжениями, четырехполосники, переходные процессы в линейных электрических цепях постоянного тока, анализ нелинейных электрических и магнитных цепей постоянного тока.

В учебном пособии приведены достаточно подробные теоретические сведения, задания на выполнение самостоятельных и курсовой работ, примеры решения типовых задач по рассмотренным разделам дисциплины, а также рекомендации по выполнению курсовой работы.

Данное учебное пособие поможет студентам выполнить самостоятельные работы, подготовиться к выполнению лабораторных работ, выполнить и оформить результаты экспериментов.

Составления уравнений, построения векторных диаграмм сопровождаются подробными пояснениями, что позволит получить студентам навыки самостоятельной обработки и анализа результатов расчета, способствующие более глубокому изучению материала по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

Порядок проведения лабораторных работ соответствует порядку изучения перечисленных тем в дисциплине «Теоретические основы электротехники».

Пособие может быть использовано другими студентами электротехнических направлений, изучающих дисциплины «Теоретические основы электротехники», «Электротехника».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Текст] : учебник для бакалавров / Л.А. Бессонов. - М. : Юрайт, 2012. - 701 с.
2. Зевеке, Г.В. Основы теории цепей [Текст] / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. - М.: Энергоатомиздат, 1989. - 528 с.
3. Поливанов, К.М. Теоретические основы электротехники [Текст] / К.М. Поливанов. - М.: Энергия, 1972. - 239 с.
4. Атабеков, Г.И. Теоретические основы электротехники [Текст] / Г.И. Атабеков. - М.: Энергия, 1978. - 245 с.
5. Шебес, М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей [Текст] / М.Р. Шебес, М.В. Каблукова. - М.: Высшая школа, 1990. - 485 с.
6. Задачник по теоретическим основам электротехники (теория цепей) [Текст] / Под ред. К.М. Поливанова. – М.: Энергия, 1973. - 304 с.
7. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники : учеб. пособие для вузов [Текст] / П.А. Ионкин и др.; под ред. П.А. Ионкина. - М.: Энергоиздат, 1982. - 768 с.
8. Сборник задач по теоретическим основам электротехники: учеб. пособие для энерг. и приборостроит. спец. вузов [Текст] / Л.А. Бессонов и др.; под ред. Л.А. Бессонова. – 4-е изд., перераб. - М.: Высшая школа, 2000. - 528 с.
9. Электротехника и электроника [Текст]. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники/Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1998.-432 с
10. Основы метрологии и электрические измерения [Текст]/ Под ред. Е. М. Душина.— 6-е изд., перераб. и доп.— Л: Энергоатомиздат. Ленингр. отделение, 1987. — 480 с.
11. Приборы и методы измерения электрических величин [Текст]/ Э.Г.Атамалян. - 3-е изд.,перераб.и доп. - М. : Дрофа, 2005. - 415 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Воронежский государственный технический университет»
(ФГБОУ ВО «ВГТУ», ВГТУ)

Факультет энергетики и систем управления

Кафедра электропривода, автоматики и управления в технических системах

Направление подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Профиль _____

КУРСОВАЯ РАБОТА

по дисциплине «Теоретические основы электротехники»

на тему **«Расчет и измерения электрических величин в линейных
электрических цепях синусоидального тока»**

Вариант № _____

Выполнил студент группы _____
шифр группы *фамилия, инициалы*

Принял: _____
должность преподавателя *фамилия, инициалы*

Курсовая работа защищена «__» _____ 20__ г.
подпись преподавателя

Оценка _____

Воронеж 20__

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Раздел I. Лабораторные работы	4
Указания по технике безопасности	4
Требования к подготовке и оформлению лабораторных работ	5
1. Лабораторная работа № 1. Исследование разветвленной электрической цепи постоянного тока	6
2. Лабораторная работа № 2. Исследование режимов работы электрических цепей синусоидального тока	10
3. Лабораторная работа № 3. Исследование трехфазной электрической цепи при соединении фаз нагрузки звездой и треугольником	15
4. Лабораторная работа № 4. Четырехполюсник	21
5. Лабораторная работа № 5. Переходные процессы в линейных электрических цепях.....	27
Раздел II. Самостоятельные работы	31
6. Самостоятельная работа № 1. Расчет линейных электрических цепей постоянного тока	31
7. Самостоятельная работа № 2. Анализ переходных процессов в линейных электрических цепях постоянного тока	39
Раздел III. Курсовая работа.....	47
Требования к оформлению курсовой работы.....	47
8. Задание на курсовую работу по теме «Расчет и измерения электрических величин в линейных электрических цепях синусоидального тока».....	49
Часть 1. Расчет и измерения электрических величин в линейных электрических цепях однофазного синусоидального тока	49
Часть 2. Расчет и измерения электрических величин в трехфазных электрических цепях	52
9. Примеры выполнения курсовой работы.....	58
Часть 1. Расчет и измерения электрических величин в линейных электрических цепях однофазного синусоидального тока.....	58
Часть 2. Расчет фазных и линейных токов и напряжений полнофазного режима цепи	66
Заключение	77
Библиографический список	78
Приложение	79

Учебное издание

**Ген Жанна Александровна
Сазонова Татьяна Леонидовна
Тонн Дмитрий Александрович**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.
МАТЕРИАЛЫ ЛАБОРАТОРНОГО ПРАКТИКУМА,
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ
И КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

Учебное пособие

Компьютерный набор Ж. А. Ген

Подписано к изданию 06.05.2024.

Объем данных 2,1 Мб.

Тираж 10 экз.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
394006 Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84