

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

Методические указания

по выполнению лабораторных и практических работ
по дисциплине «Теория электрических и радиотехнических цепей»
для студентов направления подготовки /специальности
11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
Направленность (профиль)
«Интеллектуальная обработка данных в инфокоммуникационных
системах и сетях»

Ставрополь 2026

СОДЕРЖАНИЕ

	с
Введение.....	4
Лабораторная работа №1 Исследование электрических цепей методом наложения и методом эквивалентного генератора.....	6
Лабораторная работа №2 Исследование идеальных элементов цепей синусоидального тока	12
Лабораторная работа №3 Исследование неразветвленных цепей синусоидального тока ...	18
Лабораторная работа №4 Исследование разветвленных цепей синусоидального тока	24
Лабораторная работа №5 Исследование трехфазных цепей	30
Лабораторная работа №6 Исследование частотных характеристик апериодических цепей	36
Лабораторная работа №7 Исследование частотных характеристик одиночных колебательных контуров.....	42
Лабораторная работа №8 Исследование временных характеристик апериодических цепей.....	47
Лабораторная работа №9 Исследование четырехполюсников.....	52
Лабораторная работа №10 Исследование частотных характеристик LC-фильтров	60
Литература.....	67

Введение

Лабораторные работы — существенный элемент учебного процесса в вузе, в ходе которого обучаемые фактически впервые сталкиваются с самостоятельной практической деятельностью в конкретной области. Лабораторные работы являются как бы средним звеном между углубленной теоретической работой студентов на лекциях и применением ими знаний на практике. Эти занятия удачно сочетают элементы теоретического исследования и практической работы.

Выполняя лабораторные работы, обучаемые лучше усваивают программный материал, так как многие расчеты и формулы, казавшиеся отвлеченными, становятся вполне конкретными, происходит соприкосновение теории с практикой, что в целом содействует уяснению сложных вопросов науки и становлению обучаемых как специалистов.

Лабораторные работы активизируют самостоятельную работу обучаемых над изучаемым курсом. Заметим, что наиболее интенсивная и ритмичная работа в течение семестра проводится обучаемыми по тем дисциплинам, по которым имеются лабораторные занятия.

В настоящее время считается общепризнанным, что лабораторный практикум должен носить творческий, исследовательский, а не созерцательный, репродуктивный характер. Следовательно, лабораторные занятия должны быть школой практического опыта, школой творческих навыков, эффективного использования науки в избранной профессии. Наряду с этим лабораторный практикум должен быть школой воспитания творчества, настойчивости в достижении поставленной научной цели.

Лабораторные работы — один из видов самостоятельной практической работы обучаемых, в которых путем проведения экспериментов происходят **углубление** и закрепление теоретических знаний и навыков обучаемых в интересах их профессиональной подготовки.

Выполнение обучаемыми лабораторных работ имеет целью:

углубить и закрепить знания теоретического курса путем практического изучения изложенных в лекции законов и положений в лабораторных условиях;

приобрести навыки в научном экспериментировании, анализе результатов экспериментов и составлении отчетов по ним;

практически ознакомиться с измерительной аппаратурой и методами измерений, устройством различной экспериментальной аппаратуры и оборудования;

приобрести первичные навыки организации, планирования и проведения научных исследований.

Благодаря лабораторным работам, обучаемые лучше усваивают программный материал, так как при подготовке и выполнении экспериментов выявляется множество таких деталей в теории вопроса, с которыми студенты не встречались ни на лекции, ни на практических занятиях. Словом, соприкосновение теории и опыта, происходящее в лаборатории, не только содействует усвоению учебного материала, но и развивает мышление, придавая ему рациональные черты и активный характер. Правильно организованные лабораторные работы должны требовать от студентов не только хороших знаний теории, но и проявления инициативы, наблюдательности и самостоятельности при проведении экспериментов, умения анализировать, обобщать и делать выводы.

Как и другие виды занятий, лабораторный практикум выполняет познавательную, воспитательную функции и функцию контроля.

Наблюдая за проведением эксперимента и проверяя отчеты по итогам лабораторных работ студентов, преподаватель оценивает и отмечает организованность, последовательность и аккуратность в работе, умение работать по инструкции, с соблюдением требуемых мер безопасности.

Лабораторная работа №1

Исследование электрических цепей методом наложения и методом эквивалентного генератора

Цель работы:

1. Экспериментальное исследование электрических цепей методом наложения.
2. Экспериментальное исследование электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжения.
3. Экспериментальное исследование электрических цепей методом эквивалентного генератора тока.

Задание на подготовку к лабораторной работе:

1. Ознакомиться с руководством к лабораторной работе;
2. Выполнить предварительный расчет согласно варианту задания (таблица 1):
 - 2.1. Рассчитать токи в ветвях заданной цепи методом наложения.
 - 2.2. Рассчитать ток в ветви с элементом R_3 заданной цепи методом эквивалентного генератора напряжения.
 - 2.3. Рассчитать ток в ветви с элементом R_3 заданной цепи методом эквивалентного генератора тока.

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источники постоянного тока и напряжения, резисторы, вольтметр и амперметры.

Задание на исследование

1. Исследовать методом наложения распределение токов в ветвях электрической цепи постоянного тока.
2. Определить методом эквивалентного генератора напряжения ток в заданной ветви электрической цепи постоянного тока.

3. Определить ток в заданной ветви электрической цепи постоянного тока методом эквивалентного генератора тока.

Таблица 1- Варианты заданий для предварительного расчета и исследований

Вариант №	$E_1, В$	$E_2, В$	$J, мА$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$
1	20	12	160	110	140	140
2	11	14	170	120	150	150
3	13	16	180	130	160	130
4	15	18	190	140	170	140
5	17	20	200	150	180	150
6	19	11	100	160	190	160
7	12	13	110	170	200	170
8	14	15	120	180	100	180
9	16	17	130	190	110	190
10	18	19	140	200	120	200
11	20	12	150	100	130	100
12	11	14	160	110	140	110
13	18	16	170	120	150	120
14	20	18	180	130	160	130
15	11	20	190	140	170	140
16	13	11	150	150	180	150
17	15	13	160	160	190	130
18	17	15	170	170	130	140
19	19	17	150	180	140	150
20	12	19	160	190	150	160
21	14	11	170	200	160	170
22	16	13	180	100	170	180
23	18	15	190	110	180	130
24	20	17	200	120	190	140
25	11	19	100	130	200	150
26	13	12	110	140	100	160
27	18	14	120	150	110	170
28	14	17	300	128	250	200
29	20	17	180	100	140	150
30	11	19	190	110	150	160
31	23	12	150	180	130	150
32	14	14	160	190	140	160
33	17	16	170	200	150	170
34	22	18	180	100	160	180
35	15	20	190	110	170	190
36	17	16	170	120	150	160

Порядок проведения исследований

а) Исследование электрической цепи методом наложения

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 1). При сборке схемы амперметры и вольтметр подсоединить с соблюдением «полярности»

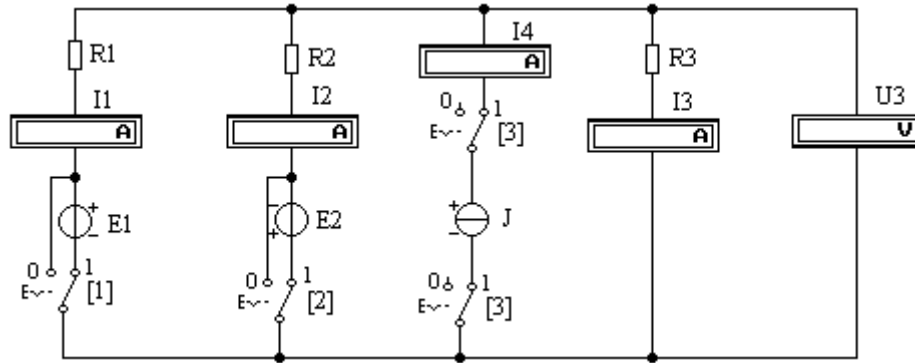


Рисунок 1

2. Установить заданные согласно варианту значения ЭДС и тока источников энергии, величины элементов схемы. Для чего к нужному элементу подводится курсор и двойным нажатием левой кнопки «мышки» вызывается окно (с именем элемента), в котором устанавливается требуемое значение параметра и нажимается кнопка «Ассерт».

3. В схеме (рисунок 1) установить **все ключи в положение 1** (при необходимости нажать на клавиатуре клавиши 1, 2 и 3)

4. После завершения установки всех параметров схемы кнопку - «0-1», расположенную в правом верхнем углу экрана перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметров и вольтметра занести в таблицу 2.

Таблица 2-Расчетные и экспериментальные данные исследования цепи методом наложения

№ п.п.	Подключены источники	I ₁ , мА		I ₂ , мА		I ₃ , мА		I ₄ , мА		U ₃ , В	
		расч	эксп	расч	эксп	расч	эксп	расч	эксп	расч	эксп
1	E1, E2, J										
2	только E1										
3	только E2										
4	только J										
5	Алгебраическая сумма «частичных» токов и напряжений										

5. Переключателями 2 и 3 отключить источники E2 и J. Для этого ключи 2 и 3 перевести в положение 0 (нажать на клавиатуре клавиши 2 и 3). Кнопку (0-1) перевести в

положение «1». По завершении автоматических расчетов кнопку (0-1) перевести в положение «0». Показания амперметров и вольтметра занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных (таблица 2). Переключатели 2 и 3 перевести в положение 1 (исходное положение)

6. Переключателями 1 и 3 отключить источники E1 и J (нажать на клавиатуре клавиши 1 и 3 при этом ключи переводятся в положение 0). Кнопку (0-1) перевести в положение «1». По завершении автоматических расчетов кнопку (0-1) перевести в положение «0». Показания амперметров и вольтметра занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных (таблица 2). Переключатели 1 и 3 перевести в положение 1

7. Переключателями 1 и 2 отключить источники E1 и E2 (нажать на клавиатуре клавиши 1 и 2 при этом ключи переводятся в положение 2). Кнопку (0-1) перевести в положение «1». По завершении автоматических расчетов кнопку (0-1) перевести в положение «0». Показания амперметров и вольтметра занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных (таблица 2). Переключатели 1 и 2 перевести в положение 1

8. Определить алгебраическую сумму «частичных» токов в каждой ветви исследуемой схемы (сложить токи п. 2-4 табл.2) и сравнить с результатами измерений п.1 табл. 2. Сделать выводы.

9. Сравнить результаты предварительных расчетов первичных параметров с результатами исследований. Сделать выводы.

б) Экспериментальное исследование электрических цепей методом эквивалентного генератора

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 2). Для этого необходимо в схеме (рисунок 1) удалить элемент R3 и добавить ключ K.

2. Для определения параметра **эквивалентного генератора напряжения** $E_3 = U^{xx}$ в схеме (рисунок 2) установить **режим холостого хода**: переключатель «K» перевести в положение 0 (нажать на клавиатуре клавишу K).

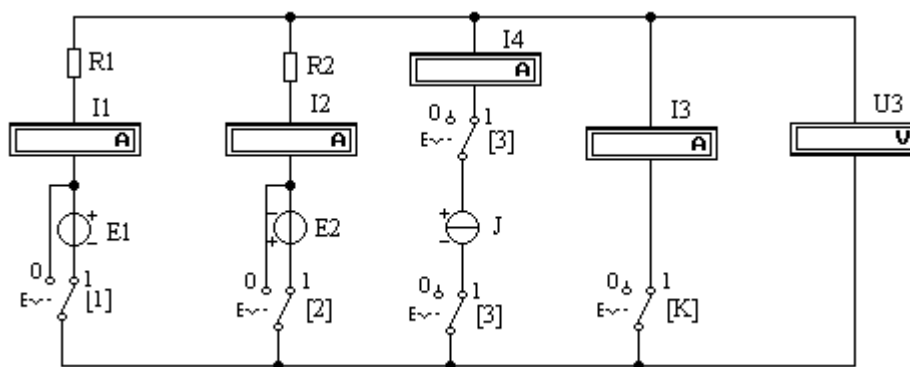


Рисунок 2

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку (0-1) перевести в положение «1». По завершении автоматических расчетов кнопку (0-1) перевести в положение «0». Показания вольтметра $U_3=E_\Sigma$ занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

Таблица 3- Расчетные и экспериментальные данные

Метод исследования		$U_3, В$	$I_3, мА$	$R_\Sigma, Ом$	$I_H, мА$
Метод эквивалентного генератора напряжения	расчет				
	эксперимент				
Метод эквивалентного генератора тока	расчет	0			
	эксперимент	0			

4. Для определения величины J_Σ (параметр эквивалентного генератора тока) в схеме (рис.2) установить **режим короткого замыкания**: переключатель «К» перевести в положение 1 (нажать на клавиатуре клавишу К). Кнопку (0-1) перевести в положение «(1)». По завершении автоматических расчетов кнопку (0-1) перевести в положение «(0)». Показания амперметра $I_3=I_{K3}=J_\Sigma$ занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

5. Для определения величины R_Σ (параметр эквивалентного генератора) в схеме (рис.2) переключатель «К» и ключи 1, 2, 3 перевести в положение 0 (схема преобразована в пассивный двухполюсник). Вместо вольтметра (рисунок 2) подсоединить



мультиметр и подготовить его для измерения сопротивления. Для этого к его изображению подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» активизировать и нажать кнопку «Ω». Кнопку (0-1) перевести в положение «(1)». По завершении автоматических расчетов кнопку (0-1) перевести в положение «(0)». Показания мультиметра, соответствующие R_Σ , занести в таблицу 3 расчетных и экспериментальных данных.

Сопротивление R_Σ определить, используя результаты опыта холостого хода и короткого замыкания $R_\Sigma = \frac{U_3^{xx}}{I_{K3}}$. Результаты измерений R_Σ сравнить.

6. Для определения тока нагрузки $I_H=I_3$ в схеме (рисунок 1) **методом эквивалентного генератора напряжения** собрать схему электрической цепи (рисунок 3).

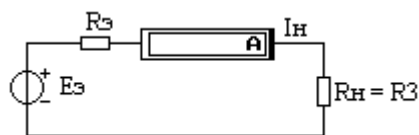


Рисунок 3

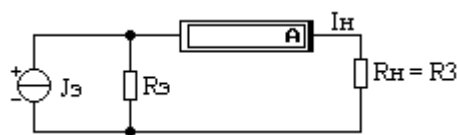


Рисунок 4

Кнопку (0-1) перевести в положение «(1)». По завершении автоматических расчетов кнопку (0-1) перевести в положение «(0)». Показания амперметра I_n занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

7. Для определения тока I_3 в схеме (рисунок 1) **методом эквивалентного генератора** тока собрать схему электрической цепи (рисунок 4).

Кнопку (0-1) перевести в положение «(1)». По завершении автоматических расчетов кнопку (0-1) перевести в положение «(0)». Показания амперметра I_n занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

8. Сравнить результаты предварительных расчетов тока I_3 и I_n с результатами исследований. Сделать выводы.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- наименование работы;
- цель исследований;
- программу (задание) исследований;
- схемы исследований, выполненные по требованиям ГОСТов;
- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте принцип суперпозиции.
2. Поясните алгоритм расчета электрической цепи методом наложения.
3. Что такое ветвь электрической цепи?
4. Что понимают под схемой замещения электрической цепи?
5. Сформулируйте закон Ома для замкнутой одноконтурной цепи.
6. Сформулируйте обобщенный закон Ома.
7. Поясните алгоритм расчета электрической цепи методом эквивалентного генератора напряжения.
8. Поясните алгоритм расчета электрической цепи методом эквивалентного генератора тока.

Лабораторная работа №2

Исследование идеальных элементов электрических цепей синусоидального тока

Цель работы

- 1.1 Экспериментальное исследование электрической цепи с идеальным резистором.
- 1.2 Экспериментальное исследование электрической цепи с идеальной индуктивной катушкой.
- 1.3 Экспериментальное исследование электрической цепи с идеальным конденсатором.

Задание на подготовку к лабораторной работе

Ознакомиться с руководством к лабораторной работе.

Выполнить предварительный расчет тока в R-, L - и C – цепях, заданных согласно варианту (таблица 1), построить векторные диаграммы тока и напряжения.

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источник переменного напряжения (функциональный генератор), источник напряжения управляемый током, резистор, индуктивную катушку, конденсатор, осциллограф, амперметр и вольтметр. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов между током и напряжением.

Задание на исследование

1. Исследовать влияние параметров цепи с идеальным резистором на величину тока.
2. Исследовать влияние параметров цепи с идеальной индуктивной катушкой на величину тока.
3. Исследовать влияние параметров цепи с идеальным конденсатором на величину тока.

Порядок проведения исследований

Исследование цепи с идеальным резистором

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 1).

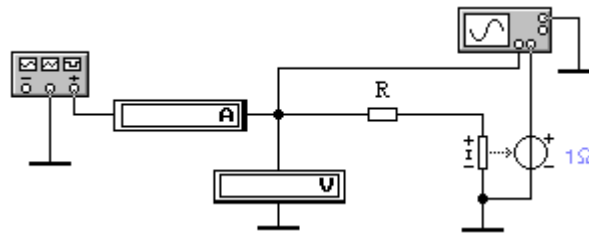


Рисунок 1- Схема исследования цепи с идеальным резистором

2. Установить заданные согласно варианту (таблица 1) величины сопротивления резистора R , значения амплитуды ЭДС и частоты $f=10$ кГц функционального генератора. Для чего к нужному элементу подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» вызвать окно (с именем элемента), в котором установить требуемое значение параметра.

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-Выключено». Показания амперметра и вольтметров занести в таблицу результатов исследований (таблица 2).

4. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить желательный цвет осциллограммы.

Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на изображении осциллографа активизировать его. Установить на панели управления переключатели TIME BASE 0.01 ms/div, CHANNEL A 5v/Div, CHANNEL B 1v/Div. Перевести осциллограф в режим «Zoom». Установить визирную линейку 1 (красного цвета) в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "А" при ее переходе от отрицательного значения к положительному (осциллограмма напряжения $u(t)$), а визирную линейку 2 - в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "В" при ее переходе от отрицательного значения к положительному (осциллограмма тока $i(t)$). Значение временного промежутка T_2-T_1 занести в таблицу 2. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$. Здесь $T=1/f$ - период синусоидальной ЭДС источника

5. Установить сопротивление резистора $0.5R$, выполнить п.п. 3-4.

6. Установить сопротивление резистора $2R$, выполнить п.п. 3-4.

7. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжения.

Таблица 1 - Варианты заданий для предварительного расчета и исследований

Вариант №	Е, В	R, Ом	L, мГн	С, мкФ	Вариант №	Е, В	R, Ом	L, мГн	С, мкФ
1	10	50	0.10	1.0	31	15	50	0.16	1.6
2	12	40	0.12	1.5	32	16	40	0.18	2.0
3	14	60	0.13	1.6	33	17	60	0.19	1.8
4	15	70	0.15	2.0	34	18	70	0.20	1.9
5	16	80	0.11	1.8	35	19	80	0.10	1.1
6	17	90	0.14	1.9	36	20	90	0.12	1.2
7	18	55	0.16	1.1	37	13	55	0.13	0.9
8	19	65	0.18	1.2	38	12	65	0.15	2.1
9	20	45	0.19	0.9	39	14	45	0.11	2.0
10	13	35	0.20	2.1	40	15	35	0.14	1.8
11	12	70	0.10	2.0	41	16	70	0.16	1.9
12	14	80	0.12	1.8	42	17	80	0.18	1.5
13	15	90	0.13	1.9	43	18	90	0.19	1.6
14	16	55	0.15	1.5	44	19	55	0.10	2.0
15	17	65	0.11	1.6	45	20	65	0.12	1.8
16	18	45	0.14	2.0	46	13	45	0.13	1.9
17	19	35	0.16	1.8	47	12	35	0.15	1.1
18	20	70	0.18	1.9	48	14	70	0.11	1.2
19	13	80	0.19	1.1	49	15	80	0.11	0.9
20	12	70	0.10	1.2	50	16	70	0.14	2.1
21	14	80	0.12	0.9	51	17	80	0.16	2.0
22	15	90	0.13	2.1	52	10	90	0.18	1.8
23	16	55	0.15	2.0	53	12	55	0.19	1.9
24	17	65	0.11	1.8	54	14	65	0.20	1.5
25	10	45	0.11	1.9	55	15	45	0.16	1.6
26	12	35	0.14	1.5	56	16	35	0.18	2.0
27	14	70	0.16	1.6	57	17	70	0.19	1.8
28	15	80	0.18	2.0	58	15	80	0.20	1.9
29	16	90	0.19	1.8	59	16	90	0.10	1.6
30	17	55	0.20	1.9	60	17	55	0.12	2.0

8. Устанавливая частоту источника 0.2f, 0.5f, 2f, 5f, выполнить п. 3-4.

Таблица 2- Результаты исследований идеальных элементов цепи синусоидального тока

Вид цепи	параметры	I, А	U, В	Z, Ом	T2-T1, с	φ, град
Идеальный резистор	R =					
	0.5 R=					
	2R=					
	0.2f =					
	0.5f =					
	2f =					
	5f =					
Идеальная индуктивная катушка	L=					
	0.5 L=					
	2L=					
	0.2f=					
	0.5f=					
	2f=					
	5f=					
Идеальный конденсатор	C=					
	0.5 C=					
	2C=					
	0.2f=					
	0.5f=					
	2f=					
	5f=					

Исследование цепи с идеальной индуктивной катушкой

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 2).

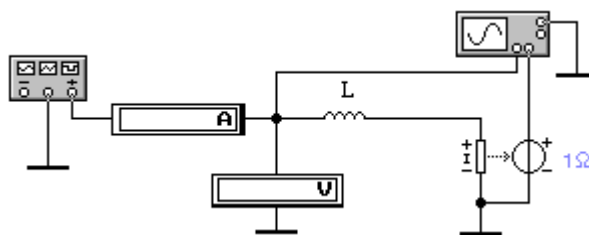


Рисунок 2 - Схема исследования цепи с идеальной индуктивной катушкой

2. Установить заданные согласно варианту (таблица 1) величину индуктивности катушки L , значение ЭДС источника E и частоты $f=10^4$ Гц. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить желательный цвет канала (например, красный)

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметра и вольтметров занести в таблицу результатов исследований (таблица 2).

4. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка T_2-T_1 и занести в таблицу 2. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$.

5. Установить индуктивность катушки $0.5L$, выполнить п.п. 3-4.

6. Установить индуктивность катушки $2L$, выполнить п.п. 3-4.

7. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжения.

8. Устанавливая частоту источника $0.2f$, $0.5f$, $2f$, $5f$, выполнить п.п. 3-4.

Исследование цепи с идеальным конденсатором

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 3).

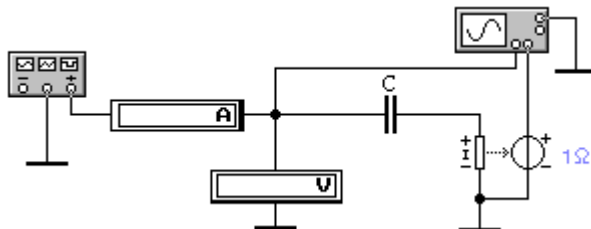


Рисунок 3- Схема исследования цепи с идеальным конденсатором

2. Установить заданные согласно варианту величину емкости конденсатора C , значение ЭДС источника E и частоты $f = 10^4$ Гц. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить желательный цвет канала (например, красный).

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметра и вольтметров занести в таблицу результатов исследований.

4. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка T_2-T_1 и занести в таблицу 2. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$.

5. Установить емкость конденсатора $0.5C$, выполнить п.п. 3-4.
6. Установить емкость конденсатора $2C$, выполнить п.п. 3-4.
7. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжений
8. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета.

Сделать выводы.

9. Устанавливая частоту источника $0.2f$, $0.5f$, $2f$, $5f$, выполнить п.3-4.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- схемы исследований;
- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;
- векторные диаграммы тока и напряжений
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы

1. Изобразите график тока $i(t) = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ мА.
2. Запишите выражение для комплексных амплитуды и действующего тока, если мгновенный ток $i(t) = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ мА.
3. Построить векторную диаграмму для гармонического тока $i = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ мА.
4. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с резистивным элементом и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.
5. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с индуктивным элементом и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.
6. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с емкостным элементом и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.
7. Что понимают под действующим током?
8. Назовите виды мощностей в цепи синусоидального тока
9. Каким образом определяется начальная фаза синусоидального тока?
10. Каким образом определяется сдвиг фаз между током и напряжением?

Лабораторная работа №3

Исследование неразветвленных электрических цепей синусоидального тока

Цель работы:

1. Экспериментальное исследование распределения напряжений в RL - цепи.
2. Экспериментальное исследование распределения напряжений в RC - цепи.
3. Экспериментальное исследование распределения напряжений в RLC - цепи.

Задание на подготовку к лабораторной работе:

- ознакомиться с руководством к лабораторной работе;
- выполнить предварительный расчет тока и напряжений в RL-, RC -и RLC – цепях, заданных согласно варианту (таблица 1), построить векторные диаграммы тока и напряжений.

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источник переменного напряжения, источник напряжения управляемый током, резистор, индуктивную катушку, конденсатор, осциллограф, амперметр и вольтметры. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов между током и напряжением.

Задание на исследование:

1. Исследовать распределение напряжений в RL - цепи.
2. Исследовать распределение напряжений в RC - цепи.
3. Исследовать распределение напряжений в RLC - цепи.

Таблица 1- Варианты заданий для предварительного расчета и исследований

Вариант №	E, В	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Вариант №	E, В	R, Ом	L, мГн	C, мкФ
1	100	50	0.10	0.010	31	150	50	0.16	0.015
2	120	40	0.12	0.015	32	160	40	0.18	0.016
3	140	60	0.13	0.016	33	170	60	0.19	0.020
4	150	70	0.15	0.020	34	180	70	0.20	0.018
5	160	80	0.11	0.018	35	190	80	0.10	0.019
6	170	90	0.14	0.019	36	200	90	0.12	0.011
7	180	55	0.16	0.011	37	130	55	0.13	0.012
8	190	65	0.18	0.012	38	120	65	0.15	0.009
9	200	45	0.19	0.009	39	140	45	0.11	0.021
10	130	35	0.20	0.021	40	150	35	0.14	0.020
11	120	70	0.10	0.020	41	160	70	0.16	0.018
12	140	80	0.12	0.018	42	170	80	0.18	0.019
13	150	90	0.13	0.019	43	180	90	0.19	0.011
14	160	55	0.15	0.011	44	190	55	0.10	0.012
15	170	65	0.11	0.012	45	200	65	0.12	0.009
16	180	45	0.14	0.009	46	130	45	0.13	0.021
17	190	35	0.16	0.021	47	120	35	0.15	0.020
18	200	70	0.18	0.020	48	140	70	0.11	0.018
19	130	80	0.19	0.018	49	150	80	0.11	0.010
20	120	70	0.10	0.010	50	160	70	0.14	0.015
21	140	80	0.12	0.015	51	170	80	0.16	0.016
22	150	90	0.13	0.016	52	100	90	0.18	0.020
23	160	55	0.15	0.020	53	120	55	0.19	0.018
24	170	65	0.11	0.018	54	140	65	0.20	0.009
25	100	45	0.11	0.009	55	150	45	0.16	0.021
26	120	35	0.14	0.021	56	160	35	0.18	0.020
27	140	70	0.16	0.020	57	170	70	0.19	0.018
28	150	80	0.18	0.018	58	150	80	0.20	0.019
29	160	90	0.19	0.019	59	160	90	0.10	0.011
30	170	55	0.20	0.011	60	170	55	0.12	0.015

Порядок проведения исследований

а) Исследование RL - цепи.

- 1.Собрать схему электрической цепи (рисунок 1).
- 2.Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R и индуктивности L , значения ЭДС E и частоты $f = 10^5$ Гц источника. Для чего к нужному элементу подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» вызвать окно (с именем элемента), в котором установить требуемое значение параметра. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить желательный цвет осциллограммы (например, красный)

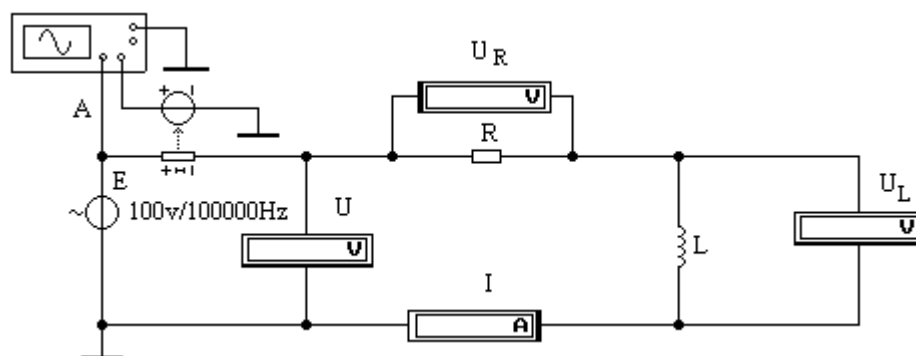


Рисунок 1 - Схема исследования RL - цепи.

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметра и вольтметров занести в таблицу результатов исследований

Таблица 2 - Результаты исследований неразветвленных цепей синусоидального тока

Вид цепи	параметры	I, A	U, B	U_R , B	U_L , B	U_C , B	T_2-T_1 , с	$\varphi(t)$, градусы
RL - цепь	$0.5L=$					-		
	$L=$					-		
	$2L=$					-		
RC - цепь	$0.5C=$				-			
	$C=$				-			
	$2C=$				-			
RLC- цепь	$C < C_{рез}$							
	$C_{рез}=$							
	$C > C_{рез}$							

4. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на изображении осциллографа активизировать его и перевести в режим «Zoom». Установить визирную линейку 1

(красного цвета) в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "А" при ее переходе от отрицательного значения к положительному (осциллограмма напряжения $u(t)$), а визирную линейку 2 - в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "В" при ее переходе от отрицательного значения к положительному (осциллограмма тока $i(t)$). Значение временного промежутка T_2-T_1 занести в таблицу 2. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi(t) = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi(t) = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$. Здесь $T=1/f$ - период синусоидальной ЭДС источника

5. Установить индуктивность катушки $0.5L$, выполнить п.п. 3-4.
6. Установить индуктивность катушки $2L$, выполнить п.п. 3-4.
7. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжений

б) Исследование RC - цепи.

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 2).

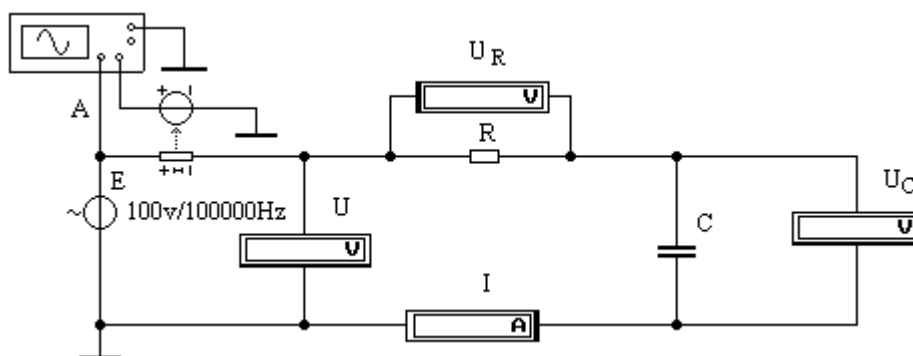


Рисунок 2- Схема исследования RC - цепи.

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R и емкости конденсатора C , значение ЭДС источника $E = 150V$ и частоты $f = 10^5$ Гц. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить желательный цвет канала (например, красный)

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметра и вольтметров занести в таблицу результатов исследований

4. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка T_2-T_1 и занести в таблицу 2. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi(t) = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi(t) = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$.

5. Установить емкость конденсатора $0.5C$, выполнить п.п. 3-4.
6. Установить емкость конденсатора $2C$, выполнить п.п. 3-4.
7. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжений
8. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета.

Сделать выводы.

в) Исследование RLC - цепи.

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 3).

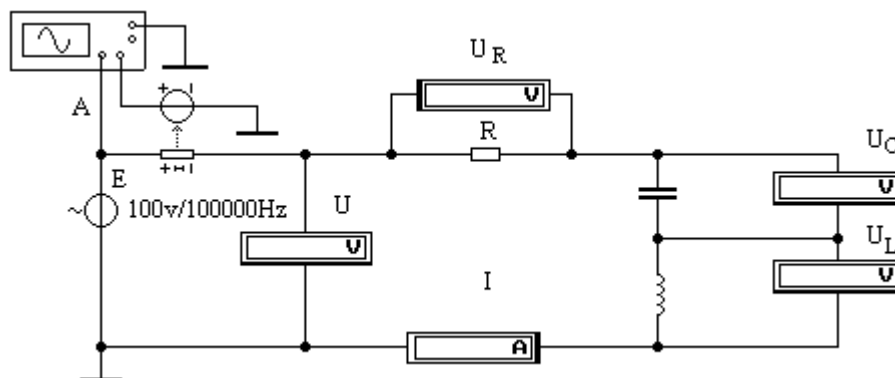


Рисунок 3- Схема исследования RLC - цепи.

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R , индуктивности L и емкости конденсатора $C_{рез} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 10^{10} \cdot L}$, значение ЭДС и частоты $f = 10^5$ Гц источника E

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметра и вольтметров занести в таблицу результатов исследований

4. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка $T_2 - T_1$ и занести в таблицу 2. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$.

5. Установить емкость конденсатора $C < C_{рез}$, выполнить п.п. 3-4.
6. Установить емкость конденсатора $C > C_{рез}$, выполнить п.п. 3-4.
7. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжений
8. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета.

Сделать выводы.

Содержание отчета.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- схемы исследований;
- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;
- векторные диаграммы тока и напряжений
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы:

1. Изобразите график тока $i(t) = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ mA.
2. Запишите выражение для комплексных амплитуды и действующего тока, если мгновенный ток $i(t) = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ mA.
3. Построить векторную диаграмму для гармонического тока $i = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ mA.
4. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с резистивным и индуктивным элементами и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.
5. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с резистивным и емкостным элементом и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.
6. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с резистивным, индуктивным и емкостным элементами и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.
7. Назовите признак и условие резонанса напряжений

Лабораторная работа №4

Исследование разветвленных электрических цепей синусоидального тока

Цель работы:

1. Экспериментальное исследование распределения токов в RL - цепи.
2. Экспериментальное исследование распределения токов в RC - цепи.
3. Экспериментальное исследование распределения токов в RLC - цепи.

Задание на подготовку к лабораторной работе:

- ознакомиться с руководством к лабораторной работе;
- выполнить предварительный расчет токов в RL-, RC -и RLC – цепях, заданных согласно варианту (таблица 1), построить векторные диаграммы токов и напряжения.

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источник переменного напряжения, источник напряжения, управляемый током, резистор, индуктивную катушку, конденсатор, осциллограф, амперметры и вольтметр. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов между током и напряжением на входе цепи.

Задание на исследование:

1. Исследовать распределение напряжений в RL - цепи.
2. Исследовать распределение напряжений в RC - цепи.
3. Исследовать распределение напряжений в RLC - цепи.

Таблица 1 - Варианты заданий для предварительного расчета и исследований

Вариант №	E, В	R, Ом	L, мГн	C, мкФ	Вариант №	E, В	R, Ом	L, мГн	C, мкФ
1	100	50	0.10	0.050	31	150	50	0.16	0.048
2	120	40	0.12	0.055	32	160	40	0.18	0.039
3	140	60	0.13	0.060	33	170	60	0.19	0.050
4	150	70	0.15	0.070	34	180	70	0.20	0.042
5	160	80	0.11	0.048	35	190	80	0.10	0.040
6	170	90	0.14	0.039	36	200	90	0.12	0.060
7	180	55	0.16	0.050	37	130	55	0.13	0.070
8	190	65	0.18	0.042	38	120	65	0.15	0.038
9	200	45	0.19	0.040	39	140	45	0.11	0.035
10	130	35	0.20	0.060	40	150	35	0.14	0.070
11	120	70	0.10	0.070	41	160	70	0.16	0.055
12	140	80	0.12	0.038	42	170	80	0.18	0.060
13	150	90	0.13	0.044	43	180	90	0.19	0.070
14	160	55	0.15	0.070	44	190	55	0.10	0.048
15	170	65	0.11	0.055	45	200	65	0.12	0.039
16	180	45	0.14	0.060	46	130	45	0.13	0.050
17	190	35	0.16	0.070	47	120	35	0.15	0.042
18	200	70	0.18	0.048	48	140	70	0.11	0.040
19	130	80	0.19	0.039	49	150	80	0.11	0.060
20	120	70	0.10	0.050	50	160	70	0.14	0.070
21	140	80	0.12	0.042	51	170	80	0.16	0.038
22	150	90	0.13	0.040	52	100	90	0.18	0.044
23	160	55	0.15	0.060	53	120	55	0.19	0.070
24	170	65	0.11	0.070	54	140	65	0.20	0.055
25	100	45	0.11	0.038	55	150	45	0.16	0.060
26	120	35	0.14	0.035	56	160	35	0.18	0.070
27	140	70	0.16	0.070	57	170	70	0.19	0.048
28	150	80	0.18	0.055	58	150	80	0.20	0.039
29	160	90	0.19	0.060	59	160	90	0.10	0.050
30	170	55	0.20	0.070	60	170	55	0.12	0.042

Порядок проведения исследований

а) Исследование RL - цепи.

1. Собрать схему электрической цепи (рис. 1).

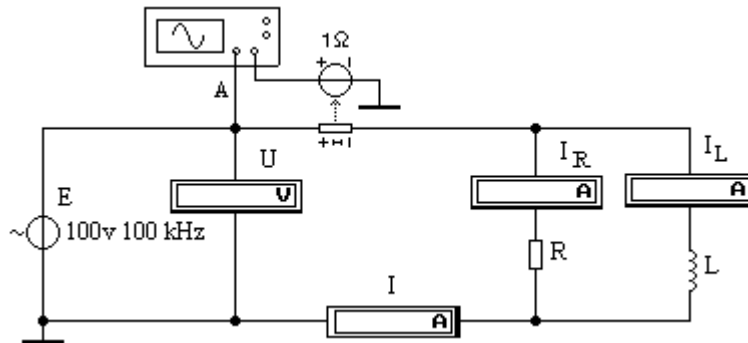


Рисунок 1- Схема исследования RL - цепи.

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R и индуктивности L , значения ЭДС E и частоты $f = 10^5$ Гц источника. Для чего к нужному элементу подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» вызвать окно (с именем элемента), в котором установить требуемое значение параметра. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить желательный цвет осциллограммы (например, красный)

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметров и вольтметра занести в таблицу результатов исследований (таблица 2)

4. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на изображении осциллографа активизировать его и перевести в режим «Zoom». Установить визирную линейку 1 (красного цвета) в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "А" при ее переходе от отрицательного значения к положительному (осциллограмма напряжения $u(t)$), а визирную линейку 2 - в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "В" при ее переходе от отрицательного значения к положительному (осциллограмма тока $i(t)$). Значение временного промежутка $T_2 - T_1$ занести в таблицу 2. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$ или $\varphi = 360^\circ \frac{T_2 - T_1}{T}$. Здесь $T = 1/f$ - период синусоидальной ЭДС источника.

5. Установить индуктивность катушки $0.5L$, выполнить п.п. 3-4.

6. Установить индуктивность катушки $2L$, выполнить п.п. 3-4.

7. По результатам исследований построить векторные диаграммы токов и напряжения

Таблица 2 - Результаты исследований разветвленных цепей синусоидального тока

Вид цепи	параметры	U, В	I, А	IR, А	IL, А	IC, А	T2-T1, с	φ , градус
RL - цепь	0.5L=					-		
	L=					-		
	2L=					-		
RC - цепь	0.5C=				-			
	C=				-			
	2C=				-			
RLC-цепь	C<Cрез							
	Cрез=							
	C>Cрез							

б) Исследование RC - цепи.

1.Собрать схему электрической цепи (рис. 2).

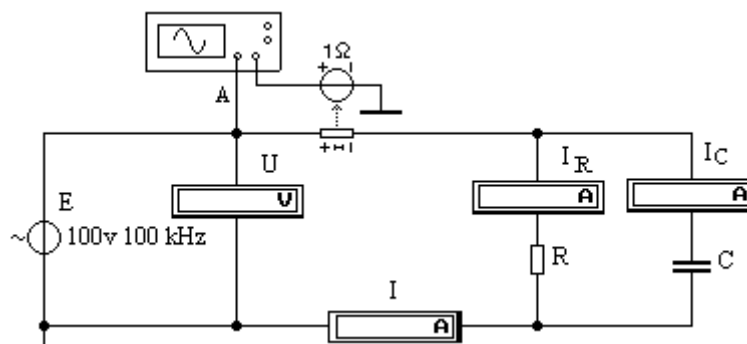


Рисунок 2- Схема исследования RC - цепи.

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R и емкости конденсатора C, значение ЭДС источника $E = 150\text{В}$ и частоты $f = 10^5$ Гц. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить желательный цвет канала (например, красный)

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметров и вольтметра занести в таблицу результатов исследований

4. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка T2-T1 и занести в таблицу 2. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением $u(t)$ и током $i(t)$ в градусах по формуле $\varphi = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$.

5. Установить емкость конденсатора 0.5C, выполнить п.п. 3-4.

6. Установить емкость конденсатора 2C, выполнить п.п. 3-4.

7. По результатам исследований построить векторные диаграммы токов и напряжений
 8. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета.
- Сделать выводы.

в) Исследование RLC - цепи.

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 3).

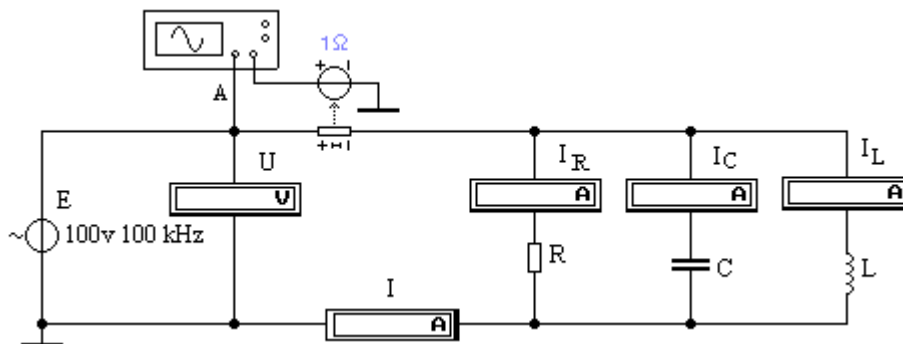


Рисунок 3 - Схема исследования RLC – цепи

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R, индуктивности L и емкости конденсатора, при которой в цепи наступит резонанс токов

$$C_{\text{рез}} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot 10^{10} \cdot L}, \text{ значение ЭДС и частоты } f = 10^5 \text{ Гц источника E}$$

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов (несколько секунд) кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания амперметров и вольтметра занести в таблицу результатов исследований

4. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка T2-T1 и занести в таблицу 2. Рассчитать сдвиг фаз между напряжением u(t) и током i(t) в градусах по формуле $\varphi = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$.

5. Установить емкость конденсатора $C < C_{\text{рез}}$, выполнить п.п. 3-4.

6. Установить емкость конденсатора $C > C_{\text{рез}}$, выполнить п.п. 3-4.

7. По результатам исследований построить векторные диаграммы тока и напряжений

8. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета.

Сделать выводы.

Содержание отчета.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- схемы исследований;

- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;
- векторные диаграммы токов и напряжения для каждого пункта исследований;
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы:

1. Изобразите график тока $i(t) = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ mA.
2. Запишите выражение для комплексных амплитуды и действующего тока, если мгновенный ток $i(t) = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ mA.
3. Построить векторную диаграмму для гармонического тока $i = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ mA.
4. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с резистивным элементом и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.
5. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с индуктивным элементом и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.
6. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с емкостным элементом и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.

Лабораторная работа №5

Исследование трехфазных цепей

Цель работы: 1. Экспериментальное исследование трехфазных цепей при симметричной и несимметричной нагрузках.

2. Экспериментальное исследование трехфазных цепей в аварийных режимах.

Задание на подготовку к лабораторной работе:

- ознакомиться с руководством к лабораторной работе;
- выполнить предварительный расчет согласно варианту задания (таблица 1):

Рассчитать токи, напряжения и мощность в трехфазной цепи с несимметричным приемником, фазы которого соединены звездой. Выполнить расчеты токов при обрыве нейтрального провода. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источники переменного напряжения, резисторы, осциллограф, вольтметры и амперметры. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов гармонического напряжения.

Задание на исследование:

1. Исследовать трехфазную цепь с симметричным и несимметричным приемником, фазы которого соединены по схеме звезда с нейтральным проводом. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

2. Исследовать трехфазную цепь с симметричным и несимметричным приемником при обрыве нейтрального провода. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

3. Исследовать трехфазную цепь с несимметричным приемником при обрыве линейного провода. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

4. Исследовать трехфазную цепь с несимметричным приемником при коротком замыкании фазы. Построить векторные диаграммы токов и напряжений

Таблица 1 - Варианты заданий для предварительного расчета и исследований

Вариант №	Ул, В	Ra, Ом	Rb, Ом	Rc, Ом
1	360	10	15	20
2	120	20	15	30
3	150	50	40	30
4	170	60	40	20

5	225	80	60	50
6	300	50	25	30
7	100	20	35	40
8	110	60	30	45
9	125	50	80	70
10	220	20	25	30
11	360	10	15	20
12	120	20	15	30
13	150	50	40	30
14	170	60	40	20
15	225	80	60	50
16	300	80	60	50
17	100	50	25	30
18	110	20	35	40
19	125	60	30	45
20	220	50	80	70
21	360	20	25	30
22	120	10	15	20
23	150	20	15	30
24	170	50	40	30
25	225	60	40	20
26	300	80	60	50
27	100	80	60	50
28	110	20	25	30
29	125	10	15	20
30	220	20	15	30
31	360	50	40	30
32	120	60	40	20
33	150	80	60	50
34	200	60	80	65
35	300	30	25	35
36	100	20	15	25

Порядок проведения исследований

а) Исследование трехфазной цепи соединение фаз приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»

1.Собрать схему электрической цепи (рисунок 1).

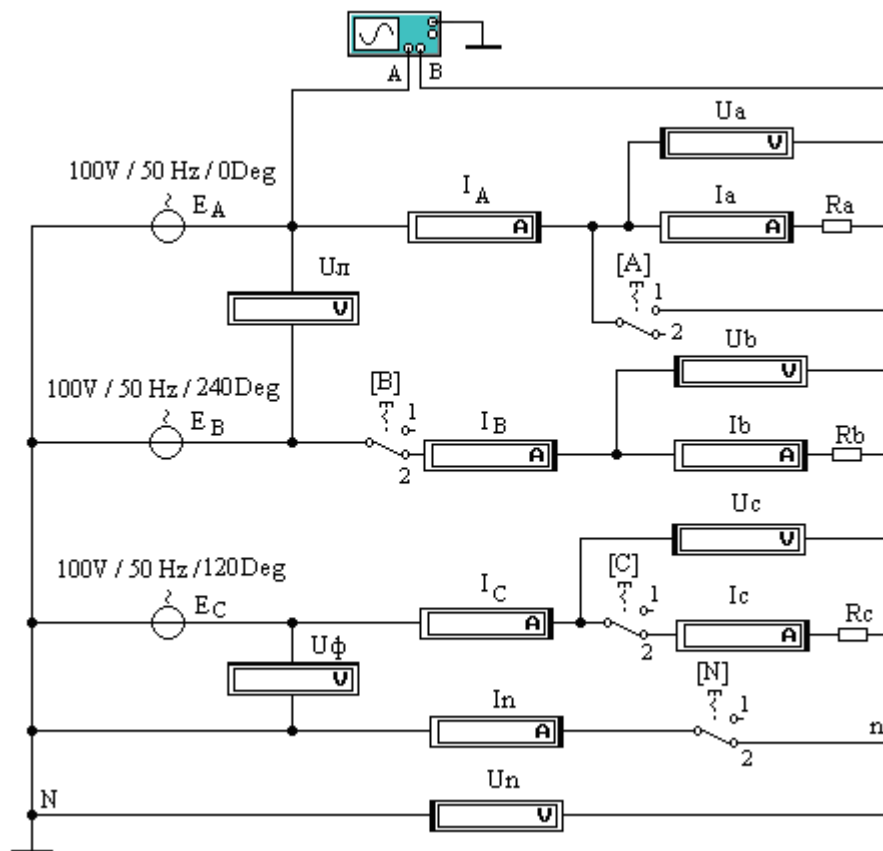


Рисунок 1 - Схема трехфазной цепи соединение по схеме «звезда»

2. Установить заданные согласно варианту значения ЭДС фаз, частоты, начальные фазы источников, величины сопротивлений фаз приемников $R_A=R_B=R_C$ (симметричная нагрузка). Для чего к нужному элементу подводится курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» вызывается окно (с именем элемента), в котором устанавливается требуемое значение параметра и нажимается кнопка «Асепт». Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала А осциллографа установить красный цвет канала, а на линии канала В – синий.

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1», расположенную в правом верхнем углу экрана перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов кнопка  переводится в положение 0-«Выключено». Показания амперметров и вольтметров заносятся в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

Таблица 1 - Результаты расчетов и исследований трехфазной цепи (соединение фаз приемника по схеме звезда)

Схема цепи	Режимы цепи		Напряжения сети, В				Линейные токи, А			Токи в фазах приемника, А			Напряжения на фазах приемника, В		
			U_L	U_ϕ	U_n	I_n	I_A	I_B	I_C	I_a	I_b	I_c	U_a	U_b	U_c
Звезда с нейтральным проводом	Симметричная нагрузка	расчет													
		эксперимент													
Звезда без нейтрального провода	Симметричная нагрузка	расчет													
		эксперимент													
Звезда с нейтральным проводом	Несимметричная нагрузка	расчет													
		эксперимент													
	Обрыв фазы приемника «с»	расчет													
		эксперимент													
	Обрыв линейного провода «В»	расчет													
		эксперимент													
Звезда без нейтрального провода	Несимметричная нагрузка	расчет													
		эксперимент													
	Короткое замыкание фазы «а» приемника	расчет													
		эксперимент													
	Обрыв фазы «с» приемника	расчет													
		эксперимент													
	Обрыв линейного провода «В»	расчет													
		эксперимент													

4. По результатам измерений построить векторные диаграммы токов и напряжений.
5. В схеме электрической цепи (рис. 1) переключатель N перевести в положение 1 (нажать на клавиатуре клавишу N).
6. Выполнить п. 3, 4.
7. Сделать выводы по результатам исследований.
8. В схеме цепи (рис. 1) переключатель N перевести в положение 2

9. Установить заданные согласно варианту значения сопротивлений фаз приемников R_a, R_b, R_c (несимметричная нагрузка).

10. Выполнить п. 3, 4, 7.

11. В схеме электрической цепи (рис. 1) переключатель С перевести в положение 1 (нажать на клавиатуре клавишу С). В схеме - обрыв фазы С.

12. Выполнить п. 3, 4, 7.

13. В схеме электрической цепи (рис. 1) переключатель С перевести в положение 2 и отключить линейный провод В (переключатель В перевести в положение 1).

14. Выполнить п. 3, 4, 7.

15. Переключатель В перевести в положение 2.

б) Исследование трехфазной цепи соединение фаз приемника по схеме «звезда без нейтрального провода».

1. В схеме цепи (рис. 1) переключатель N перевести в положение 1 (нажать на клавиатуре клавишу N).

2. Кнопку (0-1) перевести в положение (1). По завершении автоматических расчетов кнопка (0-1) переводится в положение (0). Показания амперметров и вольтметров заносятся в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

3. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на изображении осциллографа активизировать его и перевести в режим «Zoom». Установить визирную линейку 1 (красного цвета) в точку пересечения оси времени осциллограммой канала А при ее переходе от отрицательного значения к положительному, а визирную линейку 2 (синего цвета) - в точку пересечения оси времени осциллограммой канала В при ее переходе от отрицательного значения к положительному. В правом нижнем окошке осциллографа появится значение временного промежутка $T_2 - T_1$. Фазовый сдвиг между напряжениями U_A и U_n в градусах рассчитать по формуле $\psi_{12} = -360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$. Здесь f - частота синусоидальной ЭДС источника.

4. По результатам измерений построить векторные диаграммы токов и напряжений.

5. Сделать выводы по результатам исследований.

Исследование трехфазной цепи соединение фаз приемника по схеме «звезда без нейтрального провода» при коротком замыкании одной из фаз.

6. В схеме электрической цепи (рис. 1) переключатель А перевести в положение 1 (нажать на клавиатуре клавишу А)

7. Выполнить п. 3, 4, 5.
8. Переключатель А перевести в положение 2

Исследование трехфазной цепи соединение фаз приемника по схеме «звезда» при обрыве фазы приемника

9. В схеме цепи (рис. 1) переключатель С перевести в положение 1 (нажать на клавиатуре клавишу С).

10. Выполнить п. 2, 3, 4, 5.
11. переключатель С перевести в положение 2

Исследование трехфазной цепи соединение фаз приемника по схеме «звезда» при обрыве линейного провода

10. В схеме электрической цепи (рис. 2) переключатель В перевести в положение 1 (нажать на клавиатуре клавишу В).

11. Выполнить п. 2, 3, 4, 5.

Содержание отчета.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- схемы исследований;
- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы:

1. Назовите преимущества трехфазной системы токов и напряжений
2. При каких условиях трехфазная система является симметричной?
3. Каким образом рассчитываются токи в несимметричном приемнике, фазы которого соединены по схеме звезда с нейтральным проводом?
4. Каким образом рассчитываются токи в несимметричном приемнике, фазы которого соединены по схеме звезда без нейтрального провода?
5. Какую роль выполняет нейтральный провод в трехфазной системе?
6. Каким образом рассчитывается напряжение смещения нейтрали (U_n) при несимметричном приемнике, фазы которого соединены по схеме звезда без нейтрального провода?

Исследование частотных характеристик апериодических цепей

Цель работы:

1. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик электрических цепей первого порядка
2. Экспериментальное исследование частотных характеристик электрических цепей второго порядка.
- 3.

Задание на подготовку к лабораторной работе:

- выполнить предварительный расчет согласно варианту задания (таблица 1):

- а) амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) низкочастотного звена первого порядка (НЧ-1) и построить их графики.
- б) амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) высокочастотного звена первого порядка (ВЧ-1) и построить их графики.
- в) амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик полосового звена (ПЗ) и построить графики.

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источники переменного напряжения, резисторы, конденсаторы, осциллограф, вольтметры. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов гармонических напряжений.

Задание на исследование:

1. Исследовать амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики низкочастотного звена первого порядка (НЧ-1) и построить их графики.
2. Исследовать амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики высокочастотного звена первого порядка (ВЧ-1) и построить их графики.
3. Исследовать амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики полосового звена (ПЗ) и построить графики.

Таблица 1 Варианты заданий для предварительного расчета и исследований

Вариант №	R1, кОм	C1, мкФ	R2, кОм	C2, мкФ	Вариант №	R1, кОм	C1, мкФ	R2, кОм	C2, мкФ
1	1.1	1.0	10	0.2	31	1.0	2.0	20	0.3
2	1.2	2.0	15	0.1	32	1.2	0.1	30	0.4
3	1.5	0.1	20	2.0	33	1.5	0.2	40	0.4
4	1.7	0.2	30	1.0	34	1.7	0.8	25	0.7
5	2.5	0.8	40	0.5	35	2.5	5.0	35	0.1
6	3.0	5.0	25	0.3	36	3.0	2.0	30	0.2
7	1.0	2.0	35	0.4	37	1.0	6.0	80	0.3
8	1.1	6.0	30	0.4	38	1.1	5.0	25	0.4
9	1.2	5.0	80	0.7	39	1.2	2.0	15	0.2
10	2.2	2.0	25	0.1	40	2.2	1.0	15	1.0
11	3.6	1.0	15	0.2	41	3.6	2.0	40	1.1
12	1.2	2.0	15	0.3	42	1.2	5.0	50	1.2
13	1.5	5.0	40	0.4	43	1.5	6.0	60	2.2
14	1.7	6.0	50	0.2	44	1.7	1.0	60	3.6
15	2.5	1.0	60	1.0	45	2.5	1.1	25	1.2
16	3.0	1.1	60	1.1	46	3.0	1.2	35	1.5
17	1.0	1.2	25	1.2	47	1.0	2.2	30	1.7
18	1.1	2.2	35	2.2	48	1.1	3.6	80	2.5
19	1.2	3.6	30	3.6	49	1.2	2.0	25	3.0
20	2.2	1.2	80	1.2	50	2.2	0.1	15	1.0
21	3.6	1.5	25	1.5	51	1	0.2	15	1.1
22	1.2	1.7	15	1.7	52	1.2	0.8	40	1.2
23	1.5	2.5	15	2.5	53	1.5	5.0	40	2.2
24	1.7	3.0	40	3.0	54	1.7	2.0	60	0.3
25	2.5	1.0	40	1.0	55	2.5	6.0	60	0.4
26	3.0	1.1	60	1.1	56	3.0	5.0	20	0.4
27	1.0	1.2	60	1.2	57	1.0	2.0	30	0.7
28	1.1	2.2	25	2.2	58	1.1	1.0	40	0.1
29	1.2	3.6	15	3.6	59	1.2	2.0	25	0.2
30	2.2	1.2	15	1.2	60	2.2	5.0	35	0.3

Порядок проведения исследований

а) Исследование амплитудно-частотных фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) низкочастотного звена первого порядка (НЧ-1)

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 1).

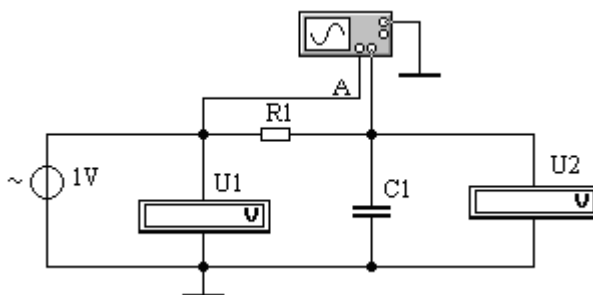


Рисунок 1-Схема исследования частотных характеристик НЧ-1

2. Рассчитать $f_{гр} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R1 \cdot C1}$. Заполнить строку 2 таблицы 2.

Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R1 и емкости конденсатора C1, значение ЭДС источника E=1В и его частоты $f = 0.01f_{гр}$. Перевести вольтметры в режим измерения переменного тока. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить красный цвет, на линии канала "В" – синий.

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания вольтметров занести в таблицу результатов исследований

Таблица 2 - Результаты исследований низкочастотного звена НЧ-1

f/f _{гр}	0.01	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
f, Гц														
U ₂ , В														
U ₁ , В														
H(f)														
T2-T1, с														
ψ(f), градус														

4. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на изображении осциллографа активизировать его и перевести в режим «Zoom». Установить визирную линейку 1 (красного цвета) в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "А" при ее переходе от отрицательного значения к положительному, а визирную линейку 2 - в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "В" при ее переходе от отрицательного

значения к положительному. Значение временного промежутка $T_2 - T_1$ занести в таблицу 2. Рассчитать фазовый сдвиг между напряжениями U_2 и U_1 в градусах по формуле $\psi(f) = -360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$. Здесь f - частота синусоидальной ЭДС источника.

5. Изменяя частоту f источника согласно таблице 2 выполнить п.п. 3-4.
6. По результатам исследований построить графики АЧХ и ФЧХ звена НЧ-1

б) Исследование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) высокочастотного звена первого порядка (ВЧ-1)

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 2).

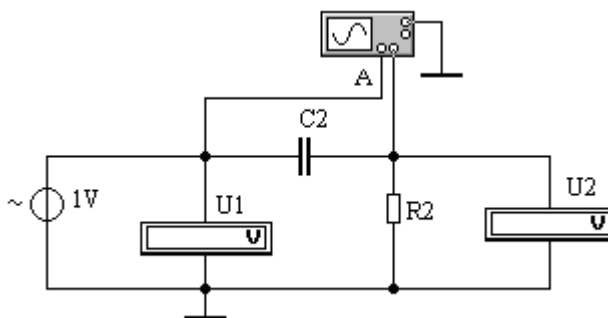


Рисунок 2 - Схема исследования частотных характеристик ВЧ-1

2. Рассчитать $f_{rp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2}$. Заполнить строку 2 таблицы расчетных и экспериментальных данных.

3. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R_2 и емкости конденсатора C_2 , значение ЭДС источника $E=1V$ и частоты $f = 0.01f_{rp}$.

4. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1», расположенную в правом верхнем углу экрана перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания вольтметров занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

5. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка $T_2 - T_1$. Рассчитать и занести в таблицу фазовый сдвиг между напряжениями U_2 и U_1 в градусах по формуле $\psi(f) = -360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$.

6. Изменяя частоту f источника согласно таблице 2 выполнить п.п. 4-5.
7. По результатам исследований построить графики АЧХ и ФЧХ звена ВЧ-1

в) Исследование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) полосового звена

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 3).

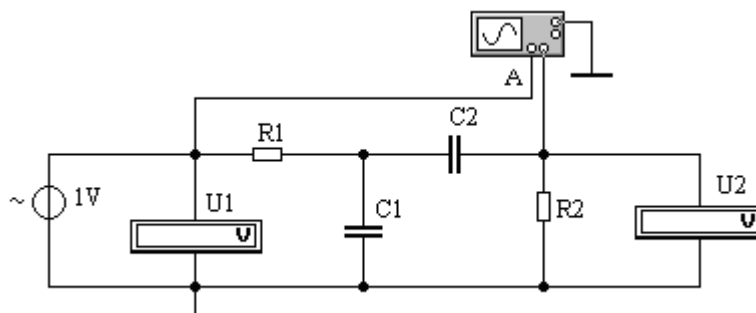


Рисунок 3 - Схема исследования частотных характеристик полосового звена

2. Рассчитать $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 \cdot C_1 \cdot R_2 \cdot C_2}}$.

Заполнить строку 2 таблицы расчетных и экспериментальных данных.

3. Установить заданные согласно варианту величины сопротивлений резисторов R_1 , R_2 и емкостей конденсаторов C_1 , C_2 , значение ЭДС источника $E = 1V$ и частоты $f = 0.01f_0$.

4. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1», расположенную в правом верхнем углу экрана перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания вольтметров занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

5. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка $T_2 - T_1$. Рассчитать фазовый сдвиг между напряжениями U_2 и U_1 в градусах по формуле $\psi(f) = -360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$

6. Изменяя частоту f источника согласно таблице выполнить п.п. 4-5.

7. По результатам исследований построить графики АЧХ и ФЧХ полосового звена. По графику АЧХ определить полосу пропускания. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета. Сделать выводы.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- схемы исследований;
- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;

- графики АЧХ и ФЧХ звеньев;
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы:

1. Изобразите схему низкочастотного звена первого порядка.
2. Дайте определение комплексной передаточной характеристики цепи.
3. Запишите выражение для комплексной передаточной функции низкочастотного звена первого порядка.
4. Дайте определение амплитудно-частотной характеристики цепи.
5. Изобразите графики амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик низкочастотного звена первого порядка.
6. Каким образом по графику амплитудно-частотной характеристики низкочастотного звена первого порядка можно определить граничную частоту?
7. Запишите выражение для комплексной передаточной функции полосового звена.
8. Каким образом по графику амплитудно-частотной характеристики полосового звена можно определить граничные частоты?

Исследование частотных характеристик одиночных колебательных контуров

Цель работы:

1. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик последовательного колебательного контура
2. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик параллельного колебательного контура

Задание на подготовку к лабораторной работе:

- выполнить предварительный расчет согласно варианту задания (таблица 1):
 - а) амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) последовательного колебательного контура и построить их графики.
 - б) амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) параллельного колебательного контура и построить их графики.

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источники переменного напряжения, резисторы, конденсаторы, осциллограф, вольтметры. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов гармонических напряжений.

Задание на исследование:

1. Исследовать амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики последовательного колебательного контура и построить их графики.
2. Исследовать амплитудно-частотные и фазочастотные характеристики параллельного колебательного контура и построить их графики.

Таблица 1

Вариант №	R, Ом	L, мкГн	C, пФ	E, В	R _i , кОм
0	50	500	2000	10	10
1	10	300	2000	12	10
2	4	310	1600	7	8
3	7	200	1200	15	12
4	16	400	1700	11	9
5	5	360	2400	16	14
6	6	370	1650	5	15
7	8	250	1300	6	17
8	9	335	2400	14	18
9	3	400	2500	18	13
10	7	380	1700	13	10
11	10	390	2650	16	12
12	4	210	2250	22	16
13	7	200	1260	17	8
14	16	400	1520	25	12
15	5	360	2270	10	9
16	6	330	1240	12	14
17	8	250	1465	15	15
18	9	435	1300	16	17
19	3	630	2400	17	18
20	6	425	1700	12	13
21	10	300	2450	14	12
22	7	200	1600	10	7
23	16	500	1200	12	12
24	5	360	2470	7	9
25	6	400	1630	15	14

Порядок проведения исследований

а) Исследование амплитудно-частотных фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) последовательного колебательного контура

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 1).

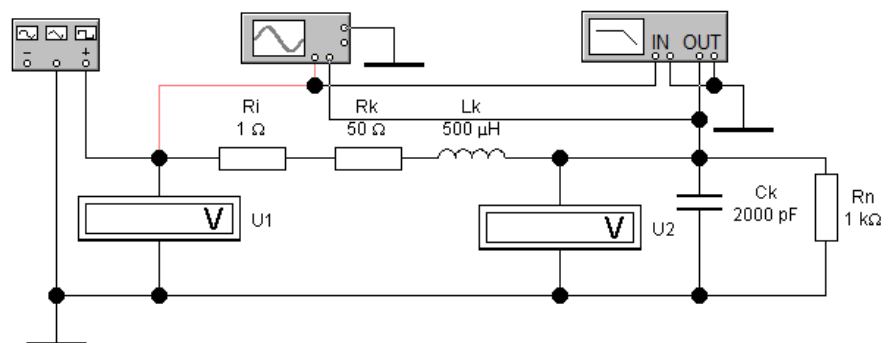


Рисунок 1 - Схема исследования частотных характеристик последовательного колебательного контура

2. Рассчитать $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_k \cdot C_k}}$. Заполнить строку 2 таблицы 2.

Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R1 и емкости конденсатора C1, значение ЭДС источника E=1В и его частоты $f = f_0$. Перевести вольтметры в режим измерения переменного тока. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала "А" осциллографа установить красный цвет, на линии канала "В" – синий.

3. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1» перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания вольтметров занести в таблицу результатов исследований

Таблица 2 - Результаты исследований последовательного колебательного контура

f, Гц						f ₀ =							
U ₂ , В		0.1U _{2max}			0.7U _{2max}	U _{2max}		0.7U _{2max}				0.1U _{2max}	
U ₁ , В													
H(f)													
T2-T1, с													
ψ(f), градус													

4. Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на изображении осциллографа активизировать его и перевести в режим «Zoom». Установить визирную линейку 1 (красного цвета) в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "А" при ее переходе от отрицательного значения к положительному, а визирную линейку 2 - в точку пересечения оси времени осциллограммой канала "В" при ее переходе от отрицательного значения к положительному. Значение временного промежутка T2-T1 занести в таблицу 2. Рассчитать фазовый сдвиг между напряжениями U₂ и U₁ в градусах по формуле $\psi(f) = -360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$. Здесь f - частота синусоидальной ЭДС источника.

5. Изменяя частоту f источника согласно таблице 2 выполнить п.п. 3-4.

6. По результатам исследований построить графики АЧХ и ФЧХ.

б) Исследование амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) параллельного колебательного контура

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 2).

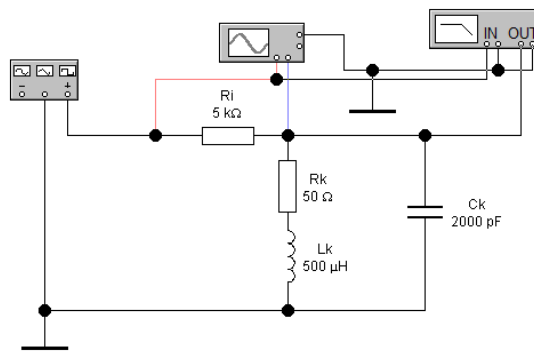


Рисунок 2 - Схема исследования частотных характеристик параллельного колебательного контура

2. Рассчитать $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_k \cdot C_k}}$. Заполнить строку 2 таблицы расчетных и экспериментальных данных.

3. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R2 и емкости конденсатора C2, значение ЭДС источника E=1В и частоты $f = f_0$.

4. После завершения установки всех параметров схемы кнопку  - «0-1», расположенную в правом верхнем углу экрана перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов кнопку  перевести в положение 0-«Выключено». Показания вольтметров занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

5. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка T2-T1. Рассчитать и занести в таблицу фазовый сдвиг между напряжениями U_2 и U_1 в градусах по формуле $\psi(f) = -360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$.

6. Изменяя частоту f источника согласно таблице 2 выполнить п.п. 4-5.

7. По результатам исследований построить графики АЧХ и ФЧХ

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- схемы исследований;
- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;
- графики АЧХ и ФЧХ контуров;
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы:

Изобразите схему параллельного колебательного контура

1. Дайте определение комплексной передаточной характеристики цепи.

2. Запишите выражение для комплексной передаточной функции параллельного колебательного контура
3. Дайте определение амплитудно-частотной характеристики цепи.
4. Изобразите графики амплитудно-частотной и фазочастотной характеристик колебательного контура.
5. Каким образом по графику амплитудно-частотной характеристики контура можно определить полосу пропускания?

Исследование временных характеристик апериодических цепей

Цель работы:

1. Экспериментальное исследование переходных и импульсных характеристик электрических цепей первого порядка
2. Экспериментальное исследование переходных и импульсных характеристик электрических цепей второго порядка.

Задание на подготовку к лабораторной работе:

- выполнить предварительный расчет согласно варианту задания (таблица 1):

- а) переходной и импульсной характеристик низкочастотного звена первого порядка (НЧ-1) и построить их графики.
- б) переходной и импульсной характеристик высокочастотного звена первого порядка (ВЧ-1) и построить их графики.
- в) переходной и импульсной характеристик полосового звена (ПЗ) и построить графики.

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источники переменного напряжения, резисторы, конденсаторы, осциллограф, вольтметры. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов гармонических напряжений.

Задание на исследование:

1. Исследовать переходную и импульсную характеристики низкочастотного звена первого порядка (НЧ-1) и построить их графики.
2. Исследовать переходную и импульсную характеристики высокочастотного звена первого порядка (ВЧ-1) и построить их графики.
3. Исследовать переходную и импульсную характеристики полосового звена (ПЗ) и построить графики.

Таблица 1 Варианты заданий для предварительного расчета и исследований

Вариант №	R1, кОм	C1, мкФ	R2, кОм	C2, мкФ	Вариант №	R1, кОм	C1, мкФ	R2, кОм	C2, мкФ
1	1.1	1.0	10	0.2	31	1.0	2.0	20	0.3
2	1.2	2.0	15	0.1	32	1.2	0.1	30	0.4
3	1.5	0.1	20	2.0	33	1.5	0.2	40	0.4
4	1.7	0.2	30	1.0	34	1.7	0.8	25	0.7
5	2.5	0.8	40	0.5	35	2.5	5.0	35	0.1
6	3.0	5.0	25	0.3	36	3.0	2.0	30	0.2
7	1.0	2.0	35	0.4	37	1.0	6.0	80	0.3
8	1.1	6.0	30	0.4	38	1.1	5.0	25	0.4
9	1.2	5.0	80	0.7	39	1.2	2.0	15	0.2
10	2.2	2.0	25	0.1	40	2.2	1.0	15	1.0
11	3.6	1.0	15	0.2	41	3.6	2.0	40	1.1
12	1.2	2.0	15	0.3	42	1.2	5.0	50	1.2
13	1.5	5.0	40	0.4	43	1.5	6.0	60	2.2
14	1.7	6.0	50	0.2	44	1.7	1.0	60	3.6
15	2.5	1.0	60	1.0	45	2.5	1.1	25	1.2
16	3.0	1.1	60	1.1	46	3.0	1.2	35	1.5
17	1.0	1.2	25	1.2	47	1.0	2.2	30	1.7
18	1.1	2.2	35	2.2	48	1.1	3.6	80	2.5
19	1.2	3.6	30	3.6	49	1.2	2.0	25	3.0
20	2.2	1.2	80	1.2	50	2.2	0.1	15	1.0
21	3.6	1.5	25	1.5	51	1	0.2	15	1.1
22	1.2	1.7	15	1.7	52	1.2	0.8	40	1.2
23	1.5	2.5	15	2.5	53	1.5	5.0	40	2.2
24	1.7	3.0	40	3.0	54	1.7	2.0	60	0.3
25	2.5	1.0	40	1.0	55	2.5	6.0	60	0.4
26	3.0	1.1	60	1.1	56	3.0	5.0	20	0.4
27	1.0	1.2	60	1.2	57	1.0	2.0	30	0.7
28	1.1	2.2	25	2.2	58	1.1	1.0	40	0.1
29	1.2	3.6	15	3.6	59	1.2	2.0	25	0.2
30	2.2	1.2	15	1.2	60	2.2	5.0	35	0.3

Порядок проведения исследований

а) Исследование переходной и импульсной характеристик низкочастотного звена первого порядка (НЧ-1)

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 1).

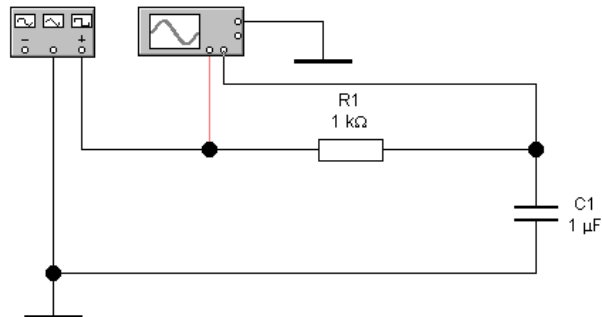
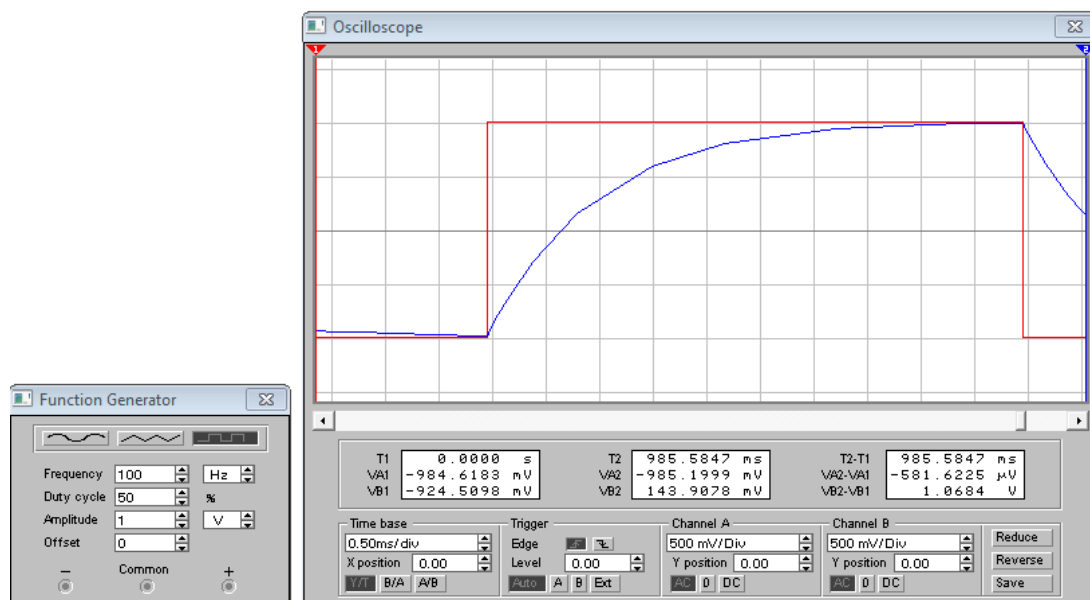


Рисунок 1-Схема исследования временных характеристик НЧ-1

2. Установить параметры генератора и осциллографа согласно рисунку 2.



3. Снять осциллограмму переходной характеристики. По графику переходной характеристики определить постоянную времени цепи, длительность переходного процесса.
4. Сопротивление $R1$ увеличить в 2 раза. Повторить п.3
5. Сопротивление $R1$ уменьшить в 2 раза. Повторить п.3
6. Сделать вывод о влиянии $R1$ на временную характеристику цепи
7. Установить на генераторе скважность импульсов 0.1%
8. Снять осциллограмму импульсной характеристики. По графику импульсной характеристики определить постоянную времени цепи, длительность переходного процесса.
9. Повторить п. 4-6

б) Исследование временных характеристик высокочастотного звена первого порядка (ВЧ-1)

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 2).

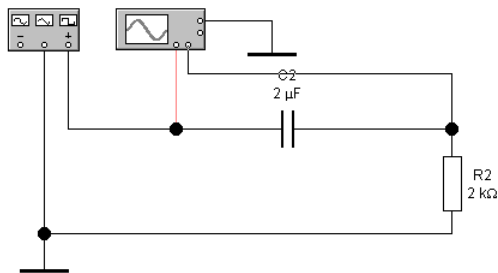


Рисунок 2 - Схема исследования временных характеристик ВЧ-1

2. Повторить п. 3-9

в) Исследование временных характеристик полосового звена

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 3).

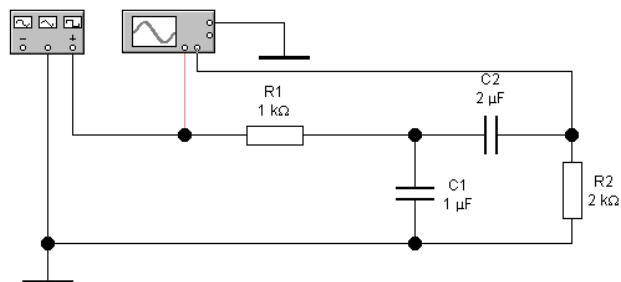


Рисунок 3 - Схема исследования временных характеристик полосового звена

2. Повторить п. 3-9

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- схемы исследований;
- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;
- графики временных характеристик звеньев;
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы:

1. Изобразите схему низкочастотного звена первого порядка.
2. Изобразите схему высокочастотного звена первого порядка.
3. Дайте определение переходной характеристики цепи.

4. Запишите выражение для переходной характеристики низкочастотного звена первого порядка.
5. Дайте определение импульсной характеристики цепи.
6. Запишите выражение для импульсной характеристики низкочастотного звена первого порядка.

Лабораторная работа № 9

Исследование четырехполюсников

Цель работы:

1. Экспериментальное определение первичных параметров четырехполюсников.
2. Экспериментальное определение вторичных параметров четырехполюсников.
3. Экспериментальное исследование четырехполюсников при согласованной и несогласованной нагрузках.

Задание на подготовку к лабораторной работе:

1. Ознакомиться с руководством к лабораторной работе;
2. Выполнить предварительный расчет согласно варианту задания (таблица 1):
 - 2.1. Рассчитать А-параметры четырехполюсников.
 - 2.2. Рассчитать вторичные параметры четырехполюсников.
 - 2.3. Рассчитать рабочие параметры четырехполюсников.

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источники переменного напряжения, резисторы, осциллограф, вольтметры и амперметры. Осциллограф используется для определения фазовых сдвигов гармонического напряжения.

Задание на исследование:

- а) Определить А-параметры заданных четырехполюсников.
- б) Определить вторичные (характеристические) параметры заданных четырехполюсников.
- в) Исследовать рабочие параметры заданных четырехполюсников.

Таблица 1 - Варианты заданий для предварительного расчета и исследований

Вариант №	$E_g, В$	$f, кГц$	$R_1, Ом$	$C_2, мкФ$	$R_3, Ом$	$R_g, Ом$	$R_n, Ом$
0	100	10	10	3.183	10	10	20
1	110	12	15	2.9	15	12	25
2	120	14	20	3.1	20	18	30
3	130	16	25	2.2	25	20	26
4	140	18	20	2.5	20	11	28
5	150	20	30	2.6	30	13	20
6	160	11	26	2.8	26	15	10
7	170	13	28	3.5	28	17	20
8	180	15	20	3.0	20	19	30
9	190	17	10	2.7	10	18	26
10	200	19	20	2.5	20	20	28
11	100	12	25	3.1	25	10	25
12	110	14	20	2.2	20	15	30
13	120	16	30	2.5	30	20	26
14	130	18	26	2.6	26	25	28
15	140	20	28	2.8	28	20	20
16	150	11	20	3.5	20	30	10
17	160	13	10	3.0	10	26	20
18	170	15	20	2.7	20	28	30
19	180	17	25	2.5	25	20	26
20	190	19	30	3.1	30	19	28
21	200	11	26	2.2	26	18	25
22	100	13	28	2.5	28	20	30
23	110	15	20	2.5	20	10	26
24	120	17	10	3.1	10	15	28
25	130	19	20	2.2	20	20	20
26	140	12	25	2.5	25	25	20
27	150	14	20	2.6	20	20	30
28	180	17	30	2.8	30	30	26
29	190	19	26	3.5	26	26	28
30	200	11	28	3.0	28	28	25
31	100	13	20	2.7	20	20	30
32	110	15	10	2.5	10	25	26
33	120	17	20	3.1	20	20	28
34	120	18	15	3.0	15	15	28
35	130	16	20	2.0	20	20	10

Порядок проведения исследований

а) Определение А- параметров заданных четырехполюсников

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 1).

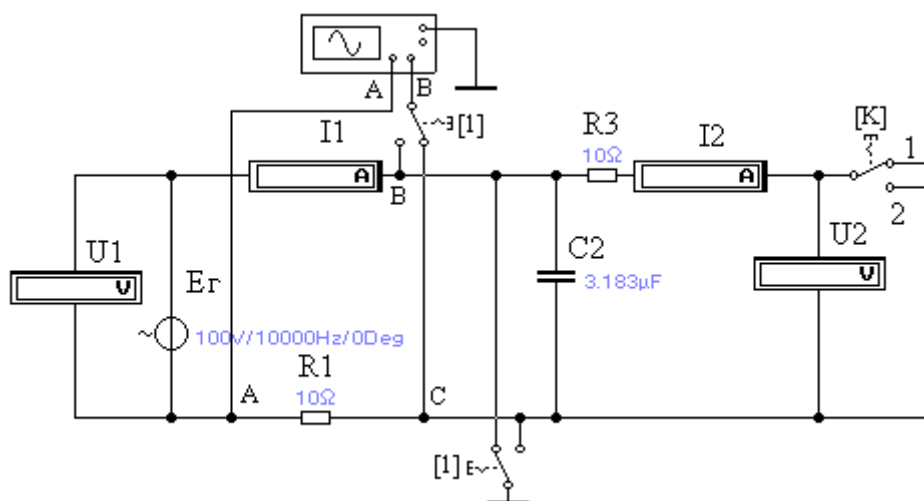


Рисунок 1

2. Установить заданные согласно варианту значения ЭДС, частоты источника, величины элементов схемы четырехполюсника. Для чего к нужному элементу подводится курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» вызывается окно (с именем элемента), в котором устанавливается требуемое значение параметра и нажимается кнопка «Ассерт». Переключателем 1 подключить канал «В» осциллографа к зажиму С (нажать при необходимости на клавиатуре клавишу 1). Двойным нажатием левой кнопки «мыши» на линии канала А осциллографа установить цвет канала красный, на линии канала В - цвет канала синий.

3. В схеме установить **режим холостого хода**: переключатель «К» перевести в положение 1 (нажать на клавиатуре клавишу К).

4. После завершения установки всех параметров схемы кнопку - «0-1», расположенную в правом верхнем углу экрана перевести в положение 1-«Включено». По завершении автоматических расчетов кнопка переводится в положение 0-«Выключено».

Показания амперметров и вольтметров занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных (таблица 2).

Таблица 2 - Расчетные и экспериментальные данные

режим Холостой ход	$U_1, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$U_2, В$	$T_2 - T_1, с$	$\psi_{12}, град$	$T_2 - T_1, с$	$\varphi_{ui}, градус$	А- параметры			
									A_{11}		A_{21}	
									эксп	расч	эксп	расч
режим Короткое замыкание	$U_1, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$U_2, В$	$T_2 - T_1, с$	$\psi_{12}, град$	$T_2 - T_1, с$	$\varphi_{ui}, градус$	А- параметры			
									A_{12}		A_{22}	
									эксп	расч	эксп	расч

Нажатию левой кнопки «мышь» на изображении осциллографа активизировать его и перевести в режим «Zoom». Установить визирную линейку 1 (красного цвета) в точку пересечения оси времени осциллограммой канала А при ее переходе от отрицательного значения к положительному, а визирную линейку 2 (синего цвета) - в точку пересечения оси времени осциллограммой канала В при ее переходе от отрицательного значения к положительному. В правом нижнем окошке осциллографа появится значение временного промежутка T2-T1. Фазовый сдвиг между напряжениями U_1^{xx} и U_2^{xx} в градусах рассчитать по формуле $\psi_{12} = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$. Здесь f - частота синусоидальной ЭДС источника.

5. Переключателем 1 подключить канал «В» осциллографа к зажиму «В» (нажать на клавиатуре клавишу 1). С помощью осциллографа определить значение временного промежутка T2-T1. Фазовый сдвиг между током I_1^{xx} и напряжением U_2^{xx} в градусах рассчитать по формуле $\varphi_{ui} = 180 + 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$.

6. По результатам измерения напряжений U_1^{xx} , U_2^{xx} , тока I_1^{xx} и фазовых сдвигов рассчитать первичные параметры $\underline{A}_{11} = \frac{U_1^{xx}}{U_2^{xx}} e^{j\psi_{12}}$ и $\underline{A}_{21} = \frac{I_1^{xx}}{U_2^{xx}} e^{j\varphi_{ui}}$.

7. В схеме (рисунок 1) установить **режим короткого замыкания**: переключатель «К» перевести в положение включено (нажать на клавиатуре клавишу К).

8. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка T2-T1. Фазовый сдвиг между током I_1^{k3} и током I_2^{k3} в градусах рассчитать по формуле $\psi_{ii} = 180 + 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$

9. Переключателем 1 подключить канал «В» осциллографа к зажиму «С» схемы (нажать на клавиатуре клавишу 1). С помощью осциллографа определить значение временного промежутка T2-T1. Фазовый сдвиг между напряжением U_1^{k3} и током I_2^{k3} в градусах рассчитать по формуле $\varphi_{iu} = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$

10. Записать показания вольтметров и амперметров. По результатам измерения напряжения U_1^{k3} , токов I_1^{k3} , I_2^{k3} и фазовых сдвигов рассчитать первичные параметры $\underline{A}_{12} = \frac{U_1^{k3}}{I_2^{k3}} e^{j\varphi_{iu}}$ и $\underline{A}_{22} = \frac{I_1^{k3}}{I_2^{k3}} e^{j\psi_{ii}}$. Проверить правильность определения первичных параметров по уравнению связи $\underline{A}_{11} \underline{A}_{22} - \underline{A}_{12} \underline{A}_{21} = 1$.

11. Сравнить результаты предварительных расчетов первичных параметров с результатами исследований. Сделать выводы.

б) Определение вторичных параметров заданных четырехполюсников

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 2).

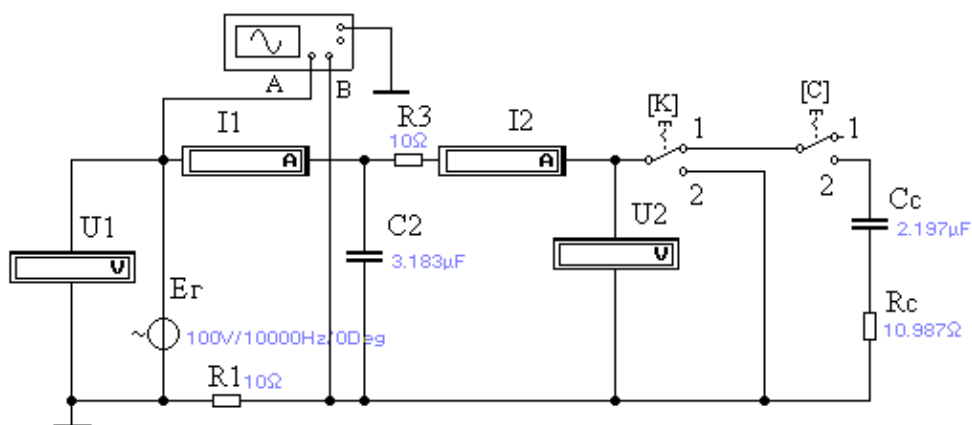


Рисунок 2

2. Установить заданные согласно варианту значения ЭДС, частоты источника, величины элементов схемы четырехполюсника.

3. В схеме установить **режим холостого хода**: переключатель «К» перевести в положение 1 «Выключено» (нажать на клавиатуре клавишу К).

4. После завершения установки всех параметров схемы кнопку (0-1) перевести в положение «Включено (1)». По завершении автоматических расчетов кнопка (0-1) переводится в положение «Выключено (0)». Показания амперметров и вольтметров, значение временного промежутка $T_2 - T_1$ занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных. Фазовый сдвиг между напряжением U_1^{xx} и током I_1^{xx} в градусах рассчитать по формуле $\varphi_{ui} = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$

7. По результатам измерений напряжения U_1^{xx} , тока I_1^{xx} и сдвига фаз рассчитать комплексное сопротивление $\underline{Z}_{1x} = \frac{U_1^{xx}}{I_1^{xx}} e^{j\varphi_{ui}}$.

8. В схеме (рисунок 2) установить **режим короткого замыкания**: переключатель «К» перевести в положение 2 «включено» (нажать на клавиатуре клавишу К).

9. С помощью осциллографа определить значение временного промежутка $T_2 - T_1$. Сдвиг фаз между напряжением U_1^{k3} и током I_1^{k3} рассчитать по формуле $\varphi_{ui} = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$

10. Записать показания вольтметра и амперметра. По результатам измерений напряжения U_1^{k3} , тока I_1^{k3} и сдвига фаз рассчитать комплексное

$$\text{сопротивление } \underline{Z}_{1k} = \frac{U_1^{k3}}{I_1^{k3}} e^{j\varphi_{ui}}.$$

11. Рассчитать характеристическое сопротивление четырехполюсника $\underline{Z}_c = \sqrt{\underline{Z}_{1x} \cdot \underline{Z}_{1k}} = Z \cdot e^{j\varphi} = Z \cos \varphi + jZ \sin \varphi = R_c + jX_c$. Определить величину емкости

конденсатора для характеристического сопротивления $C_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_c}$. Здесь f – частота колебаний источника ЭДС.

12. Установить рассчитанные величины элементов нагрузки схемы четырехполосника (рисунок 2) (сопротивление резистора R_c , емкость конденсатора C_c).

13. В схеме (рис.2) установить **режим согласованной нагрузки**: к выходу четырехполосника подключить $Z_n = Z_c$ (переключатель «С» перевести в положение включено (нажать на клавиатуре клавишу С)). После завершения установки всех параметров схемы кнопку (0-1) перевести в положение «Включено (1)». По завершении автоматических расчетов кнопка (0-1) переводится в положение «Выключено (0)». Показания амперметров и вольтметров, значение временного промежутка $T_2 - T_1$ занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных. Сдвиг фаз между напряжением U_{1c} и током I_{1c} рассчитать по формуле $\varphi_{ui} = 360^\circ \cdot (T_2 - T_1) \cdot f$

14. По результатам измерений напряжения U_{1c} и тока I_1 и сдвига фаз рассчитать входное комплексное сопротивление $Z_{1вх} = \frac{U_{1c}}{I_{1c}} e^{j\varphi_{ui}}$. Сравнить значения характеристического и входного сопротивлений. Сделать вывод.

15. По результатам измерений напряжений U_{1c} , U_{2c} , токов I_{1c} и I_{2c} рассчитать характеристическую (собственную) постоянную ослабления четырехполосника в неперах

$$A_c = \frac{1}{2} \ln \frac{U_{1c} I_{1c}}{U_{2c} I_{2c}} \text{ или в децибелах } A_c = 10 \lg \frac{U_{1c} I_{1c}}{U_{2c} I_{2c}}.$$

16. Сравнить результаты предварительных расчетов вторичных параметров четырехполосника с результатами исследований. Сделать выводы.

в) *Исследование четырехполосников при несогласованной нагрузке. Определение рабочих параметров заданных четырехполосников*

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 3).

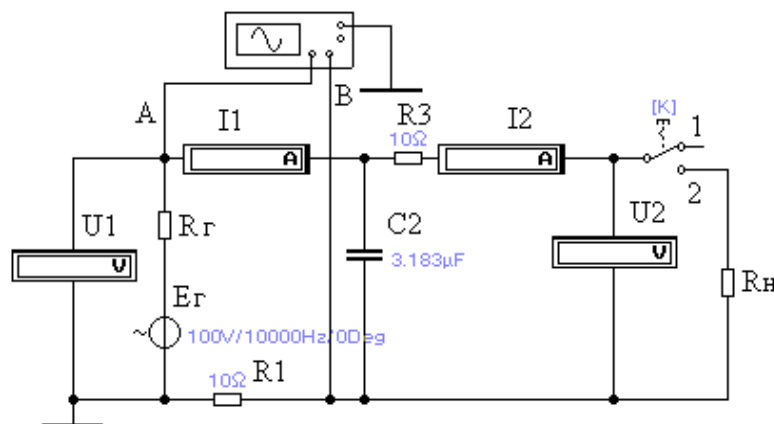


Рисунок 3

2. Установить заданные согласно варианту значения ЭДС, частоты источника, величины элементов схемы четырехполюсника, сопротивлений R_{Γ} и R_H .

3. В схеме установить **режим несогласованной нагрузки**: переключатель «К» перевести в положение 2 «Включено» (нажать на клавиатуре клавишу К).

4. После завершения установки всех параметров схемы кнопку (0-1) перевести в положение «1». По завершении автоматических расчетов кнопка (0-1) переводится в положение «0». Показания амперметров и вольтметров занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

По результатам измерений напряжения U_2 , тока I_2 рассчитать полную мощность в нагрузке $S_H = U_2 I_2$

5. Собрать схему электрической цепи (рис. 4). Для этого достаточно в схеме (рисунок 3) выделить и удалить элементы четырехполюсника, вольтметр $V1$, амперметр $I1$, осциллограф

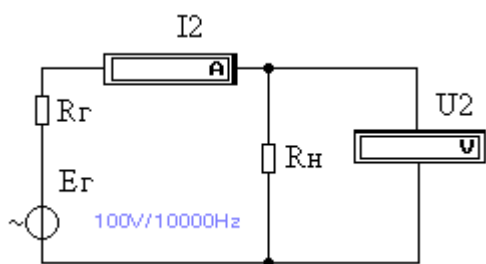


Рисунок 4

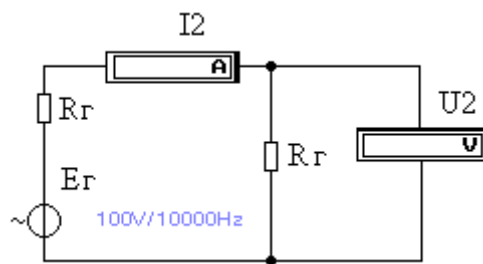


Рисунок 5

6. После завершения установки всех параметров схемы кнопку (0-1) перевести в положение «Включено (1)». Показания амперметра и вольтметра занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

7. По результатам измерений напряжения U_{2H} , тока I_{2H} рассчитать полную мощность в нагрузке, несогласованной с источником $S_{2H} = U_{2H} I_{2H}$

По результатам измерений напряжений U_2 , U_{2H} , токов I_2 и I_{2H} или полных мощностей рассчитать вносимое ослабление в неперах $A_{вн} = \frac{1}{2} \ln \frac{U_{2H} I_{2H}}{U_2 I_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{S_{2H}}{S_2}$ или в децибелах

$$A_{вн} = 10 \lg \frac{U_{2H} I_{2H}}{U_2 I_2} = 10 \lg \frac{S_{2H}}{S_2}.$$

8. Собрать схему электрической цепи (рис.5). Для этого достаточно в схеме (рис.4) установить $R_H = R_{\Gamma}$ (режим согласованной нагрузки с источником, при котором в нагрузке выделяется максимальная мощность).

9. После завершения установки всех параметров схемы кнопку (0-1) перевести в положение «1».

10. По результатам измерений напряжения $U_{2\max}$, тока $I_{2\max}$ рассчитать полную мощность в нагрузке, согласованной с источником $S_{2\max} = U_{2\max} I_{2\max}$

11. По результатам измерений напряжений U_2 , $U_{2\max}$, токов I_2 и $I_{2\max}$ или полных мощностей рассчитать рабочее ослабление в неперах $A_p = \frac{1}{2} \ln \frac{U_{2\max} I_{2\max}}{U_2 I_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{S_{2\max}}{S_2}$ или

в децибелах $A_p = 10 \lg \frac{U_{2\max} I_{2\max}}{U_2 I_2} = 10 \lg \frac{S_{2\max}}{S_2}$.

12. Сравнить результаты предварительных расчетов рабочих параметров четырехполосника с результатами исследований. Сделать выводы.

Содержание отчета.

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- схемы исследований;
- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы:

1. Что называют четырехполосником?
2. Приведите примеры четырехполосников техники связи.
3. Назовите основные формы систем уравнений четырехполосника.
4. Запишите уравнение четырехполосника в форме А - параметров.
5. Почему эти параметры называются первичными?
6. Каким образом можно определить параметры $\underline{A}_{11}$ и $\underline{A}_{21}$?
7. Каким образом можно определить параметры $\underline{A}_{12}$ и $\underline{A}_{22}$?
8. Назовите характеристические параметры четырехполосников.
9. Что называют характеристическим сопротивлением симметричного четырехполосника?
10. Запишите выражение для определения характеристического сопротивления по А-параметрам четырехполосника.
11. Что называют характеристической постоянной передачи четырехполосника?
12. Что называют характеристическим (собственным) ослаблением четырехполосника?
13. Запишите выражение для определения характеристического ослабления по А-параметрам четырехполосника.
14. Что называют вносимым ослаблением четырехполосника?
16. Что называют рабочим ослаблением четырехполосника?

Лабораторная работа №10

Исследование частотных характеристик LC- фильтров

Цель работы:

1. Экспериментальное исследование частотных характеристик ФНЧ
2. Экспериментальное исследование частотных характеристик ФВЧ

Задание на подготовку к лабораторной работе:

- согласно варианту задания (таблица 1) выполнить предварительный расчет:

- а) частотных характеристик ФНЧ и построить их графики.
- б) частотных характеристик ФВЧ и построить их графики.

Таблица 1 - Варианты заданий для предварительного расчета и исследований

Вариант №	R_c , Ом	f_c , Гц	Схема	n
1	600	2500	П	0.6
2	700	2000	Т	0.9
3	800	1000	П	2
4	900	4000	Т	1.5
5	1000	5000	П	1.2
6	1500	1500	Т	0.7
7	550	3500	П	0.65
8	650	2500	Т	0.5
9	750	4500	П	1.25
10	850	5500	Т	1.4
11	600	2500	П	0.6
12	700	2000	Т	0.9
13	800	1000	П	2
14	900	4000	Т	1.5
15	1000	5000	П	1.2
16	1500	1500	Т	0.7
17	550	3500	П	0.65
18	650	2500	Т	0.5
19	750	4500	П	1.25
20	850	5500	Т	1.4
21	600	2500	П	0.6
22	700	2000	Т	0.9
23	800	1000	П	2
24	900	4000	Т	1.5
25	1000	5000	П	1.2
26	1500	1500	Т	0.7
27	550	3500	П	0.65
28	650	2500	Т	0.5
29	750	4500	П	1.25
30	850	5500	Т	1.4
31	600	2500	П	0.6
32	700	2000	Т	0.9
33	800	1000	П	2

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источники переменного напряжения, резисторы, конденсаторы, вольтметры. Боде - плоттер используется для определения частотных характеристик.

Задание на исследование

1. Исследовать частотные характеристики ФНЧ.
2. Исследовать частотные характеристики ФВЧ.

Порядок проведения исследований

а) Исследование частотных характеристик ФНЧ

- 1.Собрать схему электрической цепи (рисунок 1).

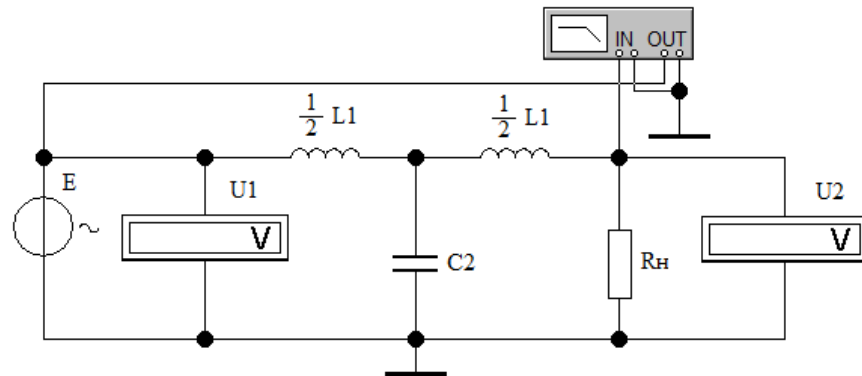


Рисунок 1-Схема исследования частотных характеристик ФНЧ

2. По заданным согласно варианту R_c и f_c рассчитать $L_1 = \frac{R_c}{\pi f_c}$ и $C_2 = \frac{1}{\pi f_c R_c}$

Установить на схеме рассчитанные величины индуктивности L_1 и емкости конденсатора C_2 , значение ЭДС источника $E = 1V$, сопротивление $R_n = R_c$

3. Заполнить вторую строку таблицы 2 (строку f , Гц)
4. Изменяя частоту f источника согласно таблице 2, измерить напряжения U_2 и U_1
Показания вольтметров занести в таблицу результатов исследований.

Таблица 2 - Результаты исследований ФНЧ

f/f_c	0.01	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0
f , Гц														
U_2 , В														
U_1 , В														
$A_1(f)$, дБ														
U_2 , В														
$A_2(f)$, дБ														
U_2 , В														
$A_3(f)$, дБ														
U_2 , В														
$A_4(f)$, дБ														

5. Выполнить расчет $A(f) = 20\lg(\frac{U_1}{U_2})$. По результатам исследований построить график $A(f)$.
6. Используя графопостроитель (Боде-плоттер), получить график $A(f)$ и сравнить с графиком п.5
6. Провести исследование частотных характеристик при $R_H = 0.5R_c$, $R_H = 2R_c$, $R_H = 10R_c$.
7. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета.

Сделать выводы.

б) Исследование частотных характеристик ФВЧ

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 2).

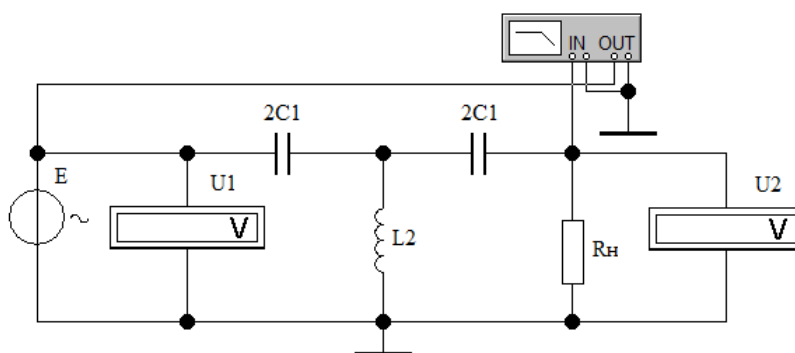


Рисунок 2 - Схема исследования частотных характеристик ФВЧ

2. По заданным согласно варианту R_c и f_c рассчитать $L_2 = \frac{R_c}{4\pi f_c}$ и $C_1 = \frac{1}{4\pi f_c R_c}$.

Установить на схеме рассчитанные величины индуктивности L_2 и емкости конденсатора C_1 , значение ЭДС источника $E = 1V$, сопротивление $R_H = R_c$

3. Заполнить вторую строку таблицы 3 (строку f , Гц)

4. Изменяя частоту f источника согласно таблице 3, измерить напряжения U_2 и U_1 . Показания вольтметров занести в таблицу результатов исследований.

Таблица 3 - Результаты исследований ФВЧ

f/f_c	0.01	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	5.0
f , Гц														
U_2 , В														
U_1 , В														
$A_1(f)$, дБ														
U_2 , В														
$A_2(f)$, дБ														
U_2 , В														
$A_3(f)$, дБ														
U_2 , В														
$A_4(f)$, дБ														

5. Выполнить расчет $A(f) = 20\lg(\frac{U_1}{U_2})$. По результатам исследований построить график $A(f)$.
 6. Используя графопостроитель (Боде - плоттер), получить график $A(f)$ и сравнить с графиком п.5
 6. Провести исследование частотных характеристик при $R_H = 0.5R_C$, $R_H = 2R_C$, $R_H = 10R_C$.
 7. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета.
- Сделать выводы.

Содержание отчета

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- задание на исследование;
- схемы исследований;
- заполненные таблицы расчетных и экспериментальных данных, расчетные формулы и подробный расчет всех требуемых параметров;
- графики частотных характеристик;
- выводы по результатам исследований.

Контрольные вопросы:

1. Что такое электрический фильтр?
2. Изобразите Т-образную схему ФНЧ.
3. Изобразите П-образную схему ФВЧ.
4. Сформулируйте условия фильтрации пассивных LC-фильтров.
5. Каким образом можно определить полосу пропускания пассивных LC-фильтров?
6. Каким образом можно определить частоты среза полосы пропускания? Поясните на примере фильтра нижних частот типа "к".
7. Каким образом можно определить частотную характеристику ослабления пассивных LC-фильтров? Поясните на примере фильтра нижних частот.
8. Запишите выражение для частотной характеристики ослабления ФНЧ.
9. Изобразите график частотной характеристики ослабления ФНЧ.
10. Запишите выражение для постоянной фазы ФНЧ.

11. Запишите выражение для характеристического сопротивления ФНЧ.
12. Запишите выражение для частотной характеристики ослабления ФВЧ.
13. Запишите выражение для постоянной фазы ФВЧ.
14. Запишите выражение для характеристического сопротивления ФВЧ.
15. Изобразите график частотной характеристики ослабления ФВЧ.

Литература

1. Никулин В. И. Теория электрических цепей. - М.: РИОР, 2016.
2. Попов В.П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа, 2005
3. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника.- М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Руководство к решению задач Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 2002
5. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Лабораторный практикум на базе Electronics Workbench и MATLAB.Издание 5-е.-М.: СОЛОН-Пресс, 2004.

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

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «Теория электрических и радиотехнических цепей»
для студентов направления подготовки /специальности
11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
Направленность (профиль)
«Интеллектуальная обработка данных в инфокоммуникационных
системах и сетях»

Ставрополь 2026

СОДЕРЖАНИЕ

	с
Введение.....	4
1. Расчет электрических цепей методом преобразований	6
2. Расчет электрических цепей методом контурных токов.....	17
3. Расчет электрических цепей методом узловых потенциалов.....	30
4. Расчет цепей синусоидального тока	38
5. Расчет трехфазных цепей.....	49
6. Расчет переходных токов и напряжений классическим методом.....	62
7. Расчет переходных токов и напряжений операторным методом.....	78
8. Расчет параметров четырехполюсников.....	87
Литература.....	100

Введение

Практические занятия по дисциплине «Теория электрических и радиотехнических цепей» обеспечивают связь теории электрических цепей с практикой расчета электрических цепей и радиотехнических устройств, выработку умения применять знания, полученные на лекциях и в ходе самостоятельной работы.

Практические занятия имеют цель:

помочь систематизировать, закрепить и углубить знания теории электрических цепей постоянного тока;

показать связь теоретического материала с практикой и научить их применять закон Ома, первый и второй законы Кирхгофа к решению практических задач по линейным и нелинейным цепям постоянного тока, научить курсантов решению задач методами преобразований, контурных токов, наложения, узловых потенциалов;

развивать и совершенствовать математическую подготовку, умение вести инженерные расчеты с использованием современной вычислительной техники;

овладеть методикой работы с научным материалом по теории цепей и определенными наиболее типичными для дисциплины «Основы теории цепей» практическими навыками;

помочь студентам в развитии самостоятельной работы; научить работать с учебной литературой, электрическими схемами, пользоваться справочной литературой и ГОСТами.

Для достижения поставленной цели студенты обязаны:

при подготовке к занятию изучить рекомендованную литературу, подготовиться и ответить на контрольные вопросы, перечень которых приводится в каждом задании к занятию, проанализировать решение типовых задач для данного занятия;

в ходе практического занятия выполнить индивидуальные согласно варианту задания. При выполнении заданий рекомендуется следующий порядок действий: анализ условий задачи; оценка имеющихся данных (что дано, что требуется найти, какие данные являются избыточными); выбор метода решения задачи; составление плана (алгоритма) решения; выполнение расчетов; проверка решения; оформление отчета.

При выполнении расчетов целесообразно использование ПЭВМ или программируемых микрокалькуляторов. Отчет оформляется в соответствии с требованиями к письменным работам и представляется на проверку преподавателю. Примеры оформления отчета приводятся в каждом практическом занятии.

За каждое выполненное задание практического занятия преподаватель выставляет оценку по 10 бальной системе.

Критерии оценок за задание:

максимальное количество баллов выставляется, если алгоритм решения оптимален и задача решена правильно в полном объеме, аккуратно оформлена,

количество баллов снижается на 2, если задача решена в полном объеме, аккуратно оформлена, но содержит не существенные ошибки,

количество баллов снижается на 5, если алгоритм решения не оптимален и задача решена правильно в общем виде или содержит ошибки,

количество баллов снижается до 0, если нет решения задачи, задача решена неправильно или содержит грубые ошибки.

Критерии оценок за практическое занятие:

оценка ОТЛИЧНО выставляется, если количество баллов $\geq 90\%$ от максимально возможного количества баллов за практическое занятие;

оценка ХОРОШО выставляется, если количество баллов $\geq 80\%$ от максимально возможного количества баллов за практическое занятие;

оценка УДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО выставляется, если количество баллов $\geq 60\%$;

оценка НЕУДОВЛЕТВОРИТЕЛЬНО выставляется, если количество баллов $< 60\%$.

Студенты, получившие при выполнении всех практических занятий оценки ХОРОШО и ОТЛИЧНО, по представлению преподавателя, освобождаются заведующим кафедрой от экзамена по дисциплине «Электротехника и электроника» с выставлением оценки «ОТЛИЧНО».

1. Расчет электрических цепей методом преобразований

Учебные вопросы:

1. Расчет эквивалентных сопротивлений пассивных цепей.
2. Расчет эквивалентных ЭДС активных цепей.
3. Расчет параметров эквивалентных источников тока.

задание студентам для подготовки к занятию

1. Изучить:

1. Никулин В.И. Теория электрических цепей. - М.: РИОР, 2016, с. 6-23.
2. Бакалов В.П., Воробиенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 26-31.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей.- М.: Высшая школа, 1982. - с.4, 9-11, 12-13.

2. Ответить на вопросы:

1. Что такое электрическая цепь?
2. Что такое электрический ток?
3. Что такое электрическое напряжение?
4. Что такое ЭДС?
5. Что такое ветвь электрической цепи?
6. Что такое участок электрической цепи?
7. Каким образом определяется эквивалентное сопротивление при последовательном соединении резистивных элементов?
8. Каким образом определяется эквивалентное сопротивление при параллельном соединении резистивных элементов?
9. Каким образом определяется эквивалентная ЭДС при последовательном соединении источников ЭДС?

10. Каким образом определяется эквивалентный ток при параллельном соединении источников тока?
11. Что понимают под схемой замещения электрической цепи?
12. Изобразите схему замещения реального источника ЭДС
13. Изобразите схему замещения реального источника тока.
14. Каким образом можно осуществить переход от реального источника ЭДС к схеме замещения с источником тока?

3. Проанализировать решение задач:

№1.1 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с.14)

В ходе практического занятия выполнить задания:

задание №1 Рассчитать эквивалентное сопротивление $R_{\text{э}}$ для заданных согласно варианту пассивных электрических цепей, схемы и параметры которых указаны в таблице 1.1.

задание №2 Рассчитать эквивалентные ЭДС и сопротивления для заданных согласно варианту активных электрических цепей (таблица 1.2)

задание №3 Рассчитать параметры эквивалентных источников тока ($J_{\text{э}}$ и $R_{\text{э}}$) для заданных согласно варианту активных электрических цепей (таблица 1.3)

Таблица 1.1

Вариант №	Схема, Рисуно к №	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом	R ₇ , Ом	R ₈ , Ом	Опреде лить
0	1.1	200	200	400	500	400	100	200	100	Rab
1	1.2	100	150	200	100	150	300	100	100	Rab
2	1.3	10	15	20	10	15	30	10	10	Rab
3	1.4	200	200	400	500	400	100	200	100	Rad
4	1.1	100	100	200	150	200	100	300	200	Rad
5	1.2	15	10	25	10	20	15	20	30	Rad
6	1.3	200	250	100	200	150	250	160	300	Rae
7	1.4	20	25	10	15	25	35	20	15	Rae
8	1.1	250	300	450	300	200	150	250	300	Rae
9	1.2	150	180	240	250	240	190	200	250	Rbf
10	1.3	25	20	45	20	40	50	25	60	Rbf
11	1.4	100	150	200	100	150	300	100	100	Rbf
12	1.1	10	15	20	10	15	30	10	10	Rbc
13	1.2	200	200	400	500	400	100	200	100	Rbc
14	1.3	100	100	200	150	200	100	300	200	Rbc
15	1.4	15	10	25	10	20	15	20	30	Rbd
16	1.1	200	250	100	200	150	250	160	300	Rbd
17	1.2	20	25	10	15	25	35	20	15	Rbd
18	1.3	250	300	450	300	200	150	250	300	Rde
19	1.4	150	180	240	250	240	190	200	250	Rde
20	1.1	25	20	45	20	40	50	25	60	Rde
21	1.2	100	150	200	100	150	300	100	100	Rdc
22	1.3	10	15	20	10	15	30	10	10	Rdc
23	1.4	200	200	400	500	400	100	200	100	Rdf
24	1.1	100	100	200	150	200	100	300	200	Rdf
25	1.2	15	10	25	10	20	15	20	30	Rdf
26	1.3	200	250	100	200	150	250	160	300	Rdf
27	1.4	20	25	10	15	25	35	20	15	Rfe
28	1.1	250	300	450	300	200	150	250	300	Rce
29	1.2	150	180	240	250	240	190	200	250	Rce

30	1.3	25	20	45	20	40	50	25	60	Raf
31	1.4	100	150	200	100	150	300	100	100	Raf
32	1.1	10	15	20	10	15	30	10	10	Rab
33	1.2	200	200	400	500	400	100	200	100	Rbd
34	1.3	100	100	200	150	200	100	300	200	Rde
35	1.4	15	10	25	10	20	15	20	30	Rde
36	1.1	200	250	100	200	150	250	160	300	Rde
37	1.2	20	25	10	15	25	35	20	15	Rdc
38	1.3	250	300	450	300	200	150	250	300	Rdc
39	1.4	150	180	240	250	240	190	200	250	Rdb
40	1.1	25	20	45	20	40	50	25	60	Rdf
41	1.4	100	150	200	100	150	300	100	100	Raf
42	1.1	10	15	20	10	15	30	10	10	Rab
43	1.2	200	200	400	500	400	100	200	100	Rbd
44	1.3	100	100	200	150	200	100	300	200	Rde
45	1.4	15	10	25	10	20	15	20	30	Rde

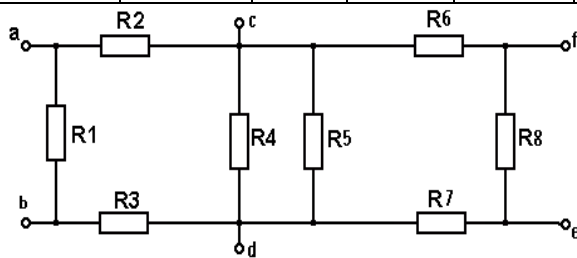


Рисунок 1.1

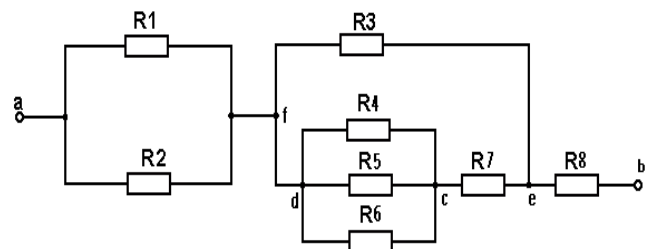


Рисунок 1.2

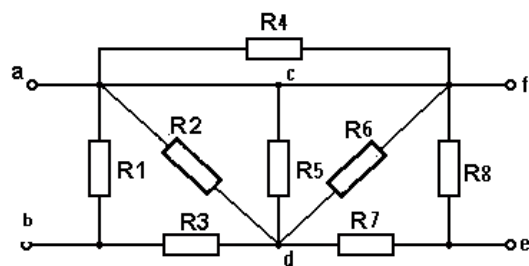


Рисунок 1.3

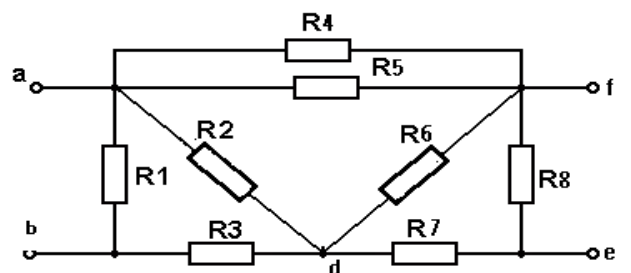


Рисунок 1.4

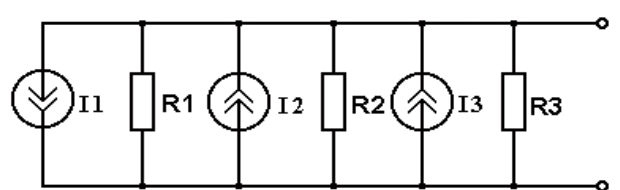
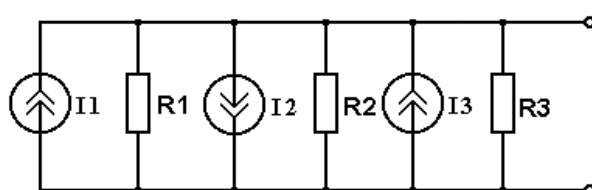


Рисунок 1.5

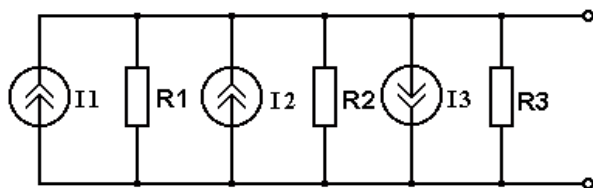


Рисунок 1.7

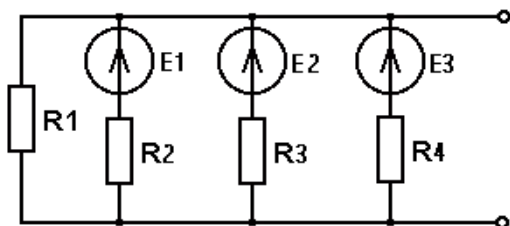


Рисунок 1.9

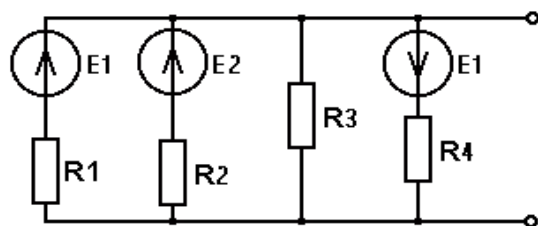


Рисунок 1.11

Рисунок 1.6

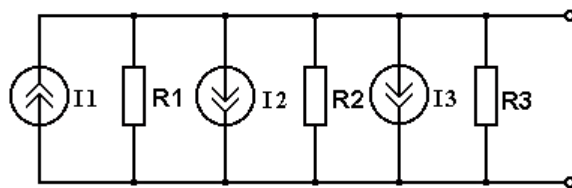


Рисунок 1.8

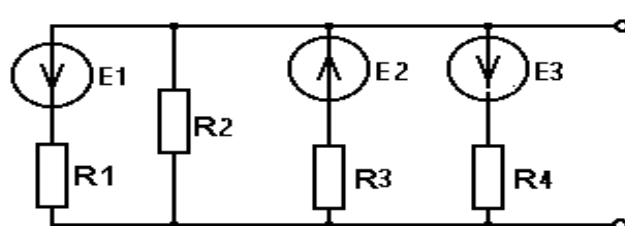


Рисунок 1.10

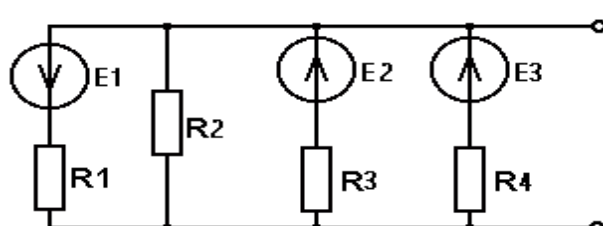


Рисунок 1.12

Таблица 1.2

Вариант №	Схема, Рисунок№	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	I ₁ , мА	I ₂ , мА	I ₃ , мА
0	1.5	100	100	50	10	20	15
1	1.6	150	200	250	20	10	15
2	1.7	200	50	150	5	7	10
3	1.8	200	100	50	4	8	6
4	1.5	250	150	100	8	5	7
5	1.6	400	300	200	10	25	15
6	1.7	150	200	250	20	10	15
7	1.8	200	50	150	5	7	10
8	1.5	200	100	50	4	8	6
9	1.6	250	150	100	8	5	7
10	1.7	400	300	200	10	25	15
11	1.8	150	200	250	20	10	15
12	1.5	200	50	150	5	7	10
13	1.6	200	100	50	4	8	6
14	1.7	250	150	100	8	5	7
15	1.8	400	300	200	10	25	15
16	1.5	150	200	250	20	10	15
17	1.6	200	50	150	5	7	10
18	1.7	200	100	50	4	8	6
19	1.8	250	150	100	8	5	7
20	1.5	400	300	200	10	25	15
21	1.6	150	200	250	20	10	15
22	1.7	200	50	150	5	7	10
23	1.8	200	100	50	4	8	6
24	1.5	250	150	100	8	5	7
25	1.6	400	300	200	10	25	15
26	1.7	150	200	250	20	10	15
27	1.8	200	50	150	5	7	10
28	1.5	200	100	50	4	8	6
29	1.6	250	150	100	8	5	7
30	1.7	400	300	200	10	25	15

31	1.8	150	200	250	20	10	15
32	1.5	200	50	150	5	7	10
33	1.6	200	100	50	4	8	6
34	1.7	250	150	100	8	5	7
35	1.8	400	300	200	10	25	15
36	1.5	150	200	250	20	10	15
37	1.6	200	50	150	5	7	10
38	1.7	200	100	50	4	8	6
39	1.8	250	150	100	8	5	7
40	1.5	400	300	200	10	25	15
41	1.6	250	350	100	15	25	15
42	1.7	150	200	250	20	10	15
43	1.7	150	200	250	20	10	15
44	1.8	200	50	150	5	7	10
45	1.5	200	100	50	4	8	6
46	1.6	250	150	100	8	5	7

Таблица 1.3

Вариант №	Схема Рисунок№	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	E ₁ , В	E ₂ , В	E ₃ , В
0	1.9	75	100	50	150	20	10	15
1	1.10	50	100	200	50	10	12	20
2	1.11	100	250	300	200	10	15	25
3	1.12	200	400	500	300	10	14	18
4	1.9	450	250	300	200	20	30	40
5	1.10	500	750	650	400	40	25	30
6	1.11	50	100	200	50	10	12	20
7	1.12	100	250	300	200	10	15	25
8	1.9	200	400	500	300	10	14	18
9	1.10	450	250	300	200	20	30	40
10	1.11	500	750	650	400	40	25	30
11	1.12	50	100	200	50	5	10	7
12	1.9	100	250	300	200	10	12	20
13	1.10	200	400	500	300	10	15	25
14	1.11	450	250	300	200	10	14	18
15	1.12	500	750	650	400	20	30	40
16	1.9	50	100	200	50	40	25	30
17	1.10	100	250	300	200	10	12	20
18	1.11	200	400	500	300	10	15	25
19	1.12	450	250	300	200	10	14	18
20	1.9	500	750	650	400	20	30	40
21	1.10	50	100	200	50	10	12	20
22	1.11	100	250	300	200	10	15	25
23	1.12	100	250	300	200	10	14	18
24	1.9	200	400	500	300	20	30	40
25	1.10	450	250	300	200	40	25	30
26	1.11	500	750	650	400	10	12	20
27	1.12	50	100	200	50	10	15	25
28	1.9	100	250	300	200	10	14	18
29	1.10	200	400	500	300	20	30	40
30	1.11	450	250	300	200	40	25	30

31	1.12	500	750	650	400	5	10	7
32	1.9	50	100	200	50	10	12	20
33	1.10	100	250	300	200	10	15	25
34	1.11	200	400	500	300	10	14	18
35	1.12	450	250	300	200	20	30	40
36	1.9	500	750	650	400	40	25	30
37	1.10	50	100	200	50	10	12	20
38	1.11	100	250	300	200	10	15	25
39	1.12	200	400	500	300	10	14	18
40	1.9	450	250	300	200	20	30	40
41	1.10	100	250	300	200	10	14	18
42	1.11	200	400	500	300	20	30	40
43	1.12	450	250	300	200	40	25	30
44	1.9	500	750	650	400	5	10	7
45	1.10	50	100	200	50	10	12	20
46	1.11	100	250	300	200	10	15	25

Пример выполнения заданий (вариант №0)

Задание №1. Рассчитать эквивалентное сопротивление R_{ab} пассивной электрической цепи, схема и параметры которой указаны в таблице 1.1. вариант №0.

Решение

1. Резистивные элементы R_6 , R_7 , R_8 соединены последовательно (см. рис1.1). Они образуют первый участок цепи. Эквивалентное сопротивление первого участка цепи

$$R_{\Sigma 1} = R_6 + R_7 + R_8 = 100 + 200 + 100 = 400 \text{ Ом.}$$

2. Резистивные элементы R_4 и R_5 и участок цепи с элементами R_6 , R_7 , R_8 соединены параллельно (Рисунок1.13). Эти элементы образуют 2-ой участок цепи. Эквивалентная проводимость данного участка

$$G_{\Sigma 2} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_{\Sigma 1}} = \frac{1}{500} + \frac{1}{400} + \frac{1}{400} = 0.002 + 0.0025 + 0.0025 = 0.007 \text{ См.}$$

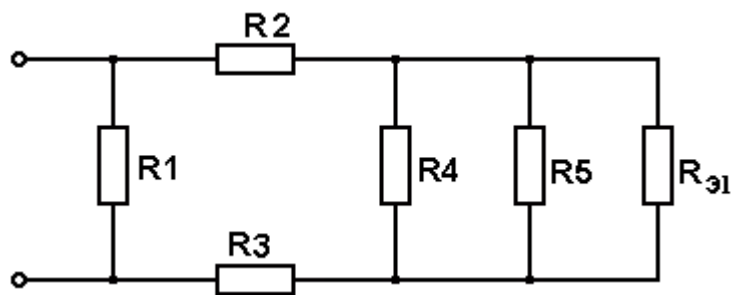


Рисунок 1.13

3. Эквивалентное сопротивление второго участка цепи будет определяться как величина обратная эквивалентной проводимости G_{32}

$$R_{32} = \frac{1}{G_{32}} = \frac{1}{0.007} = 142.86 \text{ Ом.}$$

4. Элементы R_2 , R_3 и второй участок цепи соединены последовательно (рисунок 1.14). Они образуют третий участок цепи. Эквивалентное сопротивление третьего участка цепи

$$R_{33} = R_2 + R_{32} + R_3 = 200 + 142.86 + 400 = 742.86 \text{ Ом.}$$

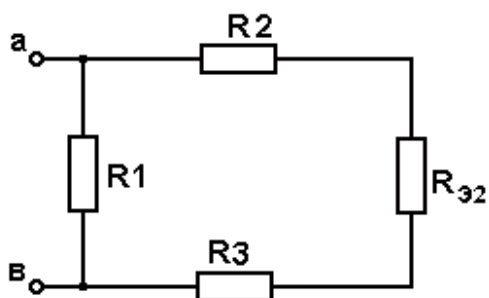


Рисунок 1.14

5. Резистивный элемент R_1 и третий участок цепи относительно выводов «а, в» соединены параллельно (рис 1.15). Проводимость этого участка цепи

$$G_9 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{33}} + \frac{1}{200} + \frac{1}{742.86} = 6.35 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

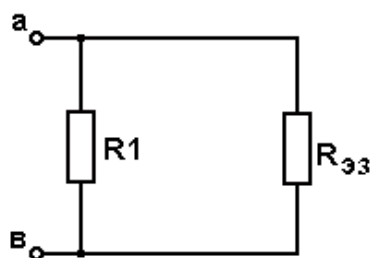


Рисунок 1.15

6. Эквивалентное сопротивление цепи $R_{ав} = \frac{1}{G_э} = \frac{1}{6,35 \cdot 10^{-3}} = 157,58 \text{ Ом.}$

Задание №2. Определить параметры эквивалентного источника тока ($I_э$, $R_э$) активной цепи рисунок 1.5, параметры которой заданы (таблица 1.2, вариант № 0).

Решение

1. Представим исходную схему (рисунок 1.5) в следующем виде (рисунок 1.16)

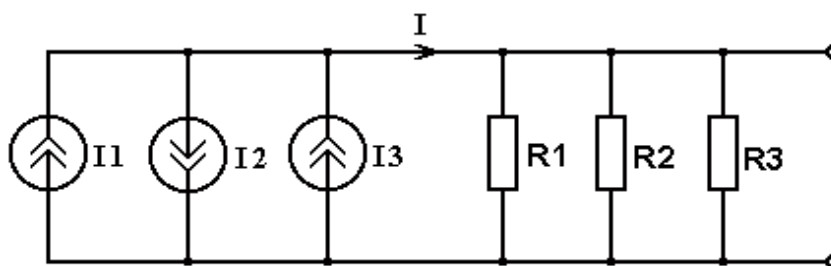


Рисунок 1.16

2. Ток I определяется по 1 закону Кирхгофа

$$I = I_1 - I_2 + I_3 = 10 - 20 + 15 = 5 \text{ мА.}$$

3. Три источника тока (рисунок 1.16) можно заменить одним, ток которого равен $I_э = I = 5 \text{ мА.}$

4. Резистивные элементы R_1 , R_2 , R_3 соединены параллельно относительно выходных полюсов. Эквивалентная проводимость пассивного участка цепи определяется выражением

$$G_э = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{100} + \frac{1}{100} + \frac{1}{50} = 0,04 \text{ См.}$$

5. Эквивалентное сопротивление участка цепи с элементами R_1 , R_2 , R_3 будет определяться выражением $R_э = \frac{1}{G_э} = \frac{1}{0,04} = 25 \text{ Ом.}$

6. Эквивалентная схема цепи с одним источником тока представлена на рисунке 1.17

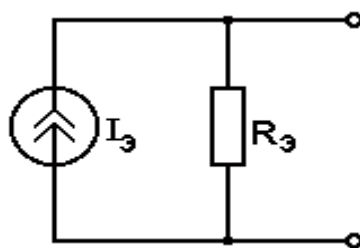


Рисунок 1.17

Задание №3. Рассчитать эквивалентную ЭДС цепи (см. рисунок 1.9), параметры которой указаны в табл. 1.3 вариант № 0.

Решение

1. Участки цепи, содержащие источники ЭДС и резистивные элементы, заменим эквивалентно на участки цепи с источником тока (рисунок 1.18)

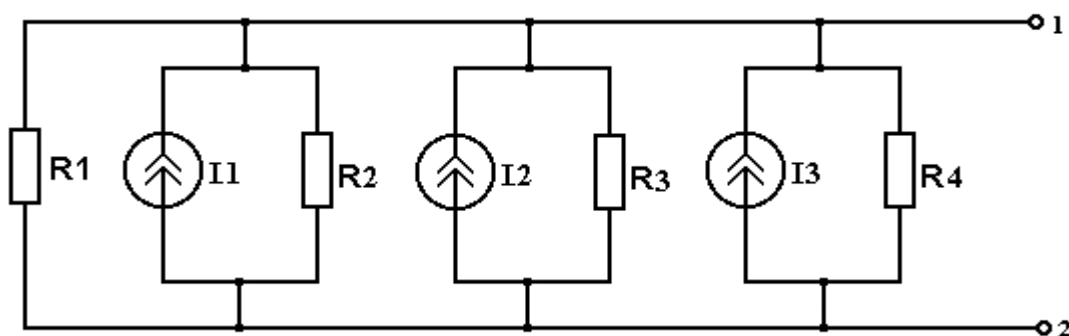


Рисунок 1.18

2. Определим величины I_1 , I_2 , I_3 как токи короткого замыкания соответствующих ветвей с источниками ЭДС

$$I_1 = \frac{E_1}{R_2} = \frac{20}{100} = 0,2 \text{ A}, \quad I_2 = \frac{E_2}{R_3} = \frac{10}{50} = 0,2 \text{ A}, \quad I_3 = \frac{E_3}{R_4} = \frac{15}{150} = 0,1 \text{ A}.$$

3. Схема цепи может быть представлена в виде (рисунок 1.19)

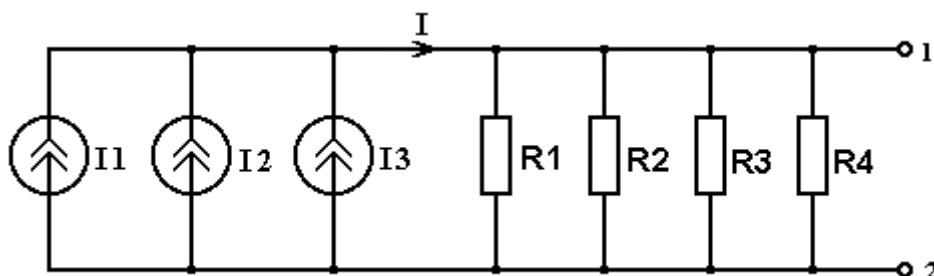


Рисунок 1.19

4. Ток I в цепи в соответствии с первым законом Кирхгофа будет равен алгебраической сумме токов I_1 , I_2 , I_3 , т.е. $I = I_1 + I_2 + I_3 = 0,2 + 0,2 + 0,1 = 0,5 \text{ A}$.

Следовательно, три источника тока можно эквивалентно заменить на один с током I .

5. Резистивные элементы R_1, R_2, R_3, R_4 соединены параллельно. Их эквивалентная проводимость

$$G_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{75} + \frac{1}{100} + \frac{1}{50} + \frac{1}{150} = 0.05 \text{ См},$$

а сопротивление $R_3 = \frac{1}{G_3} = \frac{1}{0.05} = 20 \text{ Ом}.$

6. Эквивалентная схема цепи (рисунок 1.20) может быть представлена источником тока и эквивалентной проводимостью

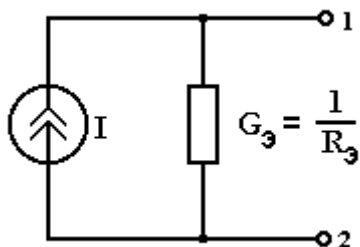


Рисунок 1.20

7. Схему (рисунок 1.20) заменим эквивалентно на схему с источником ЭДС (рисунок 1.21)

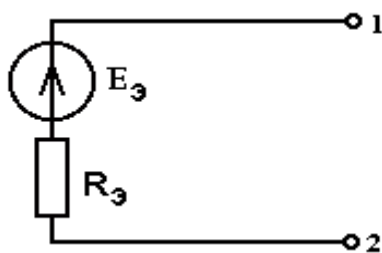


Рисунок 1.21

8. Эквивалентная ЭДС определяется выражением

$$E_3 = I \cdot \frac{1}{G_3} = I \cdot R_3 = 0.5 \cdot 20 = 10 \text{ В}.$$

2. Расчет линейных электрических цепей методом контурных токов

Учебные вопросы:

1. Расчет электрической цепи с источниками ЭДС
2. Расчет электрической цепи с источниками тока.
3. Расчет электрической цепи с источниками ЭДС и тока.

задание студентам для подготовки к занятию

1. Изучить:

1. Никулин В.И. Теория электрических цепей. - М.: РИОР, 2016 , с. 32-35.
2. Бакалов В.П., Воробиенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 45-53.
- 3.Шебес М. Р.Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа,1982-с.6.

2.Ответить на вопросы:

1. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
2. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
3. Каким образом определяется число уравнений при расчете цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа?
4. Каким образом определяется число уравнений при расчете цепи с источниками ЭДС методом контурных токов?
5. Каким образом составляется система уравнений при расчете цепи с источниками ЭДС методом контурных токов? Поясните на примере конкретной цепи.
6. Каким образом определяется число уравнений при расчете цепи с источниками ЭДС и тока методом контурных токов?

7. Каким образом составляется система уравнений при расчете цепи с источниками ЭДС и тока методом контурных токов? Поясните на примере конкретной цепи.
8. Назовите известные Вам методы решения систем линейных уравнений.
9. Поясните алгоритм расчета электрической цепи методом контурных токов.

3. Проанализировать решение задач:

№1.30, №1.32 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей М.: Высшая школа, 1982. - с.38-41)

В ходе практического занятия выполнить задания:

задание №1. Рассчитать методом контурных токов токи в ветвях для заданной согласно варианту электрической цепи с источниками ЭДС (таблица 1.4)

задание №2. Рассчитать методом контурных токов токи в ветвях для заданной согласно варианту электрической цепи с источниками тока (таблица 1.5)

задание №3. Рассчитать методом контурных токов токи в ветвях для заданной согласно варианту электрической цепи с источниками ЭДС и тока (таблица 1.6)

Таблица 1.4

Вариант №	Рисунок №	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	E ₁ , В	E ₂ , В	E ₃ , В
0	1.22	100	300	150	250	10	20	15
1	1.23	200	100	150	300	15	10	20
2	1.24	50	40	20	50	5	3	10
3	1.25	30	50	60	20	30	50	25
4	1.26	60	100	80	30	50	25	30
5	1.27	90	60	50	40	70	35	40
6	1.28	35	70	50	50	40	20	15
7	1.29	40	30	40	60	60	30	40
8	1.30	30	20	50	70	50	25	75
9	1.31	60	40	90	80	40	20	30
10	1.22	100	200	300	100	70	30	50
11	1.23	100	300	150	250	10	15	20
12	1.24	200	100	150	300	15	10	20
13	1.25	50	40	20	50	5	3	10
14	1.26	30	50	60	20	30	50	25
15	1.27	60	100	80	30	50	25	30
16	1.28	90	60	50	40	70	35	40
17	1.29	35	70	50	50	40	20	15
18	1.30	40	30	40	60	60	30	40
19	1.31	30	20	50	70	50	25	75
20	1.23	60	40	90	80	40	20	30
21	1.24	60	100	80	30	50	25	30
22	1.25	90	60	50	40	70	35	40
23	1.26	35	70	50	50	40	20	15
24	1.27	40	30	40	60	60	30	40
25	1.28	30	20	50	70	50	25	75
26	1.29	60	40	90	80	40	20	30
27	1.30	100	200	300	100	70	30	50
28	1.31	100	300	150	250	10	15	20
29	1.23	200	100	150	300	15	10	20
30	1.24	50	40	20	50	5	3	10

31	1.25	90	60	50	40	70	35	40
32	1.26	35	70	50	50	40	20	15
33	1.27	40	30	40	60	60	30	40
34	1.28	30	20	50	70	50	25	75
35	1.29	60	40	90	80	40	20	30
36	1.30	60	100	80	30	50	25	30
37	1.31	90	60	50	40	70	35	40
38	1.23	35	70	50	50	40	20	15
39	1.24	40	30	40	60	60	30	40
40	1.25	30	20	50	70	50	25	75
41	1.23	30	20	50	70	15	10	20
42	1.24	60	40	90	80	5	3	10
43	1.25	60	100	80	30	30	50	25
44	1.26	35	70	50	50	50	25	30
45	1.27	90	60	50	40	40	20	30

Таблица 1.5

Вариант №	Рисунок №	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	J ₁ , А	J ₂ , А	J ₃ , А
0	1.32	10	20	15	35	10	25	20
1	1.33	200	100	150	300	1.5	1	2
2	1.34	50	40	20	50	5	3	1
3	1.35	30	50	60	20	3	5	2.5
4	1.36	60	100	80	30	5	2	3
5	1.37	90	60	50	40	7	3	4
6	1.38	35	70	50	50	4	2	1.5
7	1.39	40	30	40	60	6	3	4
8	1.40	30	20	50	70	5	2	5
9	1.41	60	40	90	80	4	2	3
10	1.32	100	200	300	100	7	3	5
11	1.33	100	300	150	250	1	1.5	2
12	1.34	200	100	150	300	1.5	1	2
13	1.35	50	40	20	50	5	3	1
14	1.36	30	50	60	20	3	5	2.5
15	1.37	60	100	80	30	5	2	3

16	1.38	90	60	50	40	7	3	4
17	1.39	35	70	50	50	4	2	1.5
18	1.40	40	30	40	60	6	3	4
19	1.41	30	20	50	70	5	2	5
20	1.32	60	40	90	80	4	2	3
21	1.33	60	100	80	30	7	3	5
22	1.34	90	60	50	40	7	3	5
23	1.35	35	70	50	50	1	1.5	2
24	1.36	40	30	40	60	1.5	1	2
25	1.37	30	20	50	70	5	3	1
26	1.38	60	40	90	80	3	5	2.5
27	1.39	100	200	300	100	5	2	3
28	1.40	100	300	150	250	7	3	4
29	1.41	200	100	150	300	4	2	1.5
30	1.32	50	40	20	50	6	3	4
31	1.33	90	60	50	40	5	2	5
32	1.34	35	70	50	50	7	3	5
33	1.35	40	30	40	60	1	1.5	2
34	1.36	30	20	50	70	1	1.5	2
35	1.37	60	40	90	80	1.5	1	2
36	1.38	60	100	80	30	5	3	1
37	1.39	90	60	50	40	3	5	2.5
38	1.40	35	70	50	50	5	2	3
39	1.41	40	30	40	60	7	3	4
40	1.32	30	20	50	70	4	2	1.5
41	1.33	90	60	50	40	7	3	5
42	1.34	35	70	50	50	7	3	5
43	1.35	40	30	40	60	1	1.5	2
44	1.36	30	20	50	70	6	3	4
45	1.37	30	20	50	70	5	2	5

Таблица 1.6

Вариант №	Рисунок №	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	E ₁ , В	E ₂ , В	J, А
0	1.42	100	300	150	250	10	15	0.1
1	1.43	200	100	150	300	15	10	0.05
2	1.44	50	40	20	50	5	3	0.2
3	1.45	30	50	60	20	30	50	0.1
4	1.46	60	100	80	30	50	25	0.5
5	1.47	90	60	50	40	70	35	1
6	1.48	35	70	50	50	40	20	1
7	1.49	40	30	40	60	60	30	1.5
8	1.50	30	20	50	70	50	25	2
9	1.51	60	40	90	80	40	20	1
10	1.42	100	200	300	100	70	30	0.1
11	1.43	100	300	150	250	10	15	0.5
12	1.44	200	100	150	300	15	10	0.2
13	1.45	50	40	20	50	5	3	0.1
14	1.46	30	50	60	20	30	50	0.5
15	1.47	60	100	80	30	50	25	1
16	1.48	90	60	50	40	70	35	1
17	1.49	35	70	50	50	40	20	1.5
18	1.50	40	30	40	60	60	30	2
19	1.51	30	20	50	70	50	25	1
20	1.42	60	40	90	80	40	20	0.1
21	1.43	60	100	80	30	50	25	0.5
22	1.44	90	60	50	40	70	35	1
23	1.45	35	70	50	50	40	20	0.1
24	1.46	40	30	40	60	60	30	0.5
25	1.47	30	20	50	70	50	25	0.2
26	1.48	60	40	90	80	40	20	0.1
27	1.49	100	200	300	100	70	30	0.5
28	1.50	100	300	150	250	10	15	1
29	1.51	200	100	150	300	15	10	1
30	1.42	50	40	20	50	5	3	1.5

31	1.43	90	60	50	40	70	35	2
32	1.44	35	70	50	50	40	20	1
33	1.45	40	30	40	60	60	30	0.1
34	1.46	30	20	50	70	50	25	1
35	1.47	60	40	90	80	40	20	0.1
36	1.48	60	100	80	30	50	25	0.5
37	1.49	90	60	50	40	70	35	0.2
38	1.50	35	70	50	50	40	20	0.1
39	1.51	40	30	40	60	60	30	2
40	1.42	30	20	50	70	50	25	0.5
41	1.43	100	300	150	250	10	15	0.5
42	1.44	30	20	50	70	15	10	0.2
43	1.45	60	40	90	80	5	3	0.1
44	1.46	60	100	80	30	40	20	0.1
45	1.47	30	20	50	70	60	30	2
46	1.48	90	60	50	40	50	25	0.5

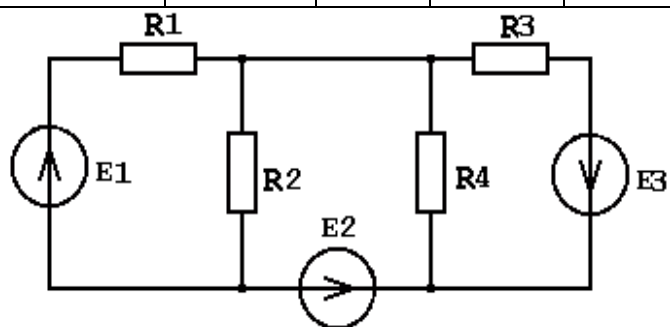


Рисунок 1.22

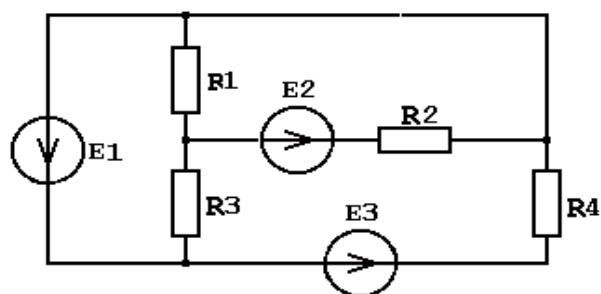


Рисунок 1.23

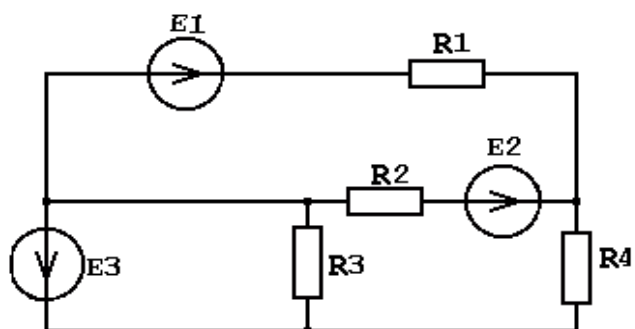


Рисунок 1.24

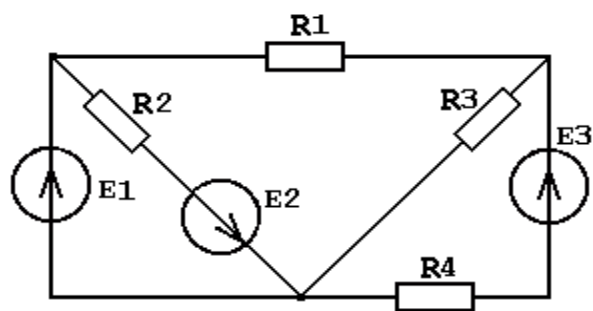


Рисунок 1.25

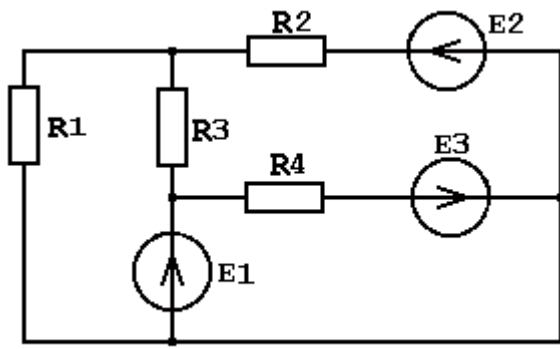


Рисунок 1.26

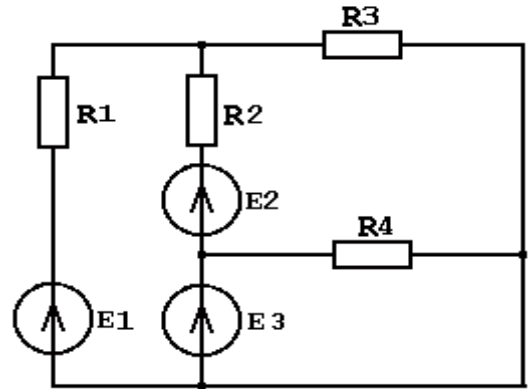


Рисунок 1.27

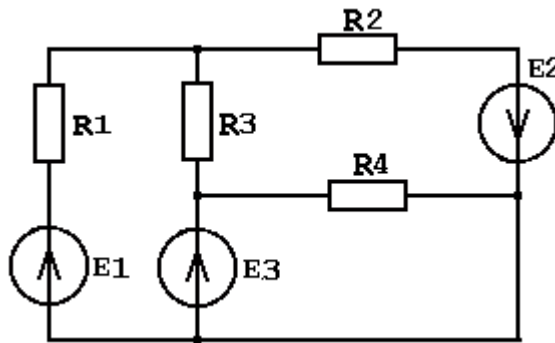


Рисунок 1.28

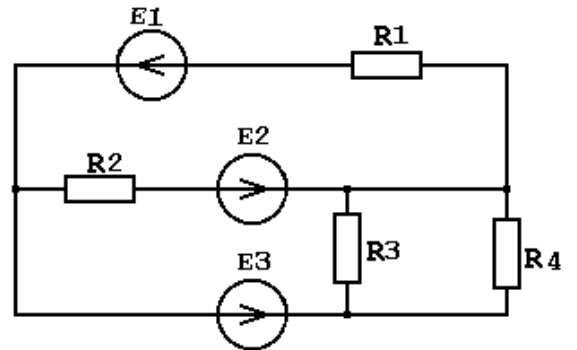


Рисунок 1.29

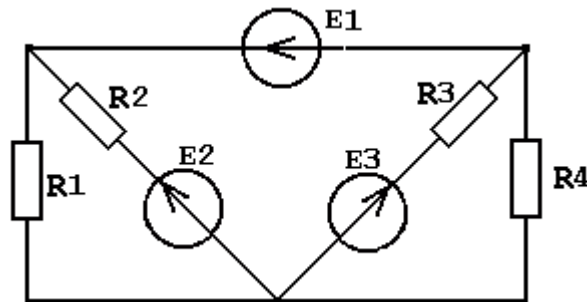


Рисунок 1.30

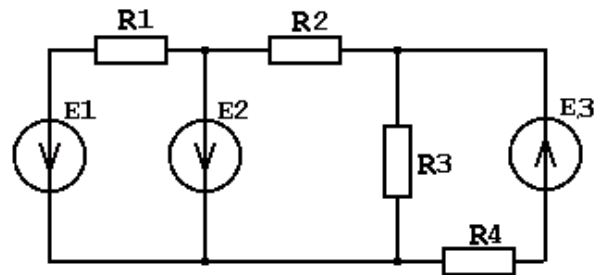


Рисунок 1.31

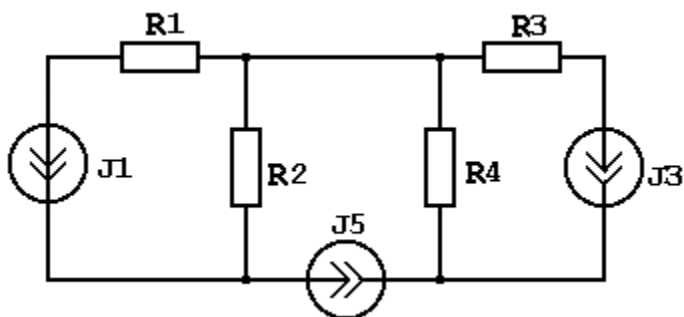


Рисунок 1.32

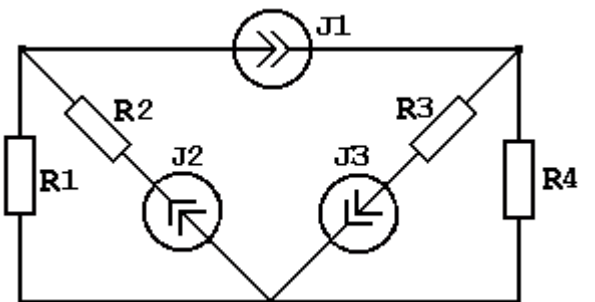


Рисунок 1.33

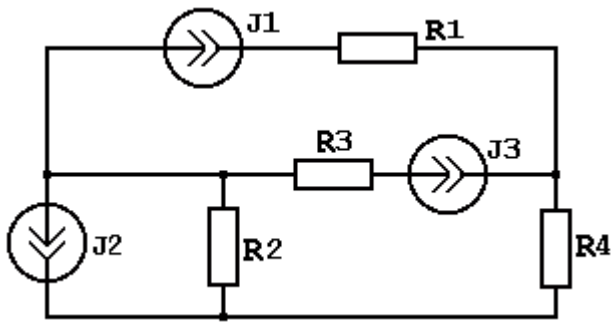


Рисунок 1.34

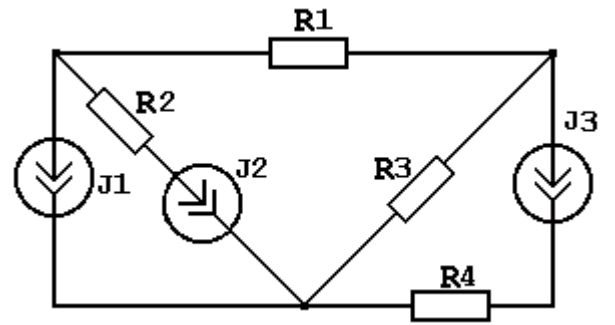


Рисунок 1.35

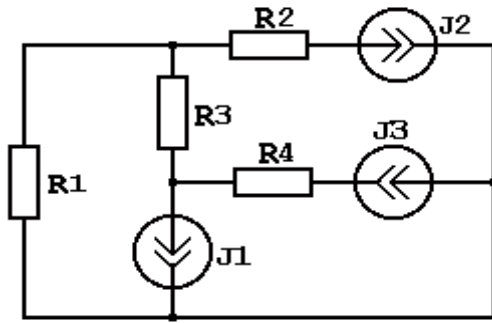


Рисунок 1.36

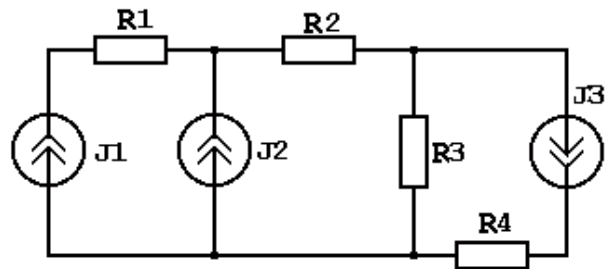


Рисунок 1.37

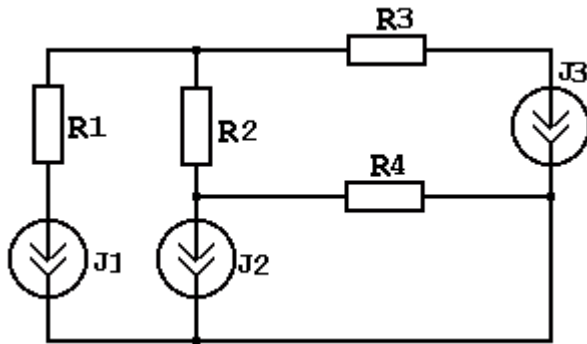


Рисунок 1.38

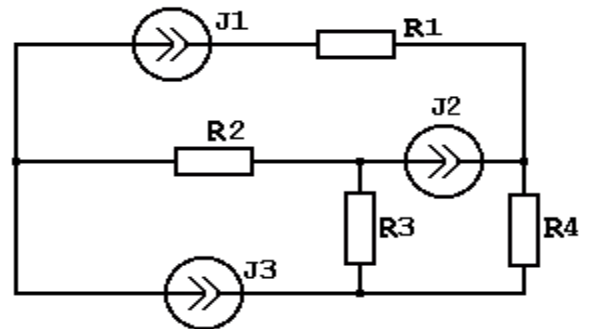


Рисунок 1.39

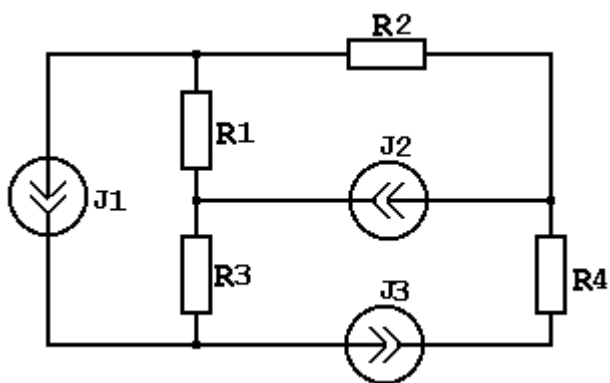


Рисунок 1.40

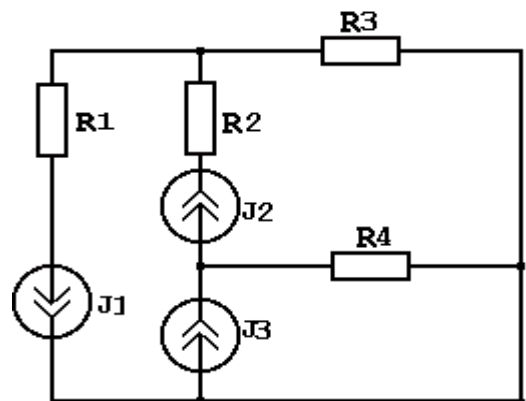


Рисунок 1.41

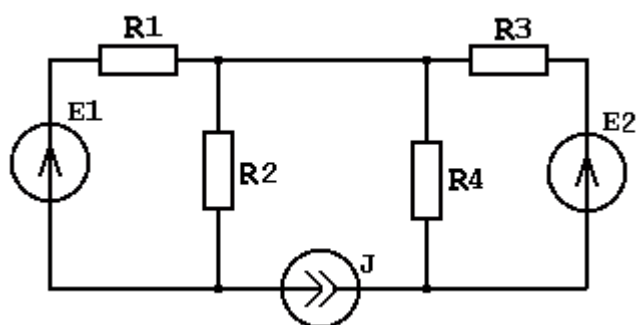


Рисунок 1.42

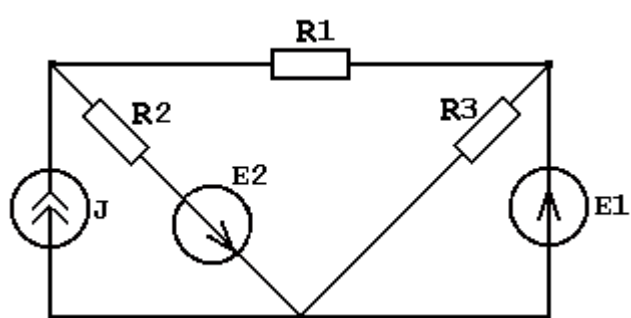


Рисунок 1.43

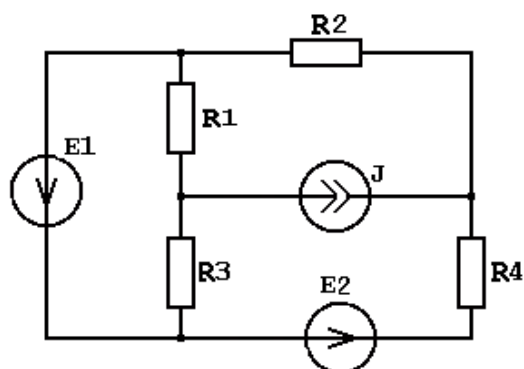


Рисунок 1.44

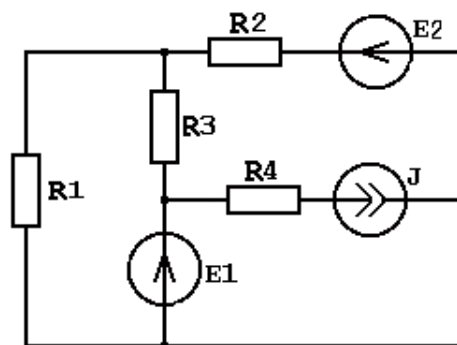


Рисунок 1.45

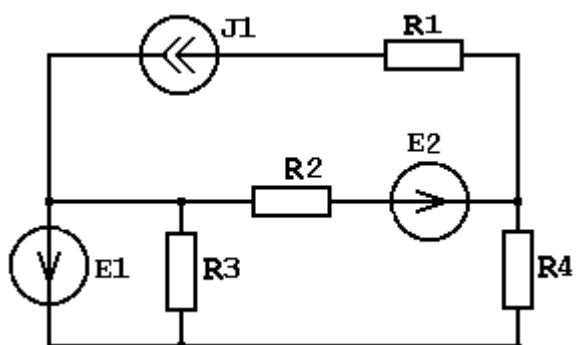


Рисунок 1.46

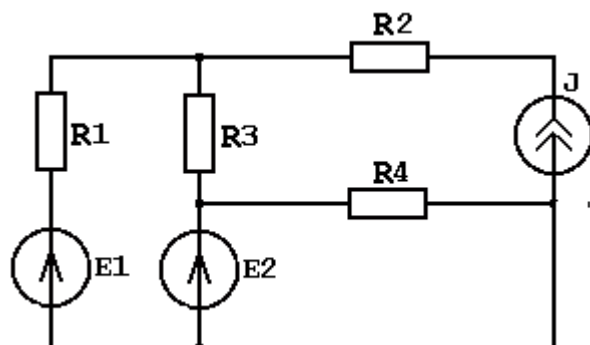


Рисунок 1.47

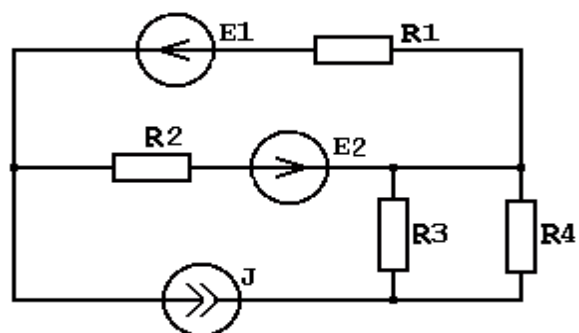


Рисунок 1.48

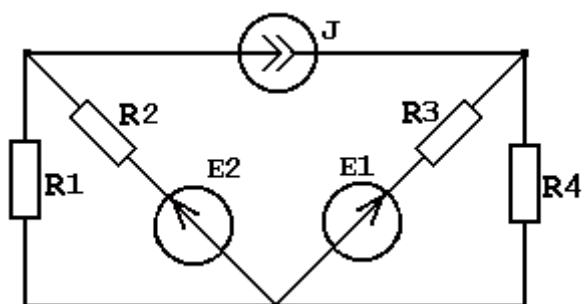


Рисунок 1.49

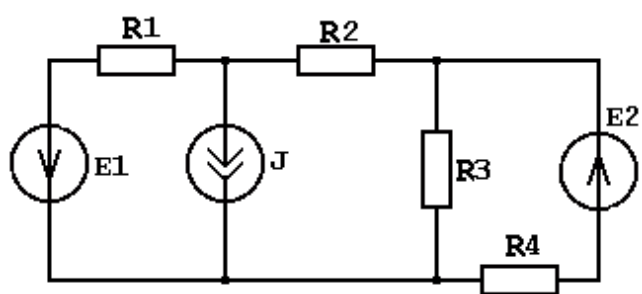


Рисунок 1.50

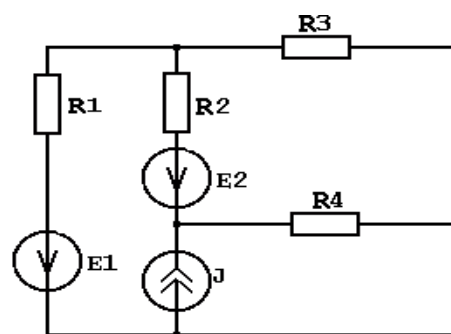


Рисунок 1.51

Пример выполнения заданий (вариант №0)

Задание №1. Методом контурных токов рассчитать токи в ветвях электрической цепи (рисунок 1.22), если $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 300 \text{ Ом}$, $R_3 = 150 \text{ Ом}$, $R_4 = 250 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $E_2 = 20 \text{ В}$, $E_3 = 15 \text{ В}$.

Решение

1. Определяем число независимых контуров (число контурных токов) в электрической цепи (рисунок 1.22) $N = n_b - n_y + 1 = 5 - 3 + 1 = 3$
2. Определяем число уравнений $N_k = n_b - n_y + 1 - n_j = 5 - 3 + 1 - 0 = 3$
Здесь n_b – число ветвей в схеме, n_y – число узлов, n_j – число ветвей, содержащих источники тока.

3. Система уравнений при $N_k = 3$ и $n_j = 0$ имеет вид

$$R_{11} \cdot I_{1k} + R_{12} \cdot I_{2k} + R_{13} \cdot I_{3k} = E_{11}$$

$$R_{21} \cdot I_{1k} + R_{22} \cdot I_{2k} + R_{23} \cdot I_{3k} = E_{22}$$

$$R_{31} \cdot I_{1k} + R_{32} \cdot I_{2k} + R_{33} \cdot I_{3k} = E_{33}$$

4. Указываем условно-положительные направления контурных токов в ветвях схемы (Рисунок 1.75)

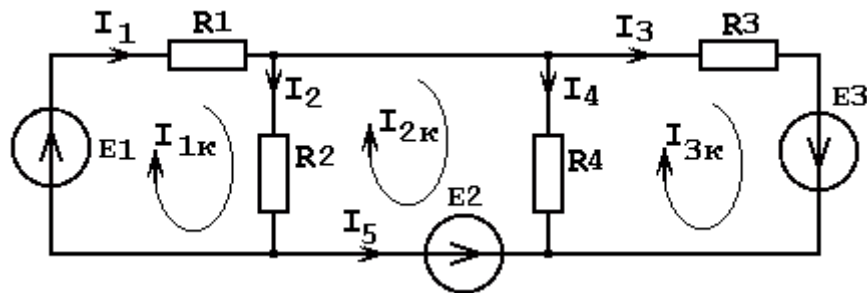


Рисунок 1.75

5. Определяем собственные сопротивления контуров, как сумму сопротивлений элементов, входящих в контур

$$R_{11} = R_1 + R_2 = 100 + 300 = 400 \text{ Ом},$$

$$R_{22} = R_2 + R_4 = 300 + 250 = 550 \text{ Ом},$$

$$R_{33} = R_3 + R_4 = 150 + 250 = 400 \text{ Ом}.$$

6. Определяем общие сопротивления R_{ij} контуров j и i . Со знаком "+" берем сопротивления элементов, в которых контурные токи совпадают по направлению

$$R_{12} = R_{21} = -R_2 = -300 \text{ Ом}, \quad R_{13} = R_{31} = 0, R_{23} = R_{32} = -R_4 = -250 \text{ Ом}.$$

7. Определяем контурные ЭДС как алгебраическую сумму ЭДС, входящих в данный контур. Со знаком "+" в сумму входят ЭДС, совпадающие по направлению с контурным током $E_{11} = E_1 = 10 \text{ В}$, $E_{22} = -E_2 = -20 \text{ В}$,

$$E_{33} = E_3 = 15 \text{ В}.$$

8. После подстановки рассчитанных величин в систему уравнений получим

$$\begin{cases} 400 \cdot I_{1k} - 300 \cdot I_{2k} + 0 \cdot I_{3k} = 10 \\ -300 \cdot I_{1k} + 550 \cdot I_{2k} - 250 \cdot I_{3k} = -20 \\ 0 \cdot I_{1k} - 250 \cdot I_{2k} + 400 \cdot I_{3k} = 15 \end{cases}$$

9. Для решения полученной системы линейных уравнений можно использовать различные методы, известные из курса математики. Для расчета токов используем правила Крамера.

9.1.

Находим

определители:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 400 & -300 & 0 \\ -300 & 550 & -250 \\ 0 & -250 & 400 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 400 & -300 & 0 & 400 & -300 \\ -300 & 550 & -250 & -300 & 550 \\ 0 & -250 & 400 & 0 & -250 \end{vmatrix} = 400 \cdot 550 \cdot 400 + (-300) \cdot (-250) -$$

$$- 0 \cdot 550 \cdot 0 - 400(-250) \cdot (-250) - (-300) \cdot (-300) \cdot (400) = 2 \cdot 7 \cdot 10^7 \text{ Ом}^3,$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 10 & -300 & 0 \\ -20 & 550 & -250 \\ 15 & -250 & 400 \end{vmatrix} = 3 \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{Ом}^2,$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 400 & 10 & 0 \\ -300 & -20 & -250 \\ 0 & 15 & 400 \end{vmatrix} = -5 \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{Ом}^2,$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 400 & -300 & 10 \\ -300 & 550 & -20 \\ 0 & -250 & 15 \end{vmatrix} = 7 \cdot 10^5 \text{ В} \cdot \text{Ом}^2.$$

9.2. Находим контурные токи

$$I_{1k} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{3 \cdot 10^5}{2.7 \cdot 10^7} = 0.011 \text{ A},$$

$$I_{2k} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-5 \cdot 10^5}{2.7 \cdot 10^7} = -0.019 \text{ A},$$

$$I_{3k} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{7 \cdot 10^5}{2.7 \cdot 10^7} = 0.026 \text{ A}.$$

10. Определяем ток в каждой ветви, как алгебраическую сумму контурных токов в этой ветви

$$I_1 = I_{1k} = 0.011 \text{ A},$$

$$I_2 = I_{1k} - I_{2k} = 0.011 - (-0.019) = 0.03 \text{ A},$$

$$I_3 = I_{3k} = 0.026 \text{ A},$$

$$I_4 = I_{2k} - I_{3k} = -0.019 - 0.026 = -0.044 \text{ A},$$

$$I_5 = -I_{2k} = 0.019 \text{ A}.$$

Задание №2. Методом контурных токов рассчитать токи в заданной электрической цепи рисунок 1.32, если $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 15 \text{ Ом}$, $R_4 = 35 \text{ Ом}$, $J_1 = 10 \text{ A}$, $J_3 = 20 \text{ A}$, $J_2 = 25 \text{ A}$.

Решение

1. Определяем число независимых контуров (число контурных токов)

$$N = n_b - n_y + 1 = 5 - 3 + 1 = 3$$

2. Определяем число уравнений $N_k = n_b - n_y + 1 - n_J = 5 - 3 + 1 - 3 = 0$

Здесь n_b – число ветвей в схеме, n_y – число узлов, n_J – число ветвей, содержащих источники тока.

Число уравнений равно нулю, так как каждый контурный ток определяется током соответствующего источника тока и, следовательно, равен этому току, т.е. $I_{1k} = J_1 = 10 \text{ A}$, $I_{2k} = J_2 = 25 \text{ A}$, $I_{3k} = J_3 = 20 \text{ A}$.

3. Указываем условно-положительные направления токов в ветвях и контурных токов в схеме (рисунок 1.76). При этом целесообразно направления контурных токов выбирать совпадающими с направлением токов в соответствующих источниках тока. Причем в каждой ветви с источником тока должен быть только один контурный ток.

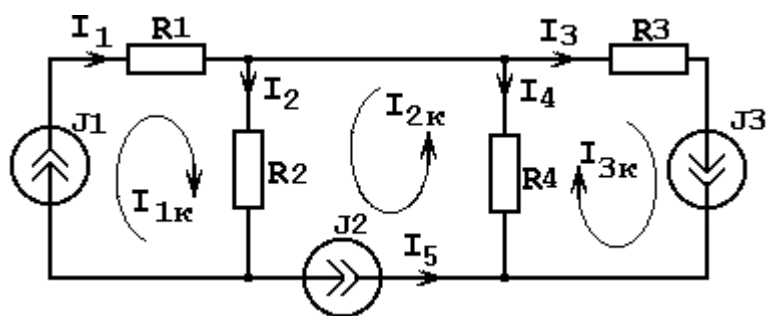


Рисунок 1.76

4. Определяем токи в ветвях

$$I_1 = I_{1k} = 10 \text{ A}, \quad I_2 = I_{1k} + I_{2k} = 10 + 25 = 35 \text{ A}, \quad I_3 = I_{3k} = 20 \text{ A}, \quad I_4 = -I_{2k} - I_{3k} = -45 \text{ A}.$$

Задание №3. Методом контурных токов рассчитать токи в ветвях заданной электрической цепи (рисунок 1.42), если $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 300 \text{ Ом}$, $R_3 = 150 \text{ Ом}$, $R_4 = 250 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $E_2 = 15 \text{ В}$, $J = 0.10 \text{ А}$.

Решение

1. Определяем число независимых контуров (число контурных токов)

$$N = n_b - n_y + 1 = 5 - 3 + 1 = 3$$

2. Определяем число уравнений $N_k = n_b - n_y + 1 - n_J = 5 - 3 + 1 - 1 = 2$

3. Записываем систему 2^x уравнений для трех контурных токов

$$\begin{cases} R_{11} \cdot I_{1k} + R_{12} \cdot I_{2k} + R_{13} \cdot I_{3k} = E_{11} \\ R_{21} \cdot I_{1k} + R_{22} \cdot I_{2k} + R_{23} \cdot I_{3k} = E_{22} \end{cases}$$

4. Указываем условно-положительные направления контурных токов и токов в ветвях схемы (рисунок 1.77). При этом контурные токи выбираем таким образом, чтобы через ветвь с источником тока проходил только один контурный ток.

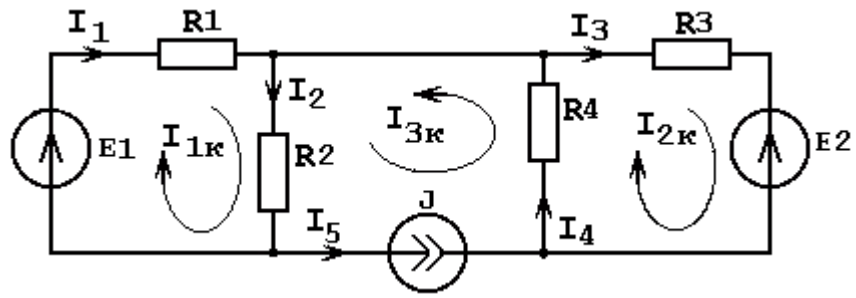


Рисунок 1.77

5. Определяем собственные сопротивления контуров

$$R_{11} = R_1 + R_2 = 100 + 300 = 400 \text{ Ом},$$

$$R_{22} = R_3 + R_4 = 150 + 250 = 400 \text{ Ом}.$$

6. Определяем общие сопротивления R_{ij} для контуров i и j

$$R_{12} = R_{21} = 0, R_{13} = R_{31} = R_2 = 300 \text{ Ом}, R_{23} = R_4 = 250 \text{ Ом}$$

7. Определяем контурные ЭДС $E_{11} = E_1 = 10 \text{ В}, E_{22} = -E_3 = -15 \text{ В}.$

8. После подстановки рассчитанных величин в систему уравнений,

учитывая, что $I_{3k}=J_5$ получим

$$\begin{cases} 400 \cdot I_{1k} + 0 \cdot I_{2k} + 300 \cdot 0.1 = 10 \\ 0 \cdot I_{1k} + 400 \cdot I_{2k} + 250 \cdot 0.1 = -15 \end{cases}$$

9. Решая систему уравнений

$$\begin{cases} 400 \cdot I_{1k} = 10 - 30 \\ 250 \cdot I_{2k} = -15 - 25 \end{cases},$$

получим

$$I_{1k} = -\frac{20}{400} = -0.05 \text{ А},$$

$$I_{2k} = -\frac{40}{400} = -0.1 \text{ А}.$$

10. Определяем токи в ветвях

$$I_1 = I_{1k} = -0.05 \text{ А},$$

$$I_2 = I_{1k} + I_{3k} = -0.05 + 0.1 = +0.5 \text{ А},$$

$$I_3 = I_{2k} = -0.1 \text{ А},$$

$$I_4 = I_{2k} + I_{3k} = -0.1 + 0.1 = 0 \text{ А},$$

$$I_5 = I_{3k} = 0.1 \text{ А}.$$

3. Расчет линейных электрических цепей методом узловых потенциалов

Учебные вопросы:

1. Расчет электрической цепи с источниками ЭДС
2. Расчет электрической цепи с источниками тока.
3. Расчет электрической цепи с источниками ЭДС и тока.

задание студентам для подготовки к занятию

1. Изучить:

1. Никулин В.И. Теория электрических цепей. - М.: РИОР, 2016 , с. 35-38.
2. Бакалов В.П., Воробиенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 45-53.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с.5, 7-8.

2. Ответить на вопросы:

1. Сформулируйте закон Ома для замкнутой одноконтурной цепи.
2. Сформулируйте закон Ома для ветви из резистивных элементов, не содержащей источника ЭДС
3. Сформулируйте обобщенный закон Ома. Запишите формулу обобщенного закона Ома на примере конкретной цепи.
4. Каким образом определяется число уравнений при расчете цепи с источниками ЭДС методом узловых потенциалов?
5. Каким образом составляется система уравнений при расчете методом узловых потенциалов цепи, содержащей отдельные ветви только с идеализированными источниками ЭДС? Поясните на примере конкретной цепи.
6. Каким образом определяется число уравнений при расчете цепи с источниками ЭДС и тока методом узловых потенциалов?

7. Каким образом составляется система уравнений при расчете цепи с источниками ЭДС и тока методом узловых потенциалов? Поясните на примере конкретной цепи.
8. Назовите известные Вам методы решения систем линейных уравнений.
9. Поясните алгоритм расчета электрической цепи методом узловых потенциалов.
10. Каким образом определяются токи в ветвях при расчете цепи методом узловых потенциалов?
11. Каким образом при расчете цепи методом узловых потенциалов определяется ток в ветви, содержащей только идеализированный источник ЭДС?

3. Проанализировать решение задач:

№1.30, №1.32 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей М.: Высшая школа, 1982. - с.38-41)

В ходе практического занятия выполнить задания:

задание №1. Рассчитать методом узловых потенциалов токи в ветвях для заданной согласно варианту электрической цепи с источниками ЭДС (таблица 1.4)

задание №2. Рассчитать методом узловых потенциалов токов токи в ветвях для заданной согласно варианту электрической цепи с источниками тока (таблица 1.5)

задание №3. Рассчитать методом узловых потенциалов токи в ветвях для заданной согласно варианту электрической цепи с источниками ЭДС и тока (таблица 1.6)

Пример выполнения заданий (вариант №0)

Задание №1. Методом узловых потенциалов рассчитать токи в ветвях заданной электрической цепи (рисунок 1.22), если $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 300 \text{ Ом}$, $R_3 = 150 \text{ Ом}$, $R_4 = 250 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $E_2 = 20 \text{ В}$, $E_3 = 15 \text{ В}$.

Решение

1. На схеме указываем номера узлов (рисунок 1.78).

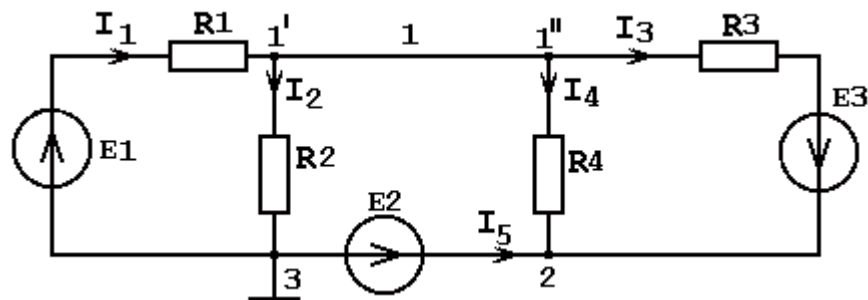


Рисунок 1.78

Выбираем опорный узел, в качестве которого рекомендуется выбирать тот из узлов, к которому примыкает наибольшее число ветвей, состоящих только из идеальных источников ЭДС. На рисунке 1.78 можно выбрать в качестве опорного узел 2 или узел 3. Выбираем в качестве опорного узел 3 и принимаем его потенциал $\varphi_3 = 0$. На рисунке 1.78 показываем его соединение с корпусом. Узлы 1' и 1'' следует рассматривать как один узел, так как они соединены идеальным проводником и, следовательно, их потенциалы равны между собой.

2. Определяем число уравнений $N = n_y - 1 - n_{\text{ЭДС}} = 3 - 1 - 1 = 1$

Здесь n_y - число узлов в цепи

$n_{\text{ЭДС}}$ - число ветвей, состоящих только из идеализированных источников ЭДС. В схеме (рисунок 1.78) ветвь с источником E_2 .

3. Определяем потенциал узла 2. Так как ЭДС направлена от узла 3 к узлу 2, то потенциал φ_2 будет больше потенциала φ_3 на величину E_2 .

$$\varphi_2 = \varphi_3 + E_2 = 0 + 20 = 20 \text{ В.}$$

4. Составим уравнение для определения потенциала узла 1

$$G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 = \sum_1 EG,$$

Здесь G_{11} - сумма проводимостей ветвей, присоединенных к узлу 1;

G_{12} - сумма проводимостей ветвей, соединяющих узел 1 и 2;

$\sum_1 EG$ - алгебраическая сумма произведений ЭДС ветвей,

примыкающих к узлу 1, на их проводимости. При этом со знаком плюс берутся те произведения, в ветвях которых ЭДС действуют в направлении узла 1.

5. Определяем необходимые для расчета величины

$$G_{11} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{100} + \frac{1}{300} + \frac{1}{150} + \frac{1}{250} = 0.024 \text{ См},$$

$$G_{12} = \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{150} + \frac{1}{250} = 0.01066 \text{ См},$$

$$\sum_1 EG = E_1 \cdot \frac{1}{R_1} - E_3 \cdot \frac{1}{R_3} = 10 \cdot \frac{1}{100} - 15 \cdot \frac{1}{150} = 0$$

6. Решаем уравнение $0.024 \cdot \varphi_1 - 0.01066 \cdot 20 = 0$

$$\varphi_1 = \frac{0.213}{0.024} = 8.889 \text{ В}.$$

7. На схеме рисунок 1.78 указываем произвольно условно-положительные направления токов в ветвях.

8. По закону Ома для участка цепи с источником ЭДС определяем

$$I_1 = \frac{\varphi_3 - \varphi_1 + E_1}{R_1} = \frac{0 - 8.889 + 10}{100} = 0.011 \text{ А},$$

$$I_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + E_3}{R_3} = \frac{8.889 - 20 + 15}{150} = 0.026 \text{ А}.$$

9. По закону Ома для участка цепи с резистивным элементом находим

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{R_2} = \frac{8.889 - 0}{300} = 0.03 \text{ А},$$

$$I_4 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_4} = \frac{8.889 - 0}{250} = -0.044 \text{ А}.$$

10. Используя 1 закон Кирхгофа для узла 2, находим

$$I_5 = -I_3 - I_4 = -0.026 - (-0.044) = 0.019 \text{ А}.$$

11. Для проверки правильности выполнения расчетов определим баланс мощностей.

11.1. Мощность, генерируемая источниками энергии:

$$P_{\text{ист}} = E_1 \cdot I_1 + E_3 \cdot I_3 + E_2 \cdot I_5 = 10 \cdot 0.011 + 15 \cdot 0.026 + 20 \cdot 0.019 = 0.87 \text{ Вт}.$$

11.2. Мощность, потребляемая пассивными элементами схемы

$$P_{\text{п}} = I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 = \\ = (0.011)^2 \cdot 100 + (0.03)^2 \cdot 300 + (-0.026)^2 \cdot 150 + (-0.044)^2 \cdot 250 = 0.87 \text{ Вт}.$$

Так как $P_{\text{ист}} = P_{\text{п}} = 0.87 \text{ Вт}$, то в цепи выполняется условие баланса мощностей.

Задание №2. Методом узловых потенциалов рассчитать токи в заданной электрической цепи (рисунок 1.32), если $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 15 \text{ Ом}$, $R_4 = 35 \text{ Ом}$, $J_1 = 10 \text{ А}$, $J_2 = 0.5 \text{ А}$, $J_3 = 20 \text{ А}$.

Решение

1. Указываем номера узлов и выбираем в качестве опорного узел 3 (рисунок 1.79), его потенциал $\varphi_3 = 0$.

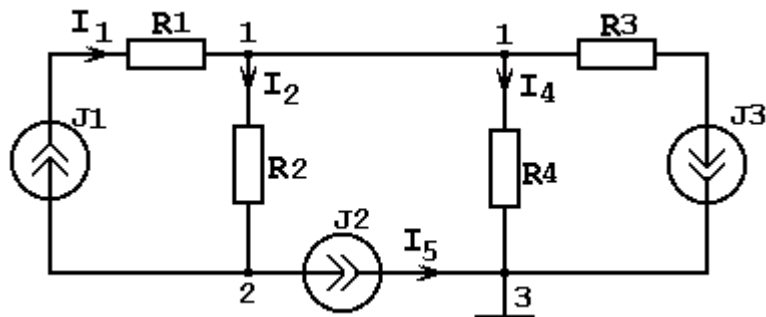


Рисунок 1.79

2. Число уравнений $N = n_y - 1 - n_{\text{эdc}} = 3 - 1 - 0 = 2$

3. Составляем систему уравнений

$$\begin{cases} G_{11} \cdot \varphi_1 - G_{12} \cdot \varphi_2 = \sum_1 J \\ -G_{12} \cdot \varphi_1 + G_{22} \cdot \varphi_2 = \sum_2 J \end{cases}$$

Здесь $\sum_i J$ - алгебраическая сумма токов источников тока, присоединенных к узлу 1,

$\sum_2 J$ - алгебраическая сумма токов источников тока, присоединенных к узлу 2.

4. Определяем необходимые для решения системы уравнений величины, принимая во внимание, что проводимость ветви, содержащей источник тока равна нулю.

$$G_{11} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{20} + \frac{1}{35} = 0.079 \text{ См},$$

$$G_{12} = G_{21} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{20} = 0.05 \text{ См},$$

$$G_{22} = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{20} = 0.05 \text{ См}.$$

$$\sum_1 J = J_1 - J_3 = 10 - 20 = -10 \text{ А},$$

$$\sum_2 J = -J_1 - J_2 = -10 - 25 = -35 \text{ А}.$$

5. Решаем систему уравнений
$$\begin{cases} 0.079 \cdot \varphi_1 - 0.05 \cdot \varphi_2 = -10 \\ -0.05 \cdot \varphi_1 + 0.05 \cdot \varphi_2 = -35 \end{cases}$$

Находим
$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -1575 \text{ В}, \\ \varphi_2 &= -2275 \text{ В}. \end{aligned}$$

6. Указываем на схеме рисунок 1.79 условно-положительные направления токов.

7. Находим токи в ветвях

7.1. По закону Ома:

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_2} = \frac{-1575 - (-2275)}{20} = 35 \text{ А}, \quad I_4 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{R_4} = \frac{-1575}{35} = -45 \text{ А}.$$

7.2. Ток в ветви, содержащей источник тока, определяется величиной тока, генерируемого этим источником.

$$I_1 = J_1 = 10 \text{ А}, \quad I_3 = J_3 = 20 \text{ А}, \quad I_5 = J_5 = 25 \text{ А}.$$

8. Для узла 2 проверим выполнение 1 закона Кирхгофа

$$\begin{aligned} I_2 - I_1 - I_5 &= 0 \\ 35 - 10 - 25 &= 0 \end{aligned}$$

Задание №3. Методом узловых потенциалов рассчитать токи в ветвях заданной электрической цепи (рисунок 1.42), если $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 300 \text{ Ом}$, $R_3 = 150 \text{ Ом}$, $R_4 = 250 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $E_3 = 15 \text{ В}$, $J_2 = 0.1 \text{ А}$.

Решение

1. Укажем номера узлов на схеме и примем за опорный 3 узел, потенциал которого приравняем 0 (рисунок 1.80).

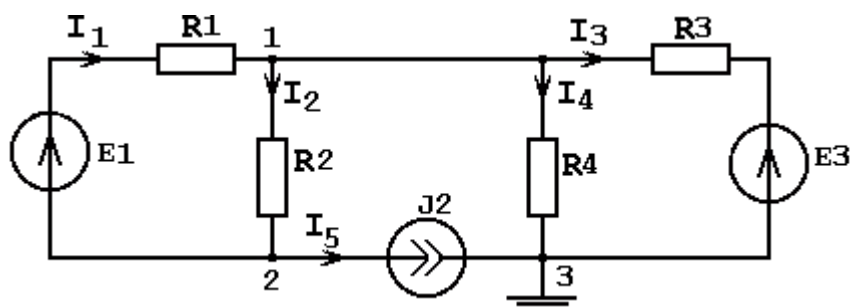


Рисунок 1.80

2. Число уравнений $N = n_y - 1 - n_{\text{ЭДС}} = 3 - 1 - 0 = 2$.

3. Составляем систему уравнений

$$\begin{cases} G_{11}\varphi_1 - G_{12}\varphi_2 = \sum_1 EG + \sum_1 J \\ -G_{21}\varphi_1 + G_{22}\varphi_2 = \sum_2 EG + \sum_1 J \end{cases}$$

4. Определяем величины, необходимые для решения системы уравнений

$$G_{11} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} = \frac{1}{100} + \frac{1}{300} + \frac{1}{150} + \frac{1}{250} = 0.024 \text{ См},$$

$$G_{12} = G_{21} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{100} + \frac{1}{300} = 0.013 \text{ См},$$

$$G_{22} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{100} + \frac{1}{300} = 0.013 \text{ См},$$

$$\sum_1 EG = E_1 \cdot \frac{1}{R_1} + E_3 \cdot \frac{1}{R_3} = 10 \cdot \frac{1}{100} + 15 \cdot \frac{1}{150} = 0.2 \text{ А},$$

$$\sum_1 J = 0,$$

$$\sum_2 EG = -E_1 \cdot \frac{1}{R_1} = -10 \cdot \frac{1}{100} = -0.1 \text{ А},$$

$$\sum_2 J = -J_2 = -0.1 \text{ А}.$$

5. Решаем систему уравнений

$$\begin{cases} 0.024 \cdot \varphi_1 - 0.013 \cdot \varphi_2 = 0.2 \\ -0.013 \cdot \varphi_1 + 0.013 \cdot \varphi_2 = 0.2 \end{cases} \text{ и находим } \begin{cases} \varphi_1 = 0 \text{ В}, \\ \varphi_2 = -15 \text{ В}. \end{cases}$$

6. Выбираем условно-положительные направления токов в ветвях.

7. Применяя закон Ома для участка цепи, находим

$$I_1 = \frac{\varphi_2 - \varphi_1 + E_1}{R_1} = -0.05 \text{ А},$$

$$I_2 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_2} = 0.05 \text{ А},$$

$$I_3 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3 - E_3}{R_3} = -0.1 \text{ А},$$

$$I_4 = \frac{\varphi_1 - \varphi_3}{R_4} = \frac{0 - 0}{250} = 0 \text{ А}.$$

8. Ток в ветвях с источником тока

$$I_5 = J_2 = 0.1 \text{ А}.$$

9. Проверим выполнение первого закона Кирхгофа для узла 2

$$-I_1 - I_5 + I_2 = 0$$

$$-(-0.05) - 0.1 + 0.05 = 0$$

10. Для проверки правильности выполнения расчетов определим баланс мощностей.

10.1. Мощность, генерируемая источниками энергии:

$$P_{\text{ист}} = E_1 \cdot I_1 - E_3 \cdot I_3 + U_2 \cdot I_2 = 10 \cdot (-0.05) - 15 \cdot (-0.099) + 15 \cdot 0.1 = 2.5 \text{ Вт}.$$

Здесь U_2 – напряжение на источнике тока J_2 (рисунок 1.80)

$$U_2 = I_2 R_2 - I_4 R_4 = 0.05 \cdot 300 - 0 \cdot 250 = 15 \text{ В}.$$

10.2. Мощность, потребляемая пассивными элементами схемы

$$\begin{aligned} P_{\text{пз}} &= I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 = \\ &= (-0.05)^2 \cdot 100 + (0.05)^2 \cdot 300 + (-0.1)^2 \cdot 150 + 0^2 \cdot 250 = 2.5 \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Так как $P_{\text{ист}} = P_{\text{пз}} = 2.5 \text{ Вт}$, то в цепи выполняется условие баланса мощностей.

4. Расчет электрических цепей синусоидального тока

Учебные вопросы:

1. Расчет токов и напряжений в идеализированных элементах.
2. Расчет токов и напряжений при последовательном соединении элементов.
3. Расчет токов и напряжений при параллельном соединении элементов.

задание для подготовки к занятию

1. Изучить:

1. Никулин В.И. Теория электрических цепей. - М.: РИОР, 2016, с. 51-57.
2. Бакалов В.П., Воробиенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей.- М.: Радио и связь, 1998, с. 73-82.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с.47-51.

2. Ответить на вопросы:

1. Запишите выражение для комплексных амплитуды и действующего тока, если мгновенный ток $i = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ мА.

2. Построить векторную диаграмму для гармонического тока $i = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ мА.

3. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с резистивным элементом и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.

4. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с индуктивным элементом и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.

5. Записать выражение закона Ома в комплексной форме для участка цепи с емкостным элементом и изобразить векторную диаграмму тока и напряжения.

3. Проанализировать решение задач:

№2.24, 2.31 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей М.: Высшая школа, 1982. - с.66-67, 70)

В ходе практического занятия выполнить задания:

задание №1. Определить мгновенный ток в индуктивном элементе L (табл. 2.4), построить векторные и временные диаграммы тока и напряжения, если задано согласно варианту (табл. 2.4) напряжение на элементе u .

задание №2. Для заданного согласно варианту (табл. 2.4) емкостного элемента C и мгновенного тока i определить комплексные амплитуды и действующие токи и напряжения. Построить векторные и временные диаграммы тока и напряжения.

задание №3. Элементы цепи R и L (или C) (табл. 2.5) соединены последовательно и находятся под действием мгновенного тока i (или напряжения u). Определить приложенное мгновенное напряжение к цепи, мгновенные напряжения на элементах схемы. Построить векторные диаграммы тока и напряжений.

задание №4. Элементы цепи R , C (или L) (табл. 2.6) соединены параллельно и находятся под воздействием мгновенного напряжения u (или тока i). Определить мгновенные токи в цепи и в ее элементах. Построить векторную диаграмму токов и напряжения.

Таблица 2.4

Вариант №	L, Гн	мгновенное напряжение u			C, мкФ	мгновенный ток i		
		Um, В	ψ, град	ω, рад/с		Im, А	ψ,град	ω, рад/с
0	0.1	20	-30	10 ³	0.10	2.82	30	10 ⁵
1	0.2	10	45	10 ³	0.04	2.5	-25	10 ⁶
2	0.5	30	-20	10 ⁴	0.05	1.2	100	10 ⁷
3	0.15	40	110	10 ²	0.07	3.2	-35	10 ⁸
4	0.8	15	-75	10 ⁵	0.01	4.0	70	10 ⁹
5	0.05	20	195	10 ⁵	0.02	5.0	-60	10 ⁴
6	0.04	35	-15	10 ⁴	0.05	5.5	35	10 ⁵
7	0.3	60	210	10 ³	0.07	6.5	-70	10 ⁴
8	0.6	75	-35	10 ²	0.09	4.0	120	10 ⁵
9	0.65	45	60	10 ³	0.01	3.0	-40	10 ⁶
10	0.7	25	-70	10 ⁵	0.03	6.0	175	10 ⁷
11	0.75	75	40	10 ⁴	0.04	7.5	-80	10 ⁸
12	0.9	90	-130	10 ³	0.08	4.5	135	10 ⁹
13	0.3	20	145	10 ³	0.06	3.5	-45	10 ⁶
14	0.2	25	-200	10 ⁴	0.08	2.2	10	10 ⁷
15	0.25	40	140	10 ²	0.05	4.2	-95	10 ⁸
16	0.9	25	-175	10 ⁵	0.02	5.0	80	10 ⁹
17	0.03	30	95	10 ⁵	0.07	6.0	-160	10 ⁴
18	0.09	45	-115	10 ⁴	0.03	1.5	305	10 ⁵
19	0.6	30	10	10 ³	0.05	4.5	-170	10 ⁴
20	0.4	15	-135	10 ²	0.03	9.0	20	10 ⁵
21	0.85	35	160	10 ³	0.04	5.0	-140	10 ⁶
22	0.5	15	-170	10 ⁵	0.08	6.0	75	10 ⁷
23	0.7	70	60	10 ⁴	0.03	3.5	-100	10 ⁸
24	0.3	10	-30	10 ³	0.05	4.5	125	10 ⁹
25	0.6	20	65	10 ³	0.08	3.5	-125	10 ⁶
26	0.7	40	-120	10 ⁴	0.03	4.2	70	10 ⁷
27	0.1	70	170	10 ²	0.08	3.6	-30	10 ⁸
28	0.5	75	-75	10 ⁵	0.04	7.0	80	10 ⁹
29	0.25	28	19	10 ⁵	0.09	1.0	-90	10 ⁴
30	0.03	50	-145	10 ⁴	0.04	7.5	135	10 ⁵

31	0.35	70	230	10^3	0.03	2.5	-130	10^4
32	0.65	85	-305	10^2	0.01	4.3	320	10^5
33	0.5	95	60	10^3	0.08	3.8	-160	10^6
34	0.3	85	-150	10^5	0.07	6.5	105	10^7
35	0.7	75	400	10^4	0.04	4.5	-280	10^8
36	0.45	30	-10	10^3	0.09	1.5	30	10^9
36	0.36	26	14	10^3	0.05	2.5	-405	10^6
38	0.29	25	-260	10^4	0.08	6.2	100	10^7
39	0.75	49	340	10^2	0.04	4.8	-905	10^8
40	0.03	95	60	10^4	0.04	7.5	135	10^5
41	0.35	85	-150	10^3	0.03	6.5	105	10^4
42	0.65	75	400	10^2	0.01	4.5	-280	10^5
43	0.5	30	-10	10^3	0.08	1.5	30	10^6
44	0.3	26	14	10^5	0.07	2.5	-405	10^7
45	0.7	25	-260	10^4	0.04	6.2	100	10^8

Таблица 2.5

Вариант №	R, Ом	L, Гн	C, мкФ	мгновенное напряжение u			мгновенный ток i		
				U _m , В	ψ, град	ω, рад/с	I _m , мА	ψ, град	ω, рад/с
0	40	0.03	-	-	-	-	100	30	10 ³
1	20	-	0.1	20	-45	10 ⁵	-	-	-
2	400	0.04	-	-	-	-	10	-25	10 ⁴
3	60	-	0.2	30	50	10 ⁵	-	-	-
4	70	0.05	-	-	-	-	20	45	10 ⁴
5	100	-	0.02	40	120	10 ⁶	-	-	-
6	120	0.6	-	-	-	-	30	-120	10 ³
7	15	-	0.04	45	-30	10 ⁷	-	-	-
8	500	0.07	-	-	-	-	40	60	10 ⁴
9	3	-	0.2	60	70	10 ⁶	-	-	-
10	900	0.08	-	-	-	-	15	-75	10 ⁴
11	4	-	0.02	70	-20	10 ⁷	-	-	-
12	2	0.01	-	-	-	-	25	80	10 ⁴
13	30	-	0.3	30	-50	10 ⁵	-	-	-
14	600	0.03	-	-	-	-	20	-65	10 ⁴
15	80	-	0.4	40	60	10 ⁵	-	-	-
16	90	0.03	-	-	-	-	10	145	10 ⁴
17	200	-	0.06	25	150	10 ⁶	-	-	-
18	130	0.7	-	-	-	-	45	-140	10 ³
19	45	-	0.09	95	-300	10 ⁷	-	-	-
20	700	0.04	-	-	-	-	20	160	10 ⁴
21	6	-	0.3	20	50	10 ⁶	-	-	-
22	400	0.05	-	-	-	-	75	-175	10 ⁴
23	5	-	0.04	65	-200	10 ⁷	-	-	-
24	8	0.03	-	-	-	-	24	35	10 ⁴
25	30	-	0.1	15	25	10 ⁵	-	-	-
26	35	0.02	-	-	-	-	10	25	10 ⁴
27	200	-	0.04	80	240	10 ⁶	-	-	-
28	240	0.66	-	-	-	-	60	-20	10 ³
29	30	-	0.08	85	-60	10 ⁷	-	-	-

30	250	0.04	-	-	-	-	80	130	10^4
31	7	-	0.4	40	40	10^6	-	-	-
32	600	0.07	-	-	-	-	35	-95	10^4
33	5	-	0.03	40	-300	10^7	-	-	-
34	6	0.03	-	-	-	-	85	40	10^4
35	40	-	0.9	70	-120	10^5	-	-	-
36	200	0.08	-	-	-	-	80	-165	10^4
37	30	-	0.3	30	70	10^5	-	-	-
38	60	0.04	-	-	-	-	50	115	10^4
39	300	-	0.04	75	250	10^6	-	-	-
40	150	0.3	-	-	-	-	55	-100	10^3
41	4	-	0.02	70	-300	10^7	-	-	-
42	2	0.01	-	-	-	-	20	160	10^4
43	30	-	0.3	30	50	10^6	-	-	-
44	600	0.03	-	-	-	-	75	-175	10^4
45	80	-	0.4	40	-200	10^7	-	-	-

Таблица 2.6

Вариант №	R, Ом	L, Гн	C, мкФ	мгновенное напряжение u			мгновенный ток i		
				U _m , В	ψ, град	ω, рад/с	I _m , мА	ψ, град	ω, рад/с
0	100	-	0.1	100	-30	10 ⁵	-	-	-
1	200	-	0.2	-	-	-	2	30	10 ⁵
2	400	0.05	-	200	30	10 ⁴	-	-	-
3	10	-	0.02	-	-	-	4	-45	5·10 ⁶
4	250	0.2	-	30	-60	10 ³	-	-	-
5	40	-	0.05	-	-	-	6	160	8·10 ⁵
6	450	0.03	-	20	120	10 ⁴	-	-	-
7	400	-	0.01	-	-	-	5	-60	3·10 ⁵
8	50	0.8	-	10	-50	10 ²	-	-	-
9	200	-	0.03	-	-	-	3	245	2·10 ⁵
10	500	0.02	-	50	145	10 ⁴	-	-	-
11	300	-	0.04	-	-	-	7	-35	10 ⁵
12	150	0.02	-	150	-35	10 ⁵	-	-	-
13	250	-	0.25	-	-	-	5	300	10 ⁵
14	450	0.07	-	300	300	10 ⁴	-	-	-
15	30	-	0.03	-	-	-	6	-145	5·10 ⁶
16	350	0.25	-	70	-40	10 ³	-	-	-
17	70	-	0.02	-	-	-	9	170	8·10 ⁵
18	250	0.04	-	25	125	10 ⁴	-	-	-
19	500	-	0.03	-	-	-	5	-60	3·10 ⁵
20	70	0.6	-	40	-70	10 ²	-	-	-
21	250	-	0.06	-	-	-	6	145	2·10 ⁵
22	600	0.09	-	70	245	10 ⁴	-	-	-
23	200	-	0.07	-	-	-	9	-135	10 ⁵
24	350	0.1	-	37	-65	10 ³	-	-	-
25	35	-	0.04	-	-	-	7	10	8·10 ⁵
26	750	0.02	-	28	125	10 ⁴	-	-	-
27	540	-	0.02	-	-	-	6	-260	3·10 ⁵
28	80	0.75	-	15	-150	10 ²	-	-	-
29	280	-	0.05	-	-	-	5	345	2·10 ⁵
30	900	0.07	-	40	175	10 ⁴	-	-	-

31	500	-	0.08	-	-	-	7	-335	10^5
32	450	0.04	-	170	-305	10^5	-	-	-
33	290	-	0.22	-	-	-	8	310	10^5
34	400	0.02	-	200	200	10^4	-	-	-
35	70	-	0.04	-	-	-	5	-345	$5 \cdot 10^6$
36	150	0.55	-	30	-400	10^3	-	-	-
37	90	-	0.03	-	-	-	3	270	$8 \cdot 10^5$
38	240	0.07	-	85	25	10^4	-	-	-
39	300	-	0.07	-	-	-	6	-160	$3 \cdot 10^5$
40	85	0.65	-	90	-190	10^2	-	-	-
41	250	-	0.05	-	-	-	7	145	$2 \cdot 10^5$
42	600	0.09	-	70	205	10^4	-	-	-
43	200	-	0.08	-	-	-	8	-135	10^5
44	350	0.1	-	37	-165	10^3	-	-	-
45	35	-	0.03	-	-	-	9	10	$8 \cdot 10^5$
46	750	0.02	-	28	105	10^4	-	-	-

Пример выполнения заданий (варианта № 0)

Задание №1. Определить мгновенный ток в индуктивном элементе $L=0.1$ Гн (таблица 2.4), построить векторные и временные диаграммы тока и напряжения, если напряжение на индуктивном элементе $u = 20\sin(10^3 t - 30^\circ)$ В.

Решение

1. Определим комплексную амплитуду напряжения $\underline{U}_m = U_m e^{j\psi_u} = 20e^{-j30^\circ}$ В.
2. Определим комплексное сопротивление индуктивного элемента

$$\underline{Z} = j\omega L = j \cdot 10^3 \cdot 0.1 = j \cdot 100 = 100e^{j90^\circ} \text{ Ом.}$$

3. По закону Ома находим комплексную амплитуду тока в

индуктивном элементе $\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}_1} = \frac{20e^{-j30^\circ}}{100e^{j90^\circ}} = 0.2e^{-j120^\circ}$ А.

4. Определим мгновенный ток $i = I_m \sin(\omega t + \psi) = 0.2\sin(10^3 t - 120^\circ)$ А.

5. Строим векторную диаграмму.

- 5.1. Выбираем масштабные множители $m_U = 5$ В/см, $m_I = 0.1$ А/см.

- 5.2. Определяем длину векторов, соответствующих амплитудам напряжения

и тока $\ell_U = \frac{U_m}{m_U} = \frac{20}{5} = 4$ см, $\ell_I = \frac{I_m}{m_I} = \frac{0.2}{0.1} = 2$ см.

- 5.3. Векторы напряжения $\underline{U}_m$ и тока $\underline{I}_m$ строим на комплексной плоскости с учетом начальных фаз (рисунок 2.5).

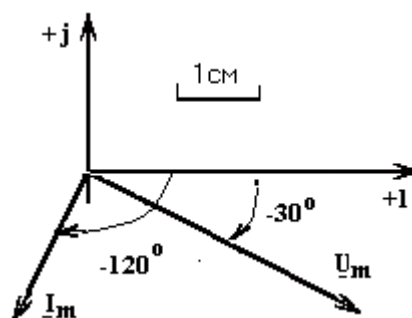


Рисунок 2.5

6. Строим временные диаграммы тока и напряжения (рисунок 2.6). Примеры и рекомендации по методике построения временных диаграмм изложены на практическом занятии №2.1

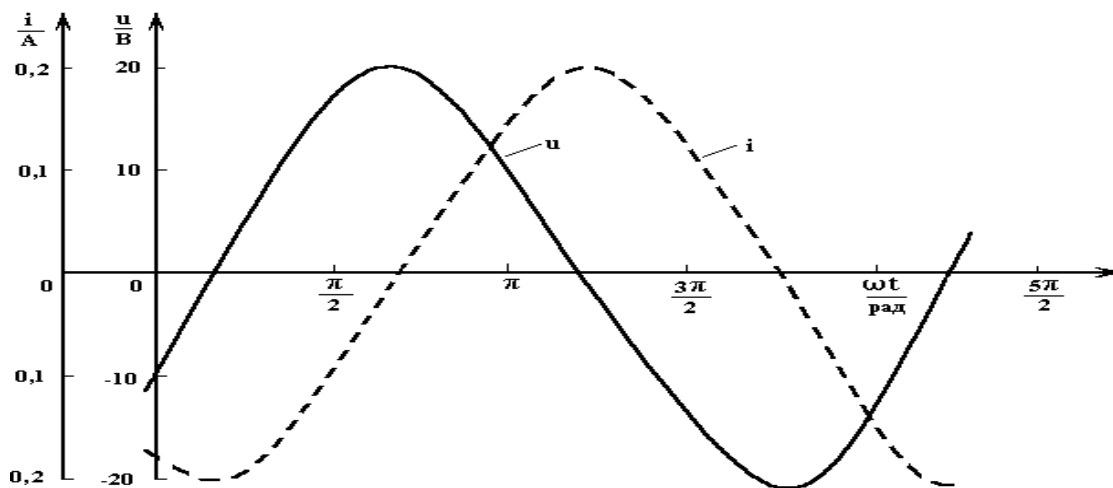


Рисунок 2.6

Задание №2. Для заданного емкостного элемента $C = 0.1$ мкФ и мгновенного тока $i = 2.82 \sin(10^5 t + 30^\circ)$ А определить комплексные амплитуды и действующие ток и напряжение. Построить векторные и временные диаграммы тока и напряжения.

Решение

1. Определим комплексную амплитуду тока $\underline{I}_m = I_m e^{j\psi_i} = 2.82 e^{j30^\circ}$ А.

2. Определим комплексное сопротивление емкостного элемента

$$\underline{Z} = \frac{1}{j\omega C} = \frac{1}{j \cdot 10^5 \cdot 0.1 \cdot 10^{-6}} = -j \cdot 100 = 100 \cdot e^{-j90^\circ} \text{ Ом.}$$

3. По закону Ома находим комплексную амплитуду напряжения

$$\underline{U}_m = \underline{I}_m \cdot \underline{Z} = 2.82 \cdot e^{j30^\circ} \cdot 100 \cdot e^{-j90^\circ} = 282 \cdot e^{-j60^\circ} \text{ В.}$$

4. Комплексные действующие ток и напряжение определяются выражениями

$$\underline{I} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{2.82 \cdot e^{j30^0}}{1.41} = 2 \cdot e^{j30^0} \text{ A},$$

$$\underline{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{282 \cdot e^{-j60^0}}{141} = 200 \cdot e^{-j60^0} \text{ В.}$$

5. Мгновенное напряжение на емкостном элементе

$$u = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = 282 \sin(10^5 t - 60^0) \text{ В.}$$

6. Строим векторную диаграмму комплексных напряжения $\underline{U}$ и тока $\underline{I}$ (рисунок 2.7).

6.1. Масштабные множители $m_U = 50 \text{ В/см}$, $m_I = 1 \text{ А/см}$.

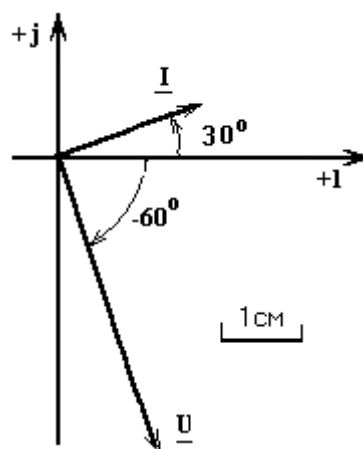


Рисунок 2.7

7. Строим временные диаграммы тока и напряжения (рисунок 2.8)

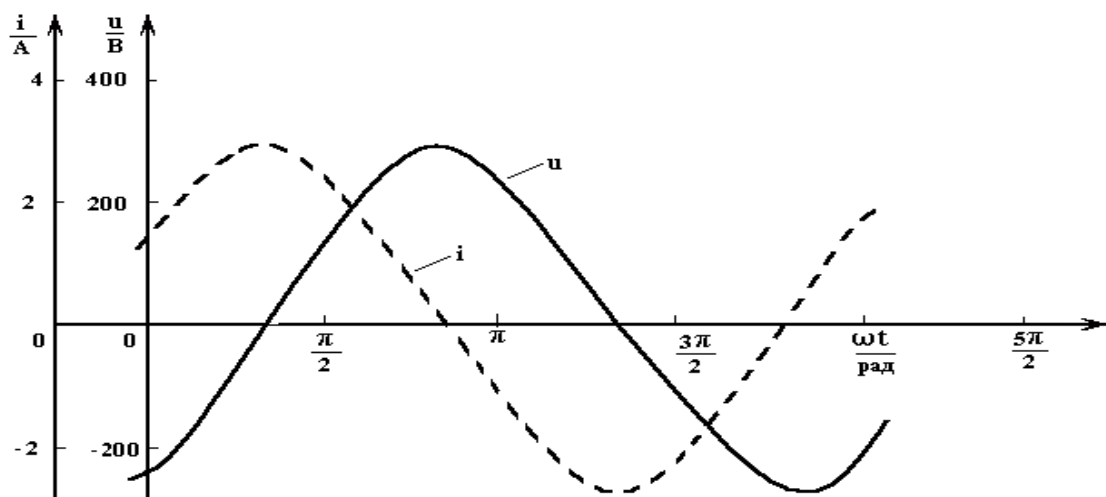


Рисунок 2.8

Задание №3. Элементы цепи $R = 40 \text{ Ом}$, $L = 0.03 \text{ Гн}$ (таблица 2.5) соединены последовательно и находятся под действием тока $i = 100 \sin(10^3 t + 30^0) \text{ мА}$. Определить приложенное напряжение к цепи,

напряжения на элементах схемы. Построить векторные диаграммы тока и напряжений.

Решение

1. Изобразим схему цепи (рисунок 2.9)

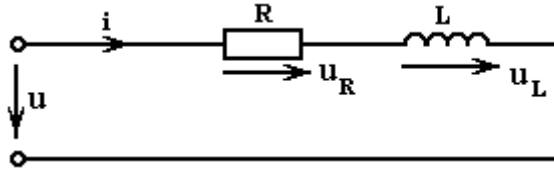


Рисунок 2.9

2. Определим комплексную амплитуду тока в цепи

$$\underline{I}_m = I_m \cdot e^{j\psi_i} = 100e^{j30^0} \text{ mA.}$$

3. По закону Ома находим комплексную амплитуду напряжения на резистивном элементе

$$\underline{U}_{mR} = \underline{I}_m \cdot R = 10^2 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j30^0} \cdot 40 = 4.0 \cdot e^{j30^0} = 4 \cos 30^0 + j \cdot 4 \cdot \sin 30^0 = 3.46 + j \cdot 2 \text{ B.}$$

4. По закону Ома находим комплексную амплитуду напряжения на индуктивном элементе

$$\begin{aligned} \underline{U}_{mL} &= \underline{I}_m \cdot j\omega L = 10^2 \cdot 10^{-3} e^{j30^0} \cdot j \cdot 10^3 \cdot 0.03 = 3e^{j120^0} = \\ &= 3 \cos 120^0 + j \cdot 3 \sin 120^0 = -1.5 + j \cdot 2.6 \text{ B.} \end{aligned}$$

5. По 2^{му} закону Кирхгофа определим комплексную амплитуду приложенного напряжения

$$\begin{aligned} \underline{U}_m &= \underline{U}_{mR} + \underline{U}_{mL} = 3.46 + j \cdot 2 - 1.5 + j \cdot 2.6 = 1.96 + j \cdot 4.6 = \\ &= \sqrt{1.96^2 + 4.6^2} \cdot e^{j \arctg \frac{4.6}{1.96}} = 5 \cdot e^{j66.9^0} \text{ B.} \end{aligned}$$

6. Мгновенные напряжения на элементах цепи

$$u_R = U_{mR} \sin(\omega t + \psi_{u_R}) = 4 \sin(10^3 t + 30^0) \text{ B,}$$

$$u_L = U_{mL} \sin(\omega t + \psi_{u_L}) = 3 \sin(10^3 t + 120^0) \text{ B.}$$

7. Мгновенное напряжение, приложенное к цепи

$$u_R = U_m \sin(\omega t + \psi_u) = 5 \sin(10^3 t + 66.9^0) \text{ B.}$$

8. Строим векторную диаграмму токов и напряжений (рисунок 2.10).

8.1. Масштабные множители $m_I = 20 \text{ mA/cm}$, $m_U = 1 \text{ V/cm}$.

8.2. Векторная диаграмма

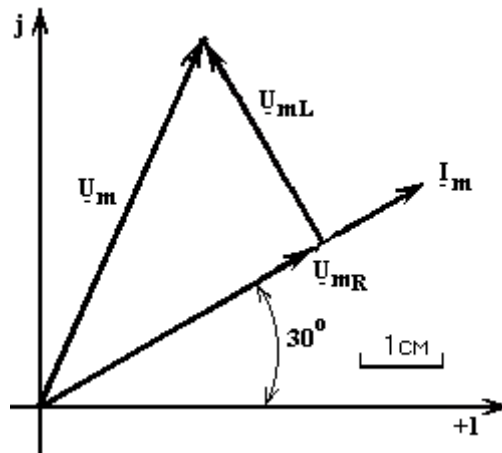


Рисунок 2.10

Задание №4. Элементы цепи $R = 100 \text{ Ом}$, $C = 0.1 \text{ мкФ}$ (таблица 2.6) соединены параллельно и находятся под воздействием напряжения $u = 100\sin(10^5 t - 30^\circ) \text{ В}$. Определить токи в цепи и в ее элементах. Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

Решение

1. Изобразим схему цепи (рисунок 2.11)

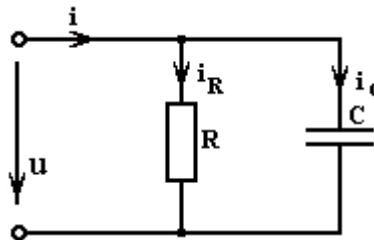


Рисунок 2.11

2. Определим комплексную амплитуду приложенного напряжения

$$\underline{U}_m = U_m \cdot e^{j\psi_u} = 100e^{-j30^\circ} \text{ В.}$$

3. По закону Ома находим ток в резистивном элементе

$$\underline{I}_{mR} = \frac{\underline{U}_m}{R} = \frac{100e^{-j30^\circ}}{100} = 1e^{-j30^\circ} = 1 \cdot \cos 30^\circ - j \cdot 1 \cdot \sin 30^\circ = 0.866 - j \cdot 0.5 \text{ А} = 1e^{-j30^\circ} \text{ А.}$$

4. По закону Ома находим ток в емкостном элементе

$$\underline{I}_{mc} = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}_C} = \underline{U}_m \cdot j\omega C = 100e^{-j30^\circ} \cdot e^{+j90^\circ} \cdot 10^5 \cdot 0.1 \cdot 10^{-6} = 1e^{j60^\circ} =$$

$$= 1 \cdot \cos 60^\circ + j \sin 60^\circ = 0.5 + j \cdot 0.866 \text{ A} = 1e^{j60^\circ} \text{ A}.$$

5. По 1 закону Кирхгофа определим комплексную амплитуду тока в цепи

$$\underline{I}_m = \underline{I}_{mR} + \underline{I}_{mL} = 0.866 - j \cdot 0.5 + 0.5 + j \cdot 0.866 = 1.366 + j \cdot 0.366 = 1.414e^{j16^\circ} \text{ A}.$$

6. Мгновенные токи в цепи:

$$i_R = I_{mR} \sin(\omega t + \psi_{iR}) = 1 \sin(10^5 t - 30^\circ) \text{ A},$$

$$i_C = I_{mc} \sin(\omega t + \psi_{ic}) = 1 \sin(10^5 t + 60^\circ) \text{ A},$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i) = 1.414 \sin(10^5 t + 15^\circ) \text{ A}.$$

7. Строим векторную диаграмму тока и напряжений (рисунок 2.12).

7.1. Масштабные множители $m_U = 20 \text{ В/см}$, $m_I = 0.25 \text{ А/см}$.

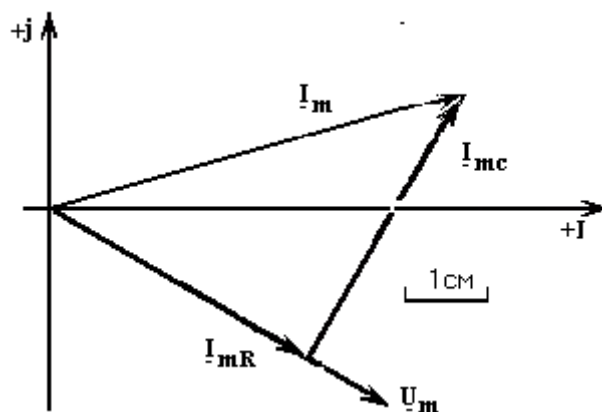


Рисунок 2.12

5. Расчет трехфазных цепей

Учебные вопросы:

1. Расчет токов и напряжений в трехфазной цепи соединения фаз приемника по схеме «звезда».
2. Расчет токов и напряжений в трехфазной цепи соединения фаз приемника по схеме «треугольник».

задание для подготовки к занятию

1. Изучить:

1. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника.- М.: Энергоатомиздат, 1987, с. 124-150.
2. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с.54-55.

2. Ответить на вопросы:

1. Запишите выражение для мгновенных ЭДС трехфазной цепи.
2. Запишите выражение для комплексных амплитуд и действующих ЭДС трехфазной цепи.
3. Построить векторную диаграмму для комплексных амплитуд и действующих ЭДС трехфазной цепи.
4. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями в симметричной трехфазной цепи?
5. Каким образом определить ток в нейтральном проводе в трехфазной цепи при соединении фаз приемника по схеме «звезда»?
6. Каким образом определить напряжение смещения нейтрали трехфазной цепи при соединении фаз приемника по схеме «звезда»?
7. Каковы соотношения между линейными и фазными токами в симметричной трехфазной цепи при соединении фаз приемника по схеме «треугольник»?

3. Проанализировать решение задач:

№2.74 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей М.: Высшая школа, 1982. - с.88 – 89)

В ходе практического занятия выполнить задания:

Задание №1. К симметричной трехфазной линии напряжением $U_{\text{л}}$ (таблица 3) подключен несимметричный приемник, фазы которого соединены звездой с нейтральным проводом. Комплексные сопротивления фаз приемника $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$, $\underline{Z}_c$ заданы согласно варианту (таблица 3). Рассчитать токи в фазах приемника, в линейных проводах и в нейтральном проводе. Построить векторные диаграммы токов и напряжений. Рассчитать мощность, потребляемую трехфазным приемником.

Задание №2. К симметричной трехфазной линии напряжением $U_{\text{л}}$ (таблица 3) подключен несимметричный приемник, фазы которого соединены звездой без нейтрального провода. Комплексные сопротивления фаз приемника $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$, $\underline{Z}_c$ заданы согласно варианту (таблица 3). Рассчитать токи в фазах приемника и в линейных проводах. Рассчитать токи в фазах приемника и в линейных проводах при коротком замыкании одной из фаз приемника. Построить векторные диаграммы токов и напряжений. Рассчитать мощность, потребляемую трехфазным приемником.

Задание №3. К симметричной трехфазной линии напряжением $U_{\text{л}}$ (таблица 3) подключен несимметричный приемник, фазы которого соединены треугольником. Комплексные сопротивления фаз приемника $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$, $\underline{Z}_c$ заданы согласно варианту (таблица 3). Рассчитать токи в фазах приемника, в линейных проводах. Рассчитать токи в фазах приемника, в линейных проводах в случае обрыва одного из линейных проводов (таблица 3). Построить векторные диаграммы токов и напряжений. Рассчитать мощность, потребляемую трехфазным приемником.

Таблица 3 - Исходные данные для расчета трехфазных цепей

Вариант №	Ул, В	$\underline{Z}_a$, Ом	$\underline{Z}_b$, Ом	$\underline{Z}_c$, Ом	Вариант №	Обрыв линейного провода
0	220	10	-j20	j30	0	А
1	360	j10	15	-j20	1	В
2	120	10-j10	j15	20	2	С
3	150	20	20-j60	40+j30	3	А
4	170	j60	10+j2	20-j40	4	В
5	225	15-j20	10	-j25	5	С
6	300	20+j50	24-j50	10+j10	6	А
7	100	20	j25	-j10	7	В
8	110	25-j60	30+j9	45-j50	8	С
9	125	150	j80	-j40	9	А
10	220	-j25	20	45+j40	10	В
11	360	10+j30	15-j35	20+j80	11	С
12	120	20+j50	24-j50	10+j10	12	А
13	150	10	-j20	j30	13	В
14	170	j10	15	-j20	14	С
15	225	10-j10	j15	20	15	А
16	300	20-j25	30-j60	30+j30	16	В
17	100	15-j90	j10	-j25	17	С
18	110	20+j80	29-j50	60+j10	18	А
19	125	j20	-j25	12-j10	19	В
20	220	25-j60	8+j40	45-j50	20	С
21	360	10-j50	j80	-j40	21	А
22	120	30-j25	20	45-j40	22	В
23	150	80+j30	15-j35	40+j80	23	С
24	170	10+j70	15-j20	80+j30	24	А
25	225	-j10	15+j8	-j20	25	В
26	300	10-j10	j15	20-j20	26	С
27	100	20+j7	20-j60	20+j30	27	А
28	110	90+j60	10+j2	20-j40	28	В

29	125	50-j20	10+j8	-j25	29	C
30	220	20+j30	20-j50	20+j10	30	A
31	360	20-j45	j25	10-j10	31	B
32	120	25-j60	30+j6	35-j50	32	C
33	150	15-j60	j80	50-j40	33	A
34	170	-j25	20+j8	45+j40	34	B
35	225	10+j40	15-j35	20+j80	35	C
36	300	10+j60	8-j20	j30	36	A
37	100	25-j10	15+j5	40-j20	37	B
38	110	10-j10	8+j15	20-j6	38	C
39	125	20	20-j60	40+j30	39	A
40	220	j60	10+j7	20-j40	40	B
41	300	10+j20	15-j25	20+j60	41	C
42	220	25+j50	30-j50	20+j10	42	A
43	120	25-j50	-j20	25+j50	43	B
44	150	10+j20	15-j25	10-j20	44	C
45	200	10-j10	10+j20	15-j25	45	A

3.1. Расчет трехфазной цепи соединение по схеме «звезда с нейтральным проводом»

Схема трехфазной цепи соединение по схеме «звезда с нейтральным проводом» представлена на рисунке 3.1

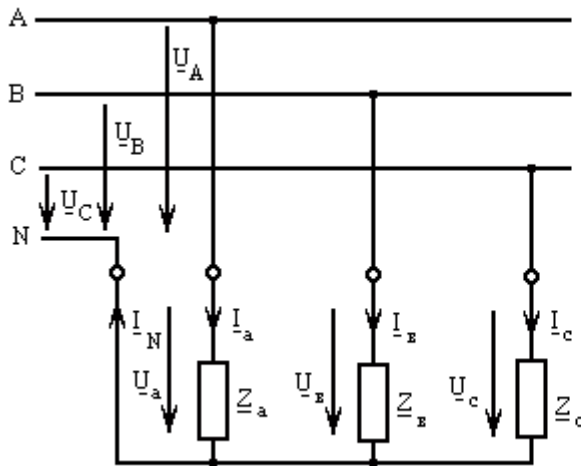


Рисунок 3.1 - Соединение фаз приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»

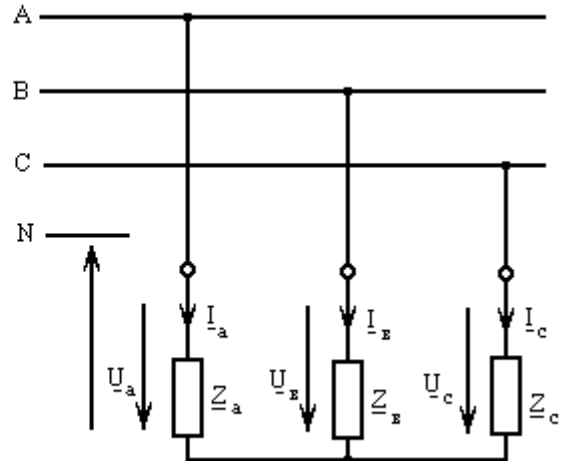


Рисунок 3.2 - Соединение фаз приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»

1. Определяем комплексные напряжения на фазах симметричного трехфазного источника (синхронного генератора)

$$\underline{U}_A = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j^0} = \frac{220}{1.73} e^{j^0} = 127e^{j^0} \text{ В},$$

$$\underline{U}_B = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{-j120^0} = \frac{220}{1.73} (\cos 120^0 - j \sin 120^0) = -63.5 - j110 \text{ В},$$

$$\underline{U}_C = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j120^0} = \frac{220}{1.73} (\cos 120^0 + j \sin 120^0) = -63.5 + j110 \text{ В},$$

2. Определяем комплексные напряжения на фазах приемника. Так как сопротивление соединительных проводов (линейных и нейтрального) равно нулю, то

$$\underline{U}_A = \underline{U}_a = 127 \text{ В}, \quad \underline{U}_B = \underline{U}_b = 127e^{-j120^0} \text{ В}, \quad \underline{U}_C = \underline{U}_c = 127e^{j120^0} \text{ В}.$$

3. Определяем комплексные токи в фазах приемника, используя закон

Ома для участка цепи $\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{127e^{j0}}{10} = 12.7e^{j0} = 12.7 \text{ A}$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{127e^{-j120^\circ}}{20e^{-j90^\circ}} = 6.35e^{-j30^\circ} = 5.5 - j3.175 \text{ A.}$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{127e^{j120^\circ}}{30e^{j90^\circ}} = 4.23e^{j30^\circ} = 3.667 + j2.117 \text{ A.}$$

4. Комплексный ток в нейтральном проводе определим, используя первый закон Кирхгофа:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 12.7 + 5.5 - j3.175 + 3.667 + j2.117 = 21.868 - j1.058 = 21.894e^{-j2.8^\circ} \text{ A.}$$

5. Комплексные междуфазные (линейные) напряжения на приемнике определим, используя второй закон Кирхгофа

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b = 127 + 63.509 + j110 = 190.5 + j110 = 220e^{j30^\circ} \text{ В.}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c = -63.509 - j110 + 63.509 - j110 = -j220 = 220e^{-j90^\circ} \text{ В.}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a = -63.509 + j110 - 127 = -190.5 + j110 = 220e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

6. Векторная диаграмма токов и напряжений представлена на рисунке 3.3

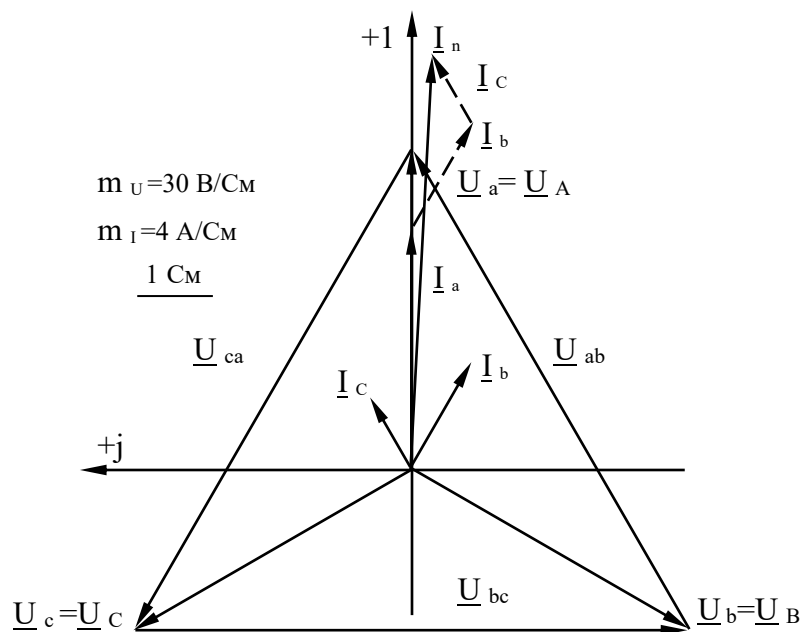


Рисунок 3.3

7. Рассчитаем комплексную мощность, потребляемую трехфазным приемником

$$\underline{S} = \underline{U}_a^* \underline{I}_a + \underline{U}_b^* \underline{I}_b + \underline{U}_c^* \underline{I}_c = 127 \cdot 12.7 + 127e^{-j120^\circ} \cdot 6.351e^{-j30^\circ} + 127e^{j120^\circ} \cdot 4.234e^{-j30^\circ} = 1613 - j269 \text{ ВА.}$$

3.2. Расчет трехфазной цепи соединения по схеме «звезда при обрыве нейтрального провода»

1. Определяем комплексные напряжения на фазах симметричной трехфазной цепи

$$\underline{U}_A = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j^0} = \frac{220}{1.73} e^{j^0} = 127e^{j^0} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_B = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ} = \frac{220}{1.73} e^{-j120^\circ} = 127e^{-j120^\circ} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_C = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ} = \frac{220}{1.73} e^{j120^\circ} = 127e^{j120^\circ} \text{ В.}$$

2. Определяем комплексные проводимости фаз приемника

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a} = \frac{1}{10} = 0.1 \text{ См,} \quad \underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b} = \frac{1}{-j20} = 0.05e^{j90^\circ} = j0.05 \text{ См,}$$

$$\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c} = \frac{1}{j30} = 0.033e^{-j90^\circ} = -j0.033 \text{ См.}$$

3. Определяем напряжение смещения нейтрали (напряжение между нейтральными точками сети и приемника)

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \underline{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} = \frac{127e^{j^0} \cdot 0.1 + 127e^{-j120^\circ} \cdot 0.05e^{j90^\circ} + 127e^{j120^\circ}}{0.1 + j0.05 - j0.033} = 211.057 - j45.761 = 215.96e^{-j12.23^\circ} \text{ В.}$$

4. Определяем комплексные напряжения на фазах приемника

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN} = 127 - 211.057 + j45.761 = -84.04 + j45.76 = 95.69e^{j151^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} = -63.509 - j110 - 211.057 + j45.761 = -274.565 - j64.239 = 281.98e^{-j167^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} = -63.509 + j110 - 211.057 + j45.761 = -274.565 + j155.76 = 315.67e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

5. Рассчитываем комплексные токи в фазах приемника, используя закон Ома

$$\underline{I}_a = \underline{U}_a \underline{Y}_a = 95.69e^{j151^\circ} \cdot 0.1 = 9.569e^{j151^\circ} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_b = \underline{U}_b \underline{Y}_b = 281.98e^{-j167^\circ} \cdot 0.05e^{j90^\circ} = 14.1e^{-j77^\circ} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_c = \underline{U}_c \underline{Y}_c = 315.67e^{j150^\circ} \cdot 0.33 \cdot e^{-j90^\circ} = 10.5e^{j60^\circ} \text{ А.}$$

6. Используя второй закон Кирхгофа, определим междуфазные (линейные) напряжения на приемнике

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b = -84.04 + j45.76 + 274.565 - j64.239 = 190.526 + j110 = 220e^{j30^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c = -274.565 - j64.239 + 274.565 - j155.761 = -j220 = 220e^{-j90^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a = -274.565 + j155.761 + 84.04 - j45.761 = -190.526 + j110 = 220e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

7. По результатам расчетов токов и напряжений строим векторные диаграммы токов и напряжений (рисунок 3.4)

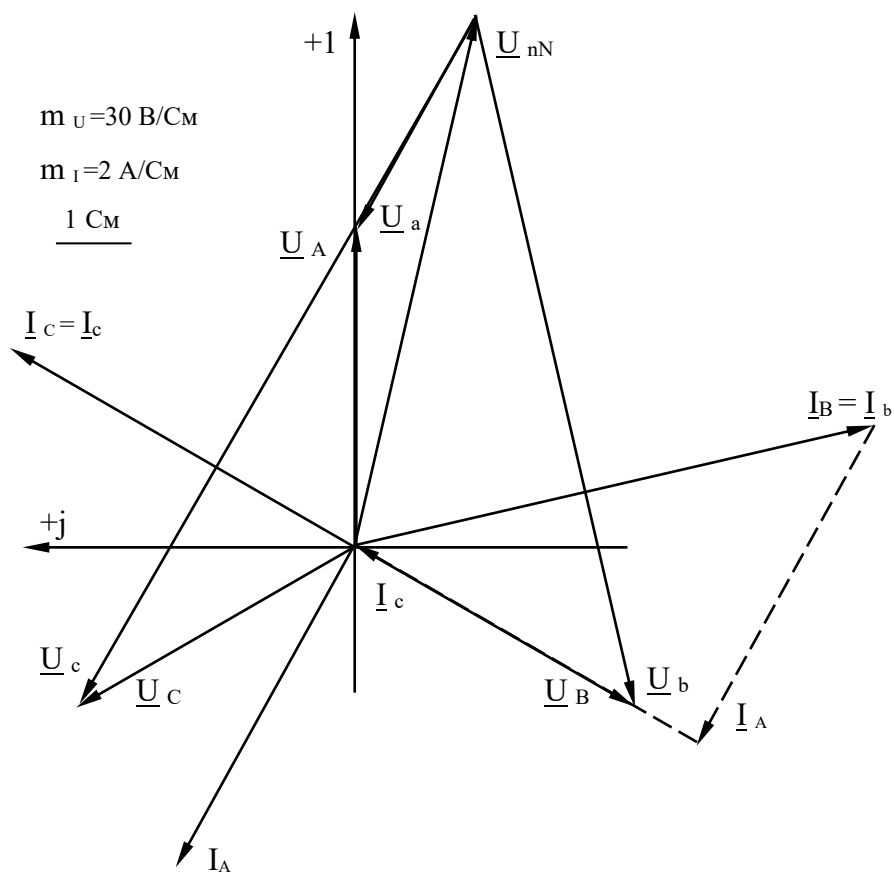


Рисунок 3.4

8. Рассчитаем мощность, потребляемую трехфазным приемником

$$\begin{aligned}
 \underline{S} &= \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^* = 95.691e^{j151^\circ} \cdot 9.569e^{-j151^\circ} + 281.98e^{-j167^\circ} \cdot 14.1e^{j76.8^\circ} + \\
 &+ 315.67e^{-j150^\circ} \cdot 10.522e^{-j60^\circ} = 915.676 - j654.054 \text{ ВА}
 \end{aligned}$$

3.3. Расчет трехфазной цепи соединения по схеме «звезда без нейтрального провода» при коротком замыкании фазы «а» приемника

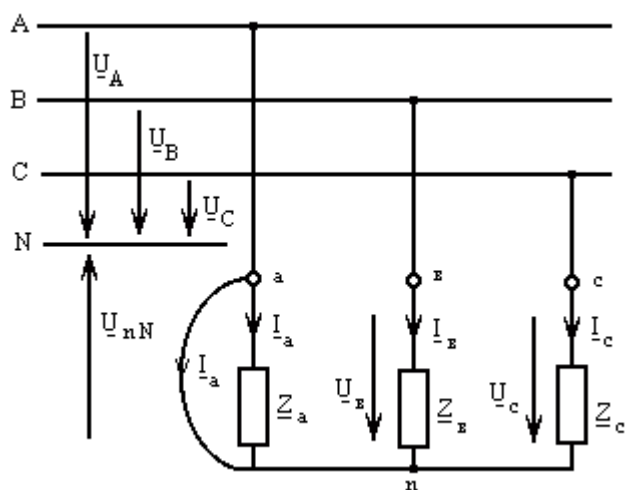


Рисунок 3.5 - Соединение фаз приемника по схеме «звезда без нейтрального провода» и коротком замыкании фазы «а» приемника

1. Определяем комплексные напряжения на фазах симметричной

$$\text{трехфазной цепи} \quad \underline{U}_A = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j0} \quad \underline{U}_B = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ} \quad \underline{U}_C = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ}$$

2. Напряжение смещения определяется значением комплексного напряжения фазы сети, к которой подсоединена закороченная фаза приемника. В рассматриваемом случае

$$\underline{U}_{nN} = \underline{U}_A = 127 e^{j0} = 127 \text{ В.}$$

3. Определяем комплексные напряжения на фазах приемника

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN} = 127 - 127 = 0 \text{ В}$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} = -63.509 - j110 - 127 = -190.526 - j110 = 220 e^{-j150^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} = -63.509 + j110 - 127 = -190.526 + j110 = 220 e^{j150^\circ} \text{ В}$$

4. Комплексные токи в фазах, рассчитываем, используя закон Ома

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{0}{10} = 0 \text{ А}, \quad \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{220 e^{-j150^\circ}}{-j20} = 11 e^{-j60^\circ} = 5.5 - j9.526 \text{ А}$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{220 e^{j150^\circ}}{j30} = 7.333 e^{j60^\circ} = 3.667 + j6.351 \text{ А.}$$

5. Комплексные токи, в линейном проводе «А» определим, используя первый закон Кирхгофа

$$\underline{I}_A = -\underline{I}_b - \underline{I}_c = -5.5 + j9.526 - 3.667 - j6.351 = -9.167 + j3.175 = 9.7 e^{j161^\circ} \text{ А}$$

Комплексные токи в линейных проводах В и С равны фазным, т.е.

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b = 11 e^{-j60^\circ} \text{ А}, \quad \underline{I}_C = \underline{I}_c = 7.333 e^{j60^\circ} \text{ А}$$

6. Междофазные (линейные) напряжения на приемнике, определим используя второй закон Кирхгофа

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b = 0 + 190.526 + j110 = 220 e^{j30^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c = -190.525 - j110 + 190.526 - j110 = -j220 = 220 e^{j90^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a = -190.526 + j110 - 0 = 220 e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

7. Векторная диаграмма токов и напряжений представлена на рисунке 3.6

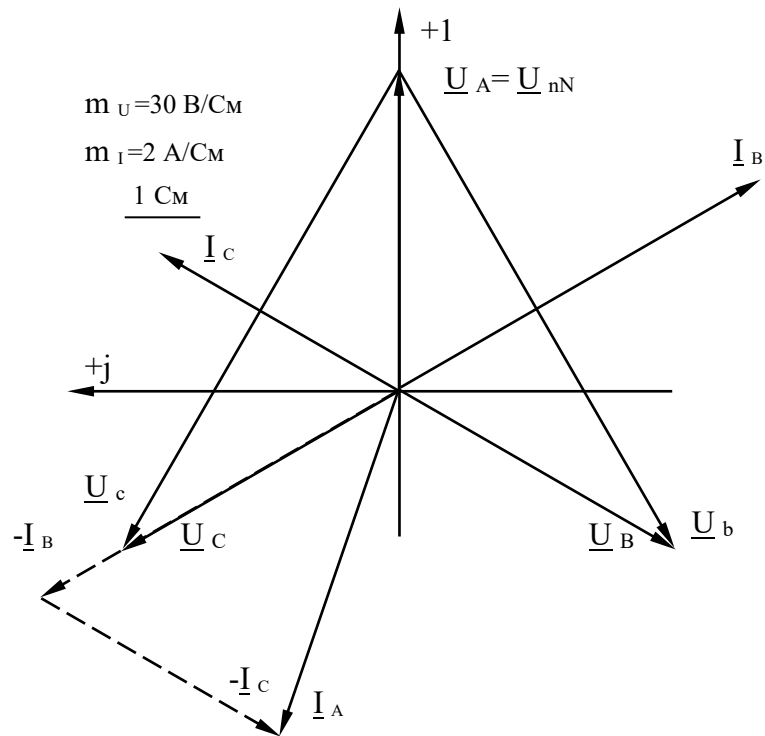


Рисунок 3.6

8. Рассчитываем мощность, потребляемую трехфазным приемником:

$$\underline{S} = \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^* = 220 e^{-j150^\circ} 11 e^{j60^\circ} + 220 e^{j150^\circ} \cdot 7.333 e^{j60^\circ} = -j806.667 \text{ ВА}$$

3.4. Расчет трехфазной цепи соединения фаз приемника по схеме «треугольник»

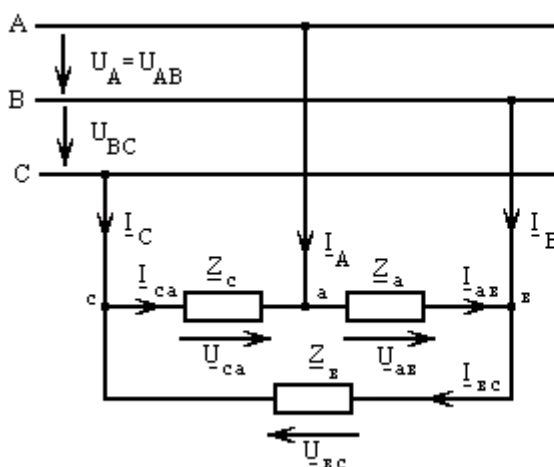


Рисунок 3.7 - Соединение фаз приемника по схеме

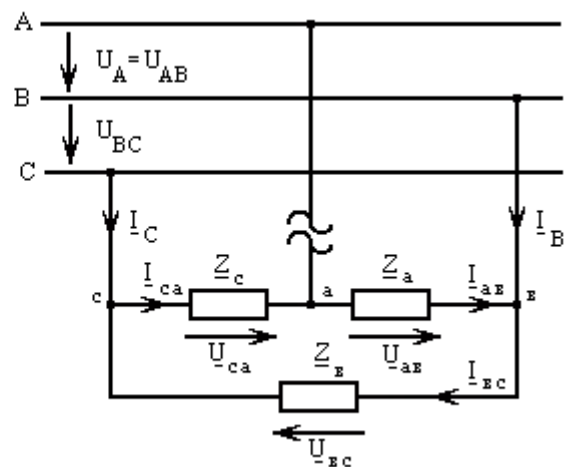


Рисунок 3.8 - Соединение фаз приемника по схеме «треугольник» и обрыве

«треугольник»

линейного провода «А»

1. Определяем комплексные линейные напряжения симметричной трехфазной цепи $\underline{U}_{AB} = U_{\text{л}} e^{j^0} = 220 e^{j^0} = 220 \text{ В},$

$$\underline{U}_{BC} = U_{\text{л}} e^{j120^0} = 220 e^{-j120^0} = -110 - j190.526 \text{ В}$$

$$\underline{U}_{CA} = U_{\text{л}} e^{j120^0} = 220 e^{j120^0} = -110 + j190.526 \text{ В.}$$

2. Комплексные напряжения на фазах приемника при условии, что сопротивления соединительных (линейных) проводов равны нулю, будут определяться соответствующими комплексными линейными напряжениями:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB} = 220 \text{ В}, \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC} = 220 e^{-j120^0} \text{ В}, \quad \underline{U}_{cb} = \underline{U}_{CA} = 220 e^{j120^0} \text{ В.}$$

3. Комплексные токи в фазах приемника определим, используя закон Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_a} = \frac{220 e^{j^0}}{10} = 22 e^{j^0} \text{ А} = 22 \text{ А}$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_b} = \frac{220 e^{-j120^0}}{-j20} = 11 e^{-j30^0} = 9.526 - j5.5 \text{ А}$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_b} = \frac{220 e^{j120^0}}{j30} = 7.33 e^{j30^0} = 6.351 + j3.667 \text{ А}$$

4. Комплексные токи в линейных проводах определим, пользуясь первым законом Кирхгофа

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 22 - 6.351 - j3.667 = 15.649 - j3.667 = 16.073 e^{-j13^0} \text{ А}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 9.526 - j5.5 - 22 = -12.474 - j5.5 = 13.632 e^{-j156^0} \text{ А}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 6.351 + j3.667 - 9.526 + j5.5 = -3.175 + j9.167 = 9.7 e^{j109^0} \text{ А.}$$

5. По результатам расчетов строим векторную диаграмму токов и напряжений (рисунок 3.9).

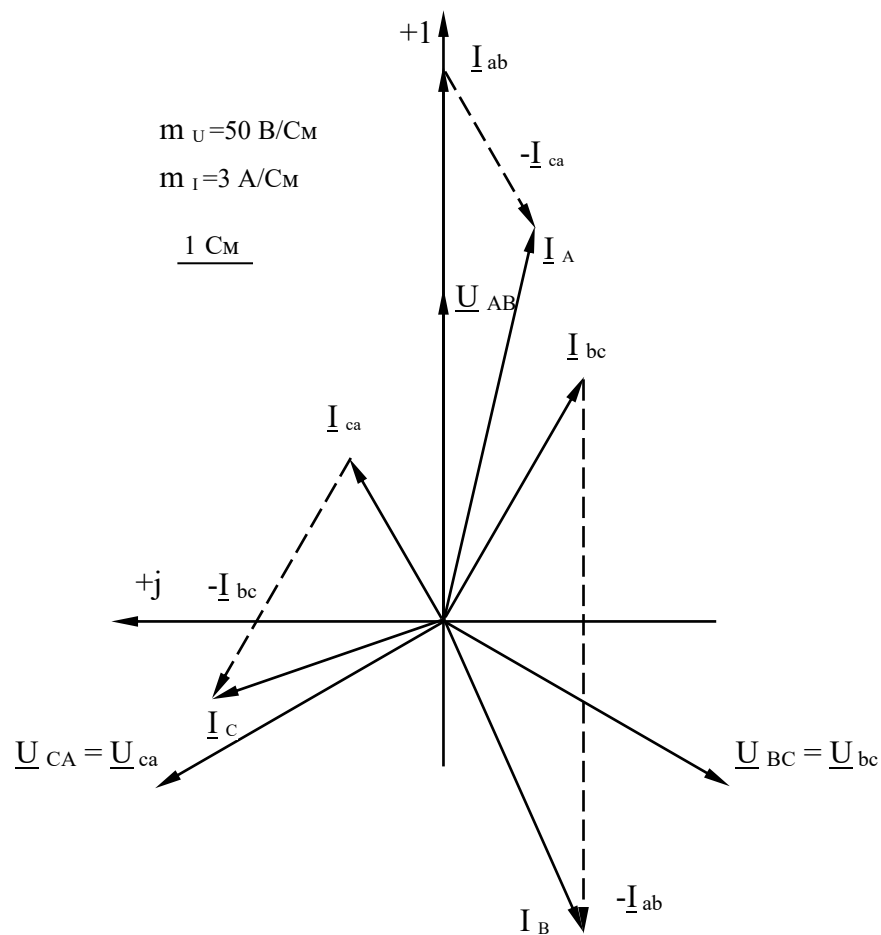


Рисунок 3.9

6. Рассчитываем комплексную мощность, потребляемую трехфазным приемником

$$\underline{S} = \underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* + \underline{U}_{bc} \underline{I}_{bc}^* + \underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^* = 220.22 + 220e^{-j120^\circ} \cdot 1e^{j30^\circ} + 220e^{j120^\circ} \cdot 7.33e^{-j30^\circ} = 4840 - j806.667 \text{ ВА.}$$

3.5. Расчет трехфазной цепи соединения фаз приемника по схеме «треугольник» при обрыве линейного провода «А»

1. Изображаем схему цепи при обрыве линейного провода (рисунок 2.8). Условно-положительные направления токов в фазах указываем как и в схеме рисунок 2.7. Из анализа схемы (рисунок 2.8) следует, что комплексное напряжение на фазе «в» приемника $\underline{Z}_b$ равно фазному напряжению $\underline{U}_{bc} = 220e^{-j120^\circ}$ В. При этом фазы $\underline{Z}_a$ и $\underline{Z}_c$ приемника оказываются

соединенными друг с другом последовательно и напряжение на этом участке равно $\underline{U}_{bc} = 220e^{-j120^\circ}$ В.

2. Используя закон Ома, рассчитаем токи в фазах приемника

$$\underline{I}_{ab} = -\frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_c} = -\frac{220e^{-j120^\circ}}{10 + j30} = 6.957e^{-j11.6^\circ} = 6.816 - j1.395 \text{ A}$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_b} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{-j20} = 11e^{-j30^\circ} = 9.526 - j5.5 \text{ A}$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{-\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_c} = -\frac{220e^{-j120^\circ}}{10 + j30} = 6.957e^{-j11.6^\circ} = 6.816 - j1.395 \text{ A}.$$

3. Комплексные токи в линейных проводах определяем по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 0$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 9.526 - j5.5 - 6.816 + j1.395 = 2.711 - j4.105 = 4.919e^{-j56.5^\circ} \text{ A}.$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 6.816 - j1.395 - 9.526 + j5.5 = -2.711 + j4.105 = 4.919e^{j123^\circ} \text{ A}.$$

4. Комплексные напряжения на фазах приемника «а» и «с» определим по закону Ома

$$\underline{U}_{ab} = \underline{I}_{ab} \cdot \underline{Z}_a = 6.957e^{-j11.6^\circ} \cdot 10 = 69e^{-j11.6^\circ} = 68.158 - j13.947 \text{ В}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{I}_{ca} \cdot \underline{Z}_c = 6.957e^{-j11.6^\circ} \cdot 30e^{j90^\circ} = 208.71e^{j78.4^\circ} = 41.842 + j204.473 \text{ В}.$$

5. Комплексная мощность, потребляемая приемником

$$\underline{S} = |\underline{I}_{ab}|^2 (\underline{Z}_a + \underline{Z}_c) + |\underline{I}_{bc}|^2 \underline{Z}_b = 6.957^2 (10 + j30) + 11^2 (-j20) = 484 - j968 \text{ ВА} .$$

6. Полная мощность, потребляемая приемником

$$S = |\underline{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{484^2 + 968^2} = 1082 \text{ ВА}.$$

7. Векторную диаграмму токов и напряжений строим по результатам расчетов (рисунок 3.10)

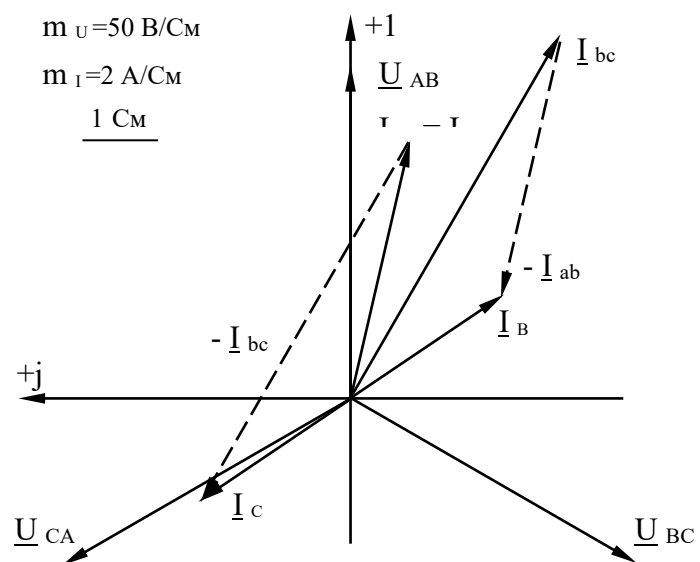


Рисунок 3.10

6. Расчет переходных процессов классическим методом

Учебные вопросы:

1. Расчет переходных токов, напряжений в простейшей RC (RL)-цепи при нулевых начальных условиях.
2. Расчет переходных токов и напряжений в простейшей RC (RL)-цепи при ненулевых начальных условиях.
3. Расчет переходных токов и напряжений в сложной RC (RL) –цепи.

задание для подготовки к занятию

1. Изучить:

1. Никулин В.И. Теория электрических цепей. - М.: РИОР, 2016 , с. 102-108.
2. Бакалов В.П., Воробиенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 102-105.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с.172-174.
4. Пискунов Н.И. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов.- М.: Наука, 1985, ч 2, с.17-21, 31.

2. Ответить на вопросы:

1. Что понимают под коммутацией в электрической цепи.
2. Сформулируйте 1-й закон коммутации. Проведите его доказательство.
3. Сформулируйте 2-й закон коммутации. Проведите его доказательство.
4. Для заданных цепей (Рисунок 4.1-4.3) определите начальные условия на основании законов коммутации.

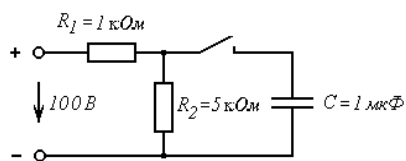


Рисунок 4.1

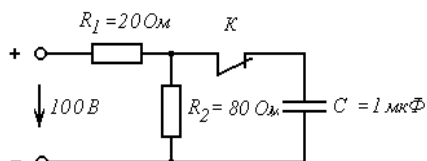


Рисунок 4.2

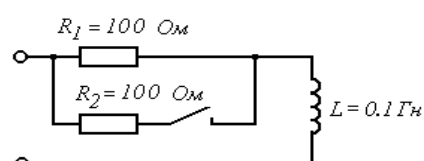


Рисунок 4.3

5. Запишите линейное дифференциальное уравнение первого порядка.
6. Какое линейное дифференциальное уравнение называют неоднородным? Приведите примеры. Поясните алгоритм решения этого уравнения.
7. Что такое общее решение линейного дифференциального уравнения?
8. Что такое частное решение линейного дифференциального уравнения? Каким образом оно определяется?
9. Запишите решение дифференциального уравнения $\frac{dy}{dx} + ax = b$.
10. Для цепи (рисунок 4.3) составьте дифференциальное уравнение. Какие законы теории электрических цепей при этом использованы?
11. Назовите этапы алгоритма классического метода расчета переходных токов и напряжений в электрической цепи.

3. Проанализировать решение задач:

№ 6.4, 6.10 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1982. - с. 177, 180-181)

В ходе практического занятия выполнить задания:

задание №1. В заданной согласно варианту электрической цепи (таблица 4.1) рассчитать классическим методом и построить графики переходного тока $i(t)$ и напряжения на реактивном элементе $u(t)$.

задание №2. В заданной согласно варианту электрической цепи (таблица 4.2) рассчитать и построить графики переходных тока $i(t)$ и напряжения на реактивном элементе $u(t)$.

задание №3. В заданной согласно варианту сложной электрической цепи (таблица 4.3) рассчитать и построить графики переходных токов $i(t)$

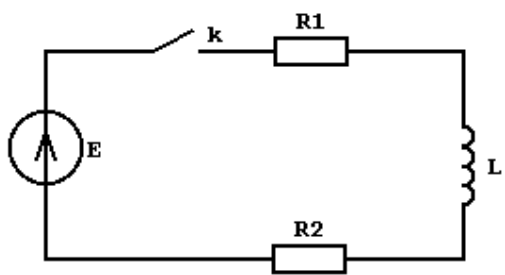


Рисунок 4.4

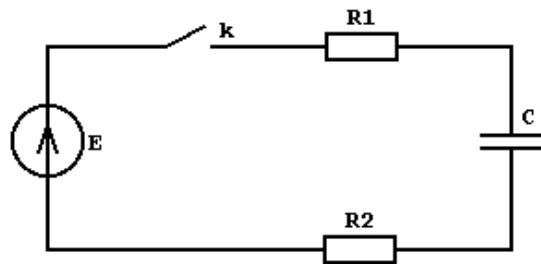


Рисунок 4.5

Таблица 4.1

вариант №	схема Рисунок №	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	L, мГн	C, мкФ	E, В	J, мА
0	4.4	1	1	20	-	20	-
1	4.5	10	50	-	0.20	40	-
2	4.6	50	20	-	0.50	-	0.5
3	4.7	20	30	50	-	-	0.1
4	4.8	18	20	80	-	25	-
5	4.9	10	25	-	0.02	30	-
6	4.10	15	10	10	-	-	0.2
7	4.11	20	30	-	0.25	-	0.4
8	4.12	25	40	-	0.05	-	0.5
9	4.13	40	70	40	-	15	-
10	4.14	20	10	25	-	35	-
11	4.15	10	20	-	0.01	40	-
12	4.16	15	25	60	-	45	-
13	4.17	40	30	30	-	25	-
14	4.5	20	40	-	0.10	30	-
15	4.6	50	60	-	0.30	-	0.3
16	4.7	60	40	30	-	-	0.2
17	4.8	48	30	35	-	45	-
18	4.9	50	45	-	0.22	70	-
19	4.10	25	40	15	-	-	0.6
20	4.11	80	30	-	0.20	-	0.5
21	4.12	25	50	-	0.02	-	0.7
22	4.13	40	80	20	-	25	-
23	4.14	25	50	25	-	55	-
24	4.15	30	40	-	0.03	20	-
25	4.16	15	45	65	-	40	-
26	4.17	30	50	35	-	25	-
27	4.11	70	30	-	0.20	-	0.7
28	4.12	35	40	-	0.04	-	0.3
29	4.13	40	20	45	-	10	-
30	4.14	25	15	20	-	30	-

31	4.15	15	30	-	0.06	45	-
32	4.16	10	20	65	-	40	-
33	4.17	40	20	20	-	35	-
34	4.5	60	40	-	0.12	30	-
35	4.6	55	30	-	0.20	-	0.1
36	4.7	90	40	10	-	-	0.2
37	4.8	40	70	35	-	40	-
38	4.9	50	55	-	0.24	70	-
39	4.10	25	70	18	-	-	0.6
40	4.14	30	20	20	-	35	-
41	4.15	20	10	-	0.01	40	-
42	4.16	25	15	30	-	45	-
43	4.17	35	20	10	-	25	-
44	4.5	25	30	-	0.10	30	-
45	4.6	30	40	-	0.30	-	0.5
46	4.7	20	20	33	-	-	0.4

Таблица 4.2

вариант №	схема Рис. №	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	L, мГн	C, пФ	E, В	J, мА
0	4.18	0.2	0.2	-	2	20	-
1	4.19	10	50	10	-	40	-
2	4.20	50	20	-	0.50	30	-
3	4.21	20	30	50	-	35	-
4	4.22	18	20	-	5	-	0.1
5	4.23	10	25	-	0.02	-	0.2
6	4.24	15	10	10	-	25	-
7	4.25	20	30	-	0.25	35	-
8	4.26	25	40	12	-	40	-
9	4.27	40	70	-	3	15	-
10	4.28	20	10	-	0.25	35	-
11	4.29	10	20	-	0.01	-	0.3
12	4.30	15	25	-	0.3	45	-
13	4.31	40	30	30	-	25	-
14	4.22	20	40	-	5	-	0.1
15	4.23	50	60	-	0.02	-	0.2
16	4.24	60	40	10	-	25	-
17	4.25	48	30	-	0.25	35	-
18	4.26	50	45	12	-	40	-
19	4.27	25	40	-	3	15	-
20	4.28	80	30	-	0.25	35	-
21	4.29	25	50	-	0.01	-	0.3
22	4.30	40	80	-	0.7	45	-
23	4.31	25	50	30	-	25	-
24	4.19	30	40	10	-	40	-
25	4.20	15	45	-	0.50	30	-
26	4.21	30	50	50	-	35	-
27	4.22	70	30	-	5	-	0.1
28	4.23	35	40	-	0.02	-	0.2
29	4.24	40	20	10	-	25	-
30	4.25	25	15	-	0.25	35	-

31	4.26	15	30	12	-	40	-
32	4.27	10	20	-	3	15	-
33	4.28	40	20	-	0.25	35	-
34	4.29	60	40	-	0.01	-	0.3
35	4.30	55	30	-	0.4	45	-
36	4.31	90	40	30	-	25	-
37	4.21	40	70	50	-	35	-
38	4.22	50	55	-	5	-	0.1
39	4.23	25	70	-	0.02	-	0.2
40	4.28	80	30	-	0.25	35	-
41	4.29	25	50	-	0.01	-	0.3
42	4.30	40	80	-	0.7	45	-
43	4.31	25	50	30	-	25	-
44	4.19	30	40	10	-	40	-
45	4.20	15	45	-	0.50	30	-
46	4.21	30	50	50	-	35	-

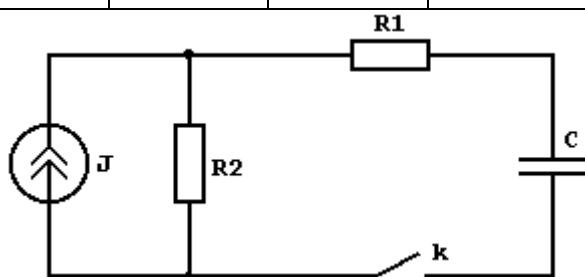


Рисунок 4.6

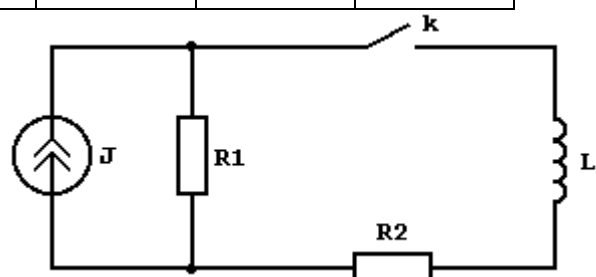


Рисунок 4.7

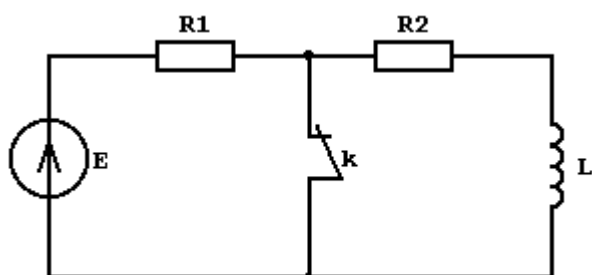


Рисунок 4.8

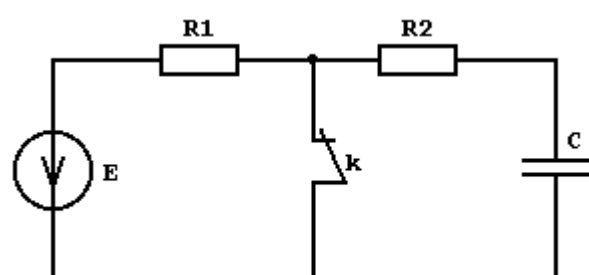


Рисунок 4.9

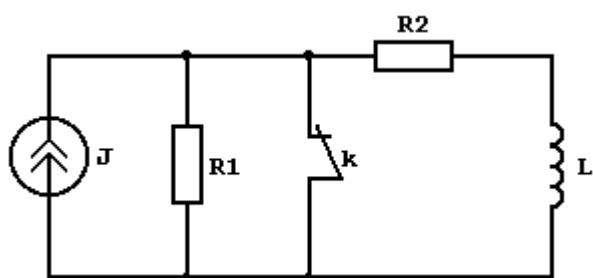


Рисунок 4.10

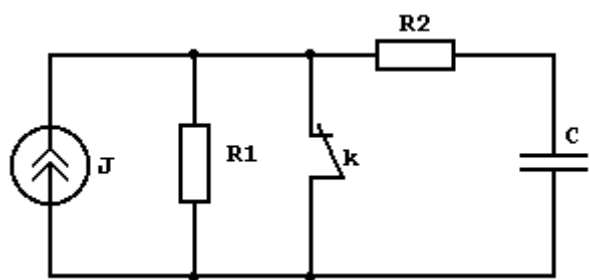


Рисунок 4.11

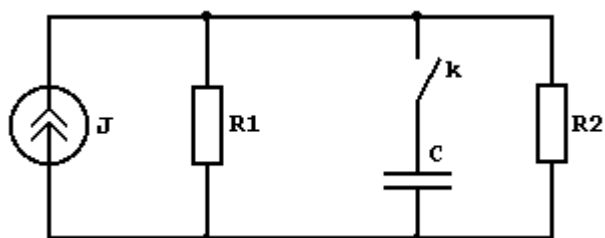


Рисунок 4.12

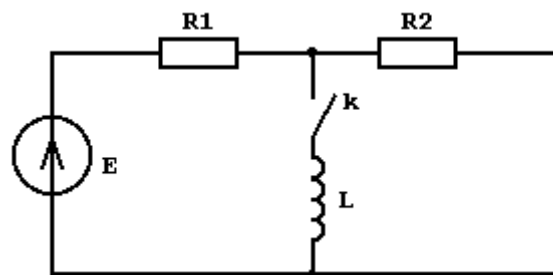


Рисунок 4.13

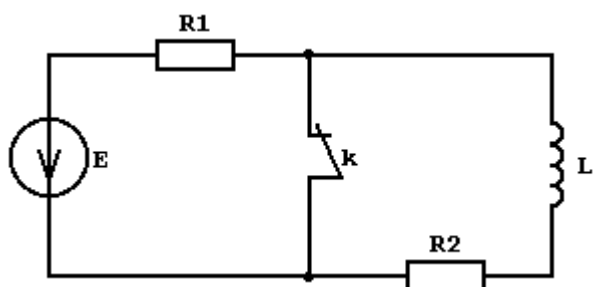


Рисунок 4.14

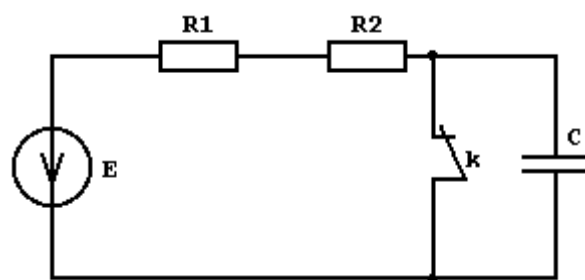


Рисунок 4.15

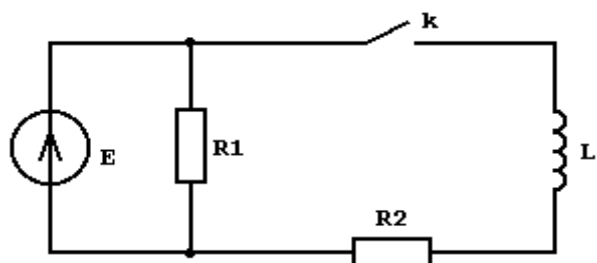


Рисунок 4.16

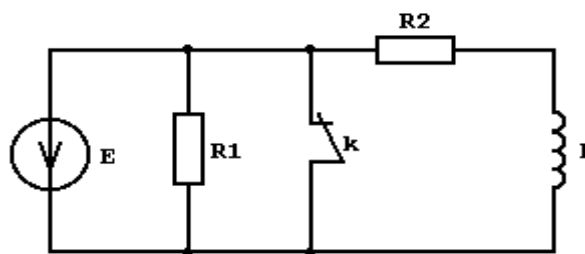


Рисунок 4.17

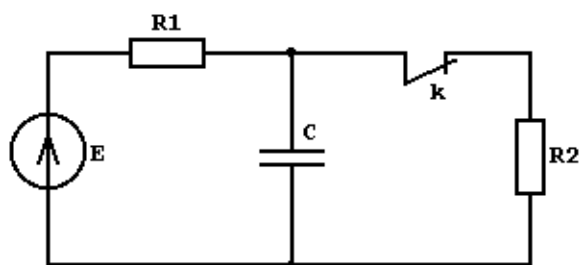


Рисунок 4.18

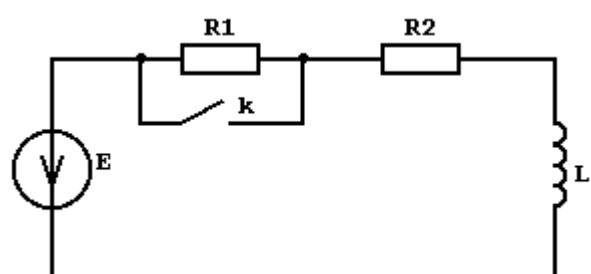


Рисунок 4.19

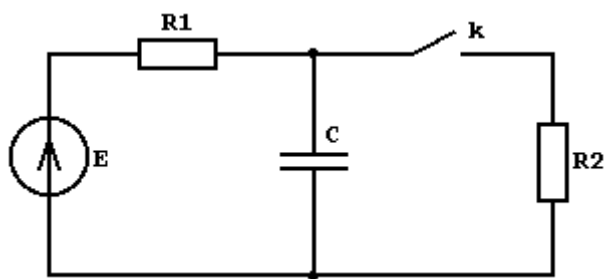


Рисунок 4.20

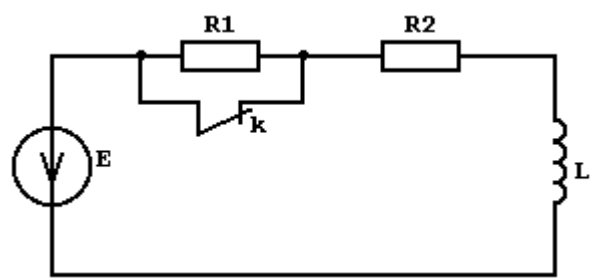


Рисунок 4.21

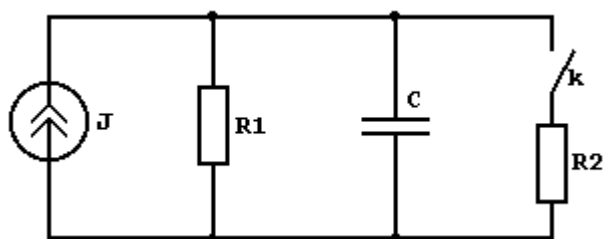


Рисунок 4.22

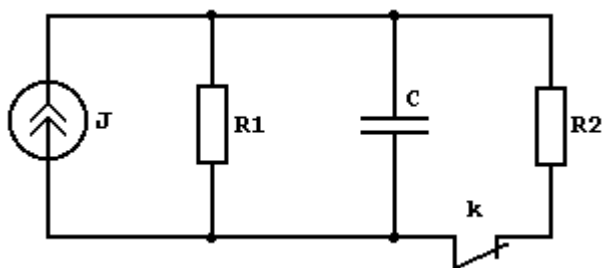


Рисунок 4.23

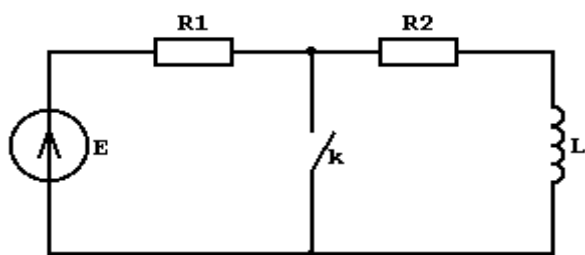


Рисунок 4.24

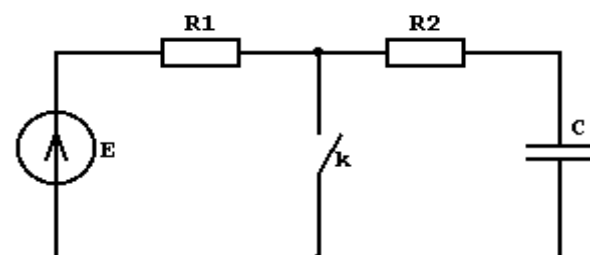


Рисунок 4.25

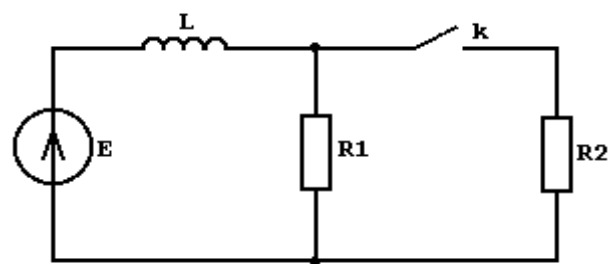


Рисунок 4.26

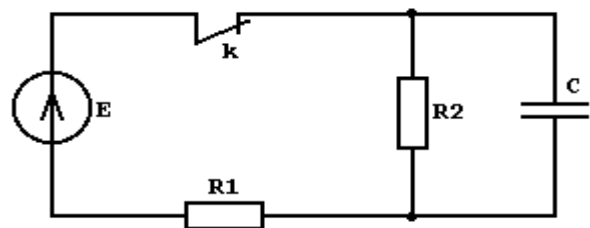


Рисунок 4.27

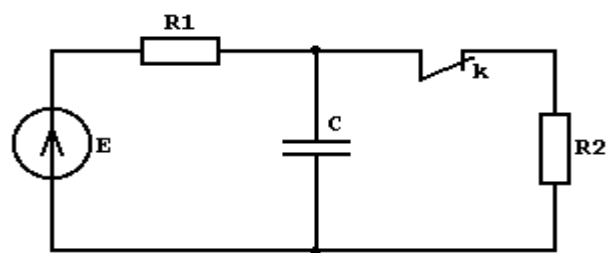


Рисунок 4.28

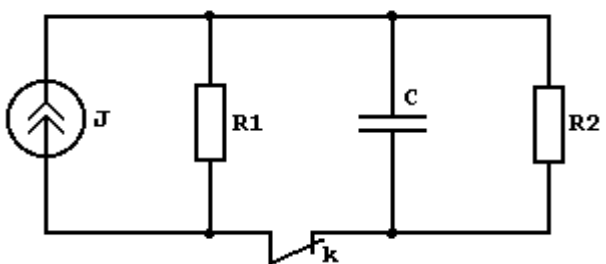


Рисунок 4.29

Таблица 4.3

вариант №	схема Рисунок №	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	R ₃ , кОм	L, мГн	C, мкФ	E, В	J, мА
0	4.32	2	2	2	30	-	20	-
1	4.33	100	50	50	-	0.01	25	-
2	4.34	150	200	200	250	-	30	-
3	4.35	200	300	300	-	0.02	35	-
4	4.36	180	230	230	300	-	-	0.10
5	4.37	160	250	250	-	0.05	40	-
6	4.38	130	150	150	100	-	-	0.20
7	4.39	120	200	200	-	0.03	-	0.25
8	4.40	220	190	190	-	0.04	-	0.30
9	4.41	240	170	170	150	-	50	-
10	4.42	200	210	210	300	-	-	0.10
11	4.43	110	200	200	-	0.10	-	0.20
12	4.42	150	200	200	400	-	-	0.35
13	4.37	200	300	300	-	0.08	60	-
14	4.32	180	230	230	200	-	20	-
15	4.33	160	250	250	-	0.01	25	-
16	4.34	130	150	150	250	-	30	-
17	4.35	120	200	200	-	0.02	35	-
18	4.36	220	190	190	300	-	-	0.10
19	4.37	240	170	170	-	0.05	40	-
20	4.38	200	210	210	100	-	-	0.20
21	4.39	110	200	200	-	0.03	-	0.25
22	4.40	120	200	200	-	0.04	-	0.30
23	4.41	160	250	250	150	-	50	-
24	4.42	150	200	200	200	-	-	0.20
25	4.43	200	300	300	-	0.10	-	0.20
26	4.42	180	230	230	400	-	-	0.35
27	4.37	160	250	250	-	0.08	60	-
28	4.33	130	150	150	-	0.01	25	-
29	4.34	120	200	200	250	-	30	-
30	4.35	220	190	190	-	0.02	35	-
31	4.36	240	170	170	300	-	-	0.10

32	4.37	200	210	210	-	0.05	40	-
33	4.38	110	200	200	100	-	-	0.20
34	4.39	150	200	200	-	0.03	-	0.25
35	4.40	200	300	300	-	0.04	-	0.30
36	4.41	180	230	230	150	-	50	-
37	4.42	160	250	250	100	-	-	0.30
38	4.43	130	150	150	-	0.10	-	0.20
39	4.33	120	200	200	-	0.01	25	-
40	4.42	100	210	240	-	0.04	40	-
41	4.43	210	200	240	-	0.15	-	0.20
42	4.42	350	250	240	200	-	-	0.35
43	4.37	400	350	350	-	0.06	65	-
44	4.32	280	250	250	400	-	25	-
45	4.33	360	280	280	-	0.02	20	-
46	4.34	430	180	180	450	-	35	-

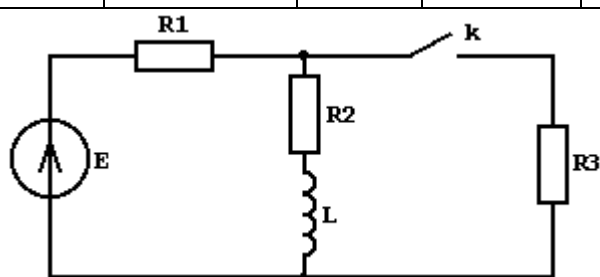


Рисунок 4.32

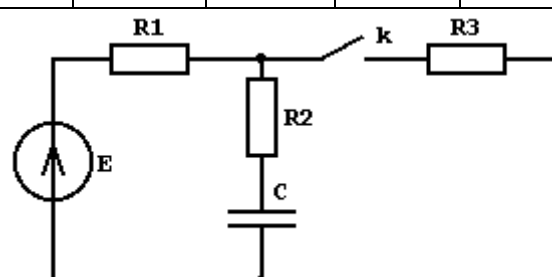


Рисунок 4.33

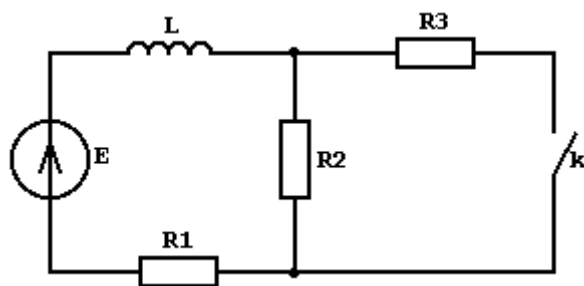


Рисунок 4.34

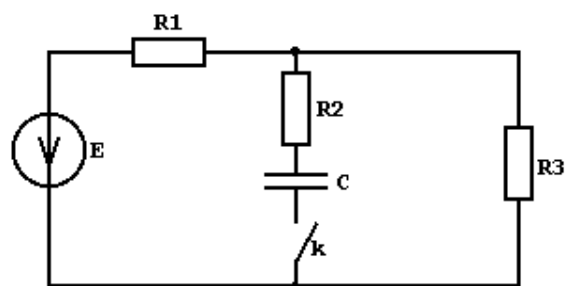


Рисунок 4.35

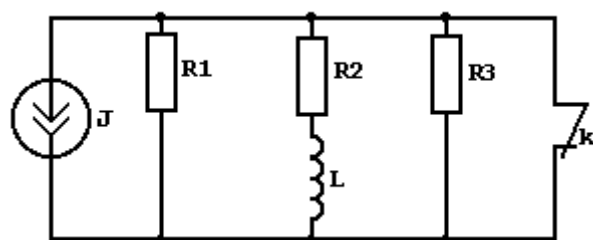


Рисунок 4.36

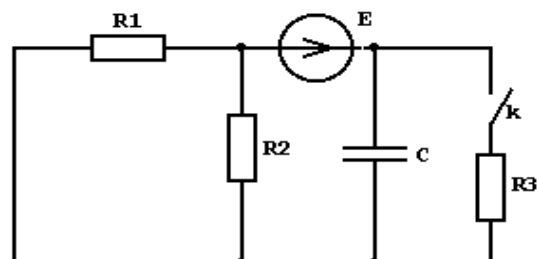


Рисунок 4.37

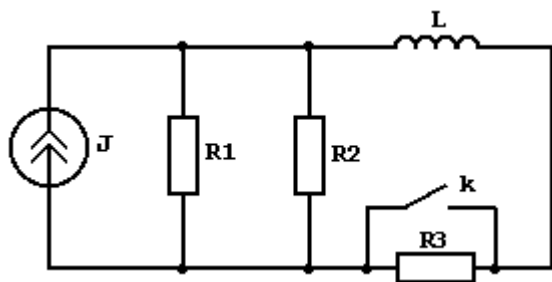


Рисунок 4.38

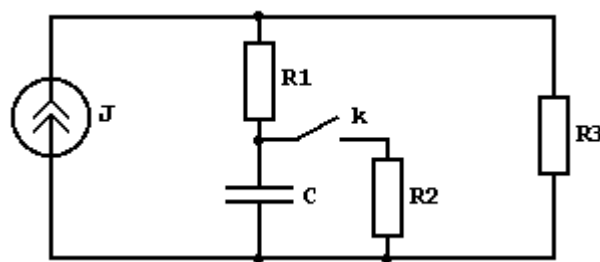


Рисунок 4.39

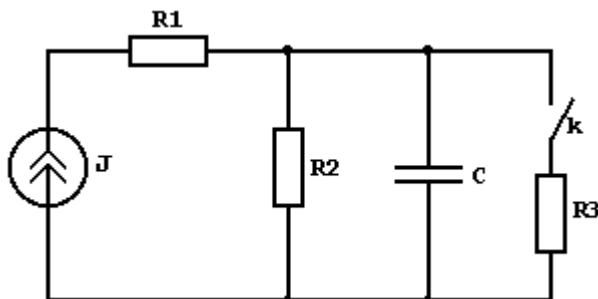


Рисунок 4.40

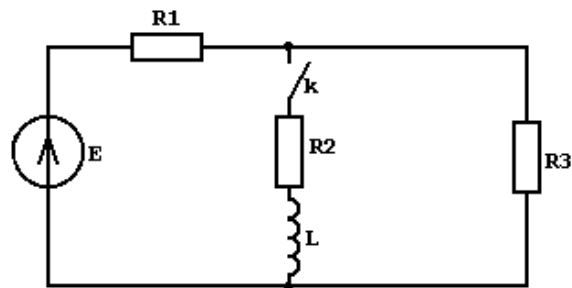


Рисунок 4.41

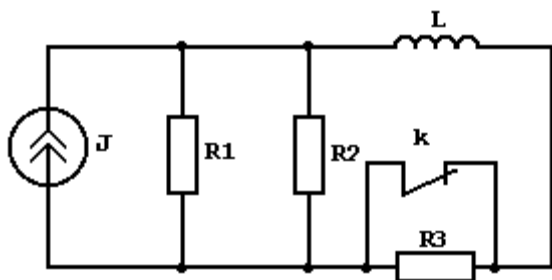


Рисунок 4.42

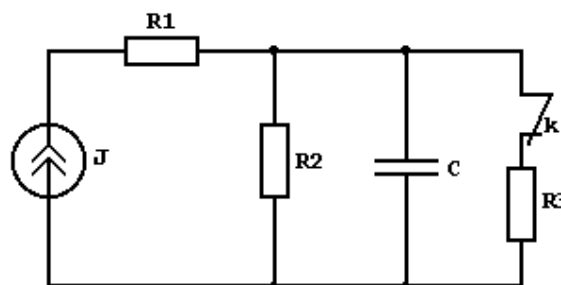


Рисунок 4.43

Пример выполнения заданий (вариант №0)

Задание 1. В заданной электрической цепи (см. Рисунок 4.4) рассчитать и построить графики переходного тока $i(t)$ и напряжения на индуктивном элементе $u(t)$, если $R_1=1\text{ кОм}$, $R_2=1\text{ кОм}$, $L=30\text{ мГн}$, $E=20\text{ В}$ (см. таблицу 4.1).

Решение

1. В заданной электрической цепи (см. Рисунок 4.4) содержится только один индуктивный элемент, в магнитном поле которого может запасаться энергия, поэтому для определения начальных условий используется первый закон коммутации, согласно которому

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

2. Для цепи (рисунок 4.46) после замыкания ключа "к" запишем уравнение по 2 закону Кирхгофа $u_R + u_L = E$ или $(R_1 + R_2) \cdot i + L \frac{di}{dt} = E$ (1)

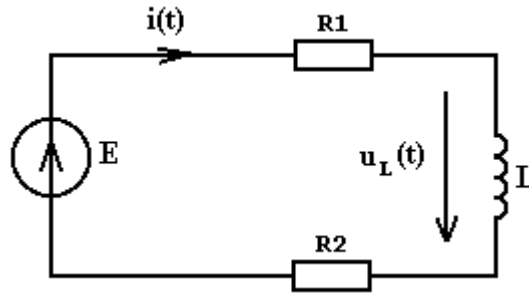


Рисунок 4.46

3. Переходной ток $i(t) = i_{cb}(t) + i_{уст}(t)$

4. Находим $i_{уст}(t)$ из уравнения (1) при $\frac{di}{dt} = 0$

$$i_{уст}(t) = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{20}{(1+1) \cdot 10^3} = 10^{-2} \text{ А.}$$

5. Находим $i_{cb}(t) = A \cdot e^{st}$,

где s - корень характеристического уравнения $R + s L = 0$;

$$s = -\frac{R}{L} = -\frac{2 \cdot 10^3}{20 \cdot 10^{-3}} = -1 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1},$$

A - постоянная, определяемая из начальных условий

$$i(0) = i_{cb}(0) + i_{уст}(0), \quad 0 = A \cdot e^{s \cdot 0} + \frac{E}{R}, \quad A = -\frac{E}{R}.$$

$$\text{Следовательно } i_{cb}(t) = -\frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L} \cdot t} = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = -10^{-2} \cdot e^{-10^5 t}$$

A ,

где $\frac{L}{R} = \tau$ - постоянная времени цепи.

6. Переходный ток в цепи

$$i(t) = i_{уст}(t) + i_{cb}(t) = \frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{E}{R} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) = 10^{-2} \left(1 - e^{-10^5 t} \right) \text{ А.}$$

7. Напряжение на индуктивном элементе

$$u(t) = u_L(t) = L \frac{di}{dt} = L \frac{d}{dt} \left(\frac{E}{R} - \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L} t} \right) = -L \left(\frac{R}{L} \cdot \frac{E}{R} e^{-\frac{R}{L} t} \right) = E \cdot e^{-\frac{R}{L} t} = 20 e^{-10^5 t} \text{ В.}$$

8. Для построения графиков $i(t)$ и $u(t)$ выполним расчеты и результаты представим в таблице 4.4

Таблица 4.4

$t \cdot 10^{-5}, c$	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
t/τ	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$e^{-t/\tau}$	1	0.61	0.37	0.22	0.14	0.08	0.05	0.03	0.018	0.011	0.007
$1 - e^{-t/\tau}$	0	0.39	0.63	0.78	0.87	0.92	0.95	0.97	0.98	0.989	0.993
$i(t), mA$	0	3.9	6.3	7.8	8.7	9.2	9.5	9.7	9.8	9.89	9.93
$u(t), B$	20	12	7.4	4.5	2.7	1.6	1	0.6	0.36	0.22	0.14

9. Строим графики $i(t)$ и $u(t)$

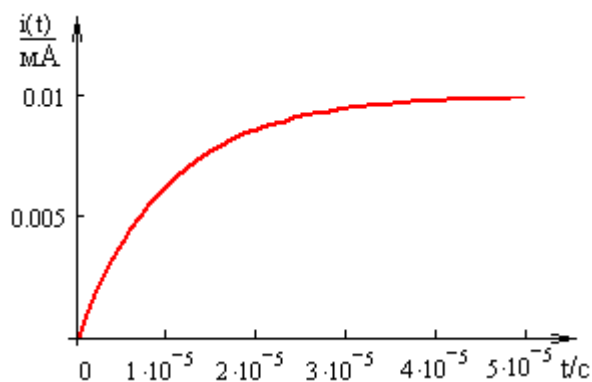


Рисунок 4.47

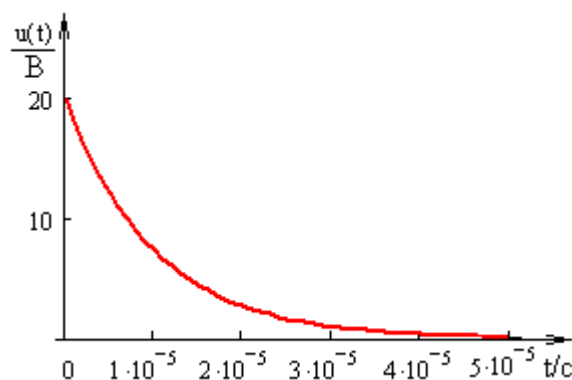


Рисунок 4.48

10. Определим длительность переходного процесса $t_{пер} = 3 \div 4 \tau = 3 \cdot 10^{-5} \div 4 \cdot 10^{-5}, c$.

Задание 2. В электрической цепи (см. рисунок 4.18) рассчитать и построить графики переходных тока $i(t)$ и напряжения на реактивном элементе $u(t)$, если $R1=0.2k\Omega$, $R2=0.2k\Omega$, $C=20$ пФ, $E=20$ В (см. таблицу 4.2).

Решение

1. В заданной электрической цепи (см. рисунок 4.18) содержится только один емкостный элемент, в электрическом поле которого может запасаться энергия, поэтому для определения начальных условий

используется второй закон коммутации, согласно которому $u_c(+0) = u_c(-0) =$

$$u_c(0) = \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{E \cdot 200}{400} = \frac{E}{2} = \frac{20}{2} = 10 \text{ В.}$$

2. Составим уравнение для напряжений по второму закону Кирхгофа после коммутации в цепи (рисунок 4.9) $u_{R1} + u_c = E$ или $R_1 i + u_c = E$,

$$R_1 C \frac{du_c}{dt} + u_c = E \quad (2)$$

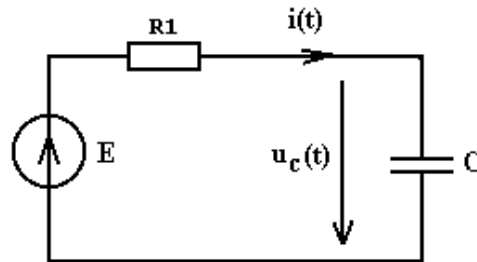


Рисунок 4.49

3. Переходное напряжение определим как $u_c(t) = u_c^{cb} + u_c^{уст}$.

4. $u_c^{уст}$ находим из уравнения (2) при $\frac{du_c}{dt} = 0$, т.е. $u_c^{уст} = E = 20 \text{ В.}$

5. $u_c^{cb}(t) = Ae^{st}$ - общее решение однородного линейного уравнения

$$R_1 C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0$$

Для определения корня s составим характеристическое уравнение

$$R_1 C \cdot s + 1 = 0$$

$$\text{Отсюда } s = -\frac{1}{R_1 C} = -\frac{1}{200 \cdot 2 \cdot 10^{-12}} = -\frac{1}{4 \cdot 10^{-10}} = -25 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}.$$

Постоянную A находим из уравнения с учетом начальных условий

$$u_c(0) = u_c^{уст}(0) + u_c^{cb}(0), \quad \frac{E}{2} = E + Ae^{s \cdot 0}, \quad A = -\frac{E}{2} = -10 \text{ В, следовательно,}$$

$$u_c^{cb}(t) = -\frac{E}{2} e^{-\frac{t}{R_1 C}} = -\frac{E}{2} e^{-\frac{t}{\tau}} = -10 e^{-\frac{t}{4 \cdot 10^{-10}}} = -10 \cdot e^{-25 \cdot 10^8 t} \text{ В.}$$

Здесь $\tau = R_1 C = 4 \cdot 10^{-10} \text{ с}$, τ - постоянная времени цепи.

6. Переходное напряжение

$$u_c(t) = u_c^{уст} + u_c^{св} = E - \frac{E}{2} \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} = E \left(1 - 0.5 \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} \right) = 20 \left(1 - 0.5 \cdot e^{-25 \cdot 10^8 \cdot t} \right) \text{ В.}$$

7. Переходный ток

$$i(t) = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{d}{dt} \left(E - \frac{E}{2} \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} \right) = -C \cdot \frac{E}{2} \cdot \left(-\frac{1}{R_1 C} \right) \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{R_1} \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} =$$

$$= \frac{20}{2 \cdot 200} e^{-25 \cdot 10^8 \cdot t} = 0.05 e^{-25 \cdot 10^8 \cdot t} \text{ А.}$$

8. Для построения графиков $i(t)$ и $u(t)$ выполним расчеты и результаты представим в таблице 4.5

Таблица 4.5

$t \cdot 10^{-10}, \text{ с}$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
t/τ	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$e^{-t/\tau}$	1	0.61	0.37	0.22	0.14	0.08	0.05	0.03	0.018	0.011	0.007
$i(t), \text{ мА}$	0.05	0.03	0.018	0.011	0.007	0.004	0.0025	0.002	0.001	0.0005	0.0003
$u(t), \text{ В}$	10	14	16	17.8	18.6	19.2	19.5	19.7	19.8	19.89	19.9

9. Строим графики $u_c(t)$ и $i(t)$

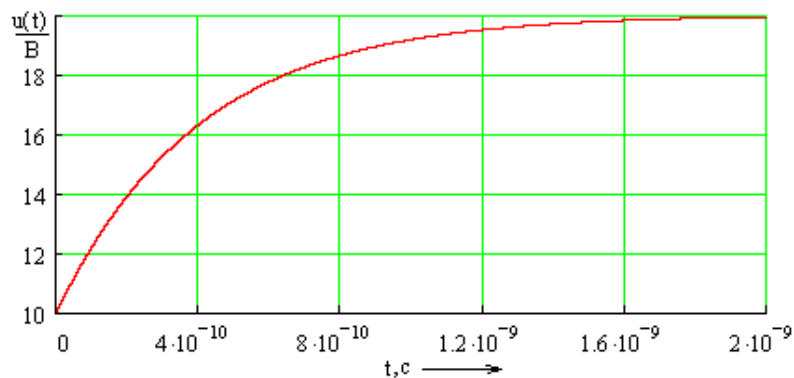


Рисунок 4.50

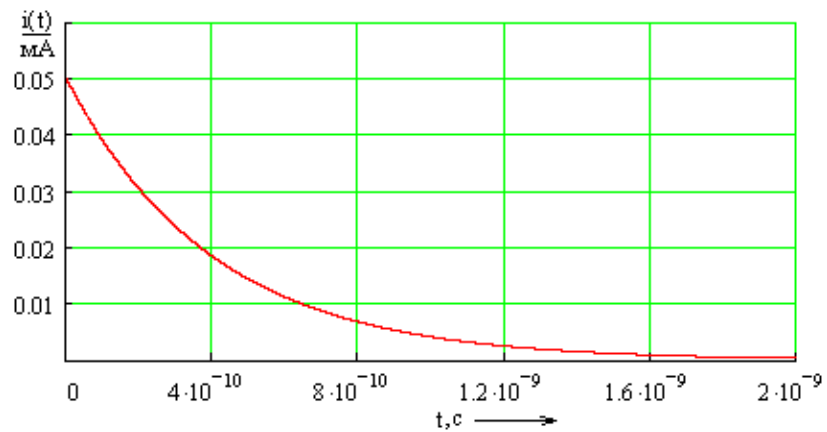


Рисунок 4.51

8. Находим длительность (практическую) переходного процесса

$$t_{\text{пер}} \approx 4\tau = 16 \cdot 10^{-10} \text{ с.}$$

Задание 3. В электрической цепи (см. рисунок 4.32) рассчитать и построить графики переходных токов, если $R_1=2\text{кОм}$, $R_2=2\text{кОм}$, $R_3=2\text{кОм}$, $L=30 \text{ мГн}$, $E=20 \text{ В}$ (см. таблицу 4.3).

Решение

Первый вариант решения

1. Определим начальные условия $i_2(t) = i_2(0) = \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{20}{4 \cdot 10^3} = 5 \cdot 10^{-3}$

А.

2. Схему после коммутации можно преобразовать к виду (рисунок 4.52, 4.53):

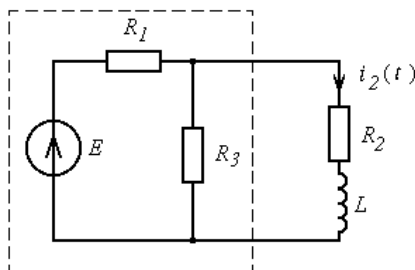


Рисунок 4.52

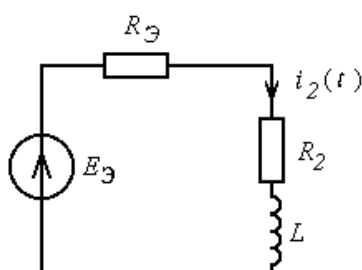


Рисунок 4.53

$$E_3 = U^{xx} = \frac{E \cdot R_3}{R_1 + R_3} = 10 \text{ В}$$

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} = 1 \text{ Ом}$$

3. Для полученной схемы (рисунок 4.53) запишем дифференциальное уравнение $L \frac{di_2}{dt} + (R_3 + R_2)i_2 = E_3 \quad (3)$

4. Находим переходный ток $i_2(t) = i_{2\text{св}}(t) + i_{2\text{уст}}(t)$

5. Установившийся ток определим из уравнения (3) при $\frac{di_2}{dt} = 0$

$$i_{2\text{уст}}(t) = \frac{E_9}{R_9 + R_2} = \frac{10}{10^3 + 2 \cdot 10^3} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ А}$$

6. Свободный ток $i_{2\text{св}}(t) = A \cdot e^{st}$,

где s - корень характеристического уравнения $sL + (R_9 + R_2) = 0$

$$s = -\frac{R_9 + R_2}{L} = -\frac{3 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^{-3}} = -10^5 \text{ с}^{-1},$$

постоянную A определим с учетом начальных условий

$$i_2(0) = i_{2\text{уст}}(0) + i_{2\text{св}}(0), \quad \frac{E}{R_1 + R_2} = \frac{E_9}{R_9 + R_2} + A \cdot e^{s \cdot 0},$$

$$A = \frac{E}{R_1 + R_2} - \frac{E_9}{R_9 + R_2} = 5 \cdot 10^{-3} - 3,3 \cdot 10^{-3} = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

Следовательно $i_{2\text{св}}(t) = A \cdot e^{st} = 1,7e^{-10^5 t} \text{ мА}.$

7. Переходный ток $i_2(t) = i_{2\text{уст}}(t) + i_{2\text{св}}(t) = 3,3 \cdot 10^{-3} + 1,7 \cdot 10^{-3} e^{-10^5 t} \text{ А}.$

8. Напряжение на участке с элементами R_2, L

$$\begin{aligned} u(t) &= R_2 \cdot i_2(t) + L \frac{di_2(t)}{dt} = 2 \cdot 10^3 \left(3,3 \cdot 10^{-3} + 1,7 \cdot 10^{-3} e^{-10^5 t} \right) + 30 \cdot 10^{-3} \left(-1,7 \cdot 10^2 e^{-10^5 t} \right) = \\ &= 6,6 + 3,4 \cdot e^{-10^5 t} - 5,1 \cdot e^{-10^5 t} = 6,6 - 1,7 \cdot e^{-10^5 t} \text{ В}. \end{aligned}$$

9. Так как напряжение на участке с элементами R_2, L равно напряжению на элементе R_3 (участки соединены между собой параллельно см. рисунок 4.52), то по закону Ома находим ток

$$i_3 = \frac{u(t)}{R_3} = 3,3 \cdot 10^{-3} - 0,85 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-10^5 t} \text{ А}.$$

10. Ток $i_1 = i_2 + i_3 = 6,6 \cdot 10^{-3} + 0,85 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-10^5 t} \text{ А}.$

11. Для построения графиков выполним расчеты и результаты представим в табл.4.6

12. Построим графики токов и напряжения (рисунки 4.54-4.55)

Таблица 4.6

$t \cdot 10^{-5},$ с	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
t/τ	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$e^{-t/\tau}$	1	0.61	0.37	0.22	0.14	0.08	0.05	0.03	0.018	0.011	0.007
$i_1(t),$ мА	7.5	7.17	6.97	6.85	6.779	6.74	6.71	6.69	6.68	6.676	6.672
$i_2(t),$ мА	5	4.34	3.95	3.71	3.559	3.47	3.42	3.38	3.36	3.352	3.345
$i_3(t),$ мА	2.5	2.83	3.02	3.15	3.220	3.27	3.29	3.31	3.32	3.324	3.328
$u(t),$ В	5	5.66	6.05	6.29	6.44	6.53	6.58	6.62	6.64	6.648	6.655

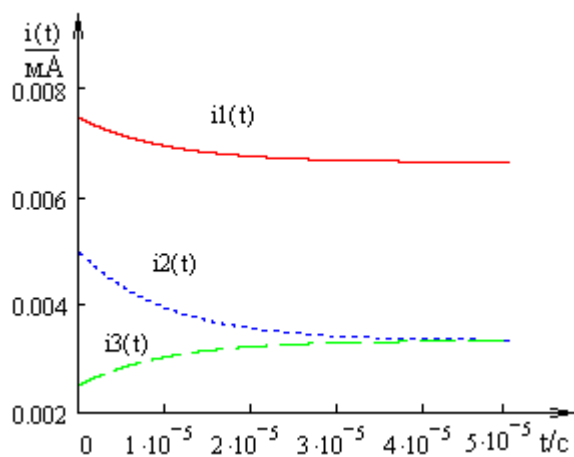


Рисунок 4.54

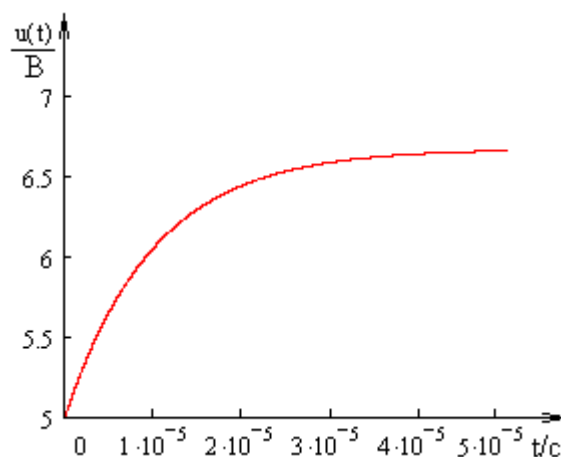


Рисунок 4.55

второй вариант решения

1. Начальные условия $i_2(0) = \frac{20}{4 \cdot 10^{-3}} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$

2. По 1 и 2 законам Кирхгофа составим систему уравнений для цепи (рисунок 4.56)

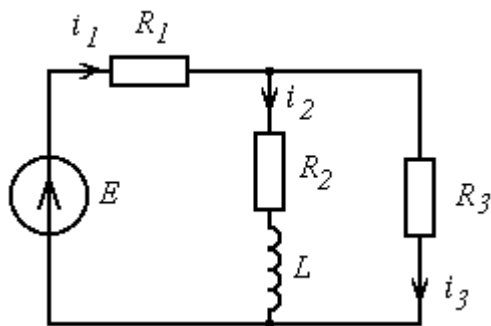


Рисунок 4.56

$$i_1 = i_2 + i_3 \quad (4)$$

$$R_1 i_1 + i_2 R_2 + L \frac{di_2}{dt} = E \quad (5)$$

$$R_1 i_1 + i_3 R_3 = E \quad (6)$$

Из (4) $i_3 = i_1 - i_2$ подставим в (6) $R_1 i_1 + (i_1 - i_2) R_3 = E$, отсюда

$$i_1 = \frac{E + i_2 R_3}{R_1 + R_3}, \text{ тогда из (5) } R_1 \cdot \frac{E}{R_1 + R_3} + \frac{i_2 R_3 R_1}{R_1 R_3} + i_2 R_2 + L \frac{di_2}{dt} = E \text{ или}$$

$$L \frac{di_2}{dt} + \frac{R_3 \cdot R_1 + R_2 R_1 + R_3 R_2}{R_1 + R_3} i_2 = \frac{E(R_1 + R_3) - R_1 E}{R_1 + R_3}$$

$$\text{Обозначим } R_3 = \frac{R_3 \cdot R_1 + R_2 R_1 + R_3 R_2}{R_1 + R_3}, \quad E_3 = \frac{E(R_1 + R_3) - R_1 E}{R_1 + R_3} = \frac{E(R_3)}{R_1 + R_3}$$

$$R_3 = \frac{(2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^3 + 2 \cdot 10^3 \cdot 2 \cdot 10^3)}{4 \cdot 10^3} = 3 \cdot 10^3 \text{ Ом,}$$

$$E_3 = \frac{E \cdot R_3}{R_1 + R_3} = \frac{20 \cdot 2 \cdot 10^3}{4 \cdot 10^3} = 10 \text{ В.}$$

3. С учетом обозначений дифференциальное уравнение примет вид

$$L \frac{di_2}{dt} + R_3 i_2 = E_3$$

4. Переходный ток $i_2(t) = i_{2\text{уст}}(t) + i_{2\text{св}}(t)$

$$5. \text{ Установившийся ток } i_{2\text{уст}}(t) = \frac{E_3}{R_3} = \frac{10}{3 \cdot 10^3} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

$$6. \text{ Свободный ток } i_{2\text{св}}(t) = A \cdot e^{s \cdot t}. \text{ Здесь } s = -\frac{R_3}{L} = \frac{3 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^{-3}} = -10^5 \text{ с}^{-1}.$$

A - постоянная, определяемый с учетом начальных условий из уравнения

$$i_2(0) = i_{2\text{уст}}(0) + i_{2\text{св}}(0) \text{ или } \frac{E}{R_1 + R_2} = A \cdot e^{s \cdot 0} + \frac{E_3}{R_3},$$

$$\text{отсюда } A = 5 \cdot 10^{-3} - 3,3 \cdot 10^{-3} = 1,7 \cdot 10^{-3},$$

следовательно $i_{2\text{св}}(t) = 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-10^5 t}$ А.

7. Переходный ток $i_2(t) = 3.3 \cdot 10^{-3} + 1.7 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-10^5 t}$ А.

8. Ток $i_1(t) = \frac{E + i_2 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{20 + 6.6 + 3.4 \cdot e^{-10^5 t}}{4 \cdot 10^{-3}} = 6.6 \cdot 10^{-3} + 0.85 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-10^5 t}$ А.

9. Ток $i_3(t) = i_1(t) - i_2(t) = 3.3 \cdot 10^{-3} - 0.85 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-10^5 t}$ А.

10. Напряжение $u(t) = i_3(t) \cdot R_3 = 6.6 - 1.7 \cdot e^{-10^5 t}$ В.

Токи и напряжения имеют такие же значения, что и при решении 1 способом.

7. Расчет переходных процессов операторным методом

Учебные вопросы:

1. Расчет переходных токов, напряжений в простейшей RC (RL)-цепи при нулевых начальных условиях.
2. Расчет переходных токов и напряжений в простейшей RC (RL) -цепи при ненулевых начальных условиях.
3. Расчет переходных токов и напряжений в сложной RC (RL) –цепи.

задание студентам для подготовки к занятию

1. Изучить:

1. Никулин В.И. Теория электрических цепей. - М.: РИОР, 2016 , с. 109-114.
2. Бакалов В.П., Воробиенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 102-105.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с.202-207.
4. Пискунов Н.И. Дифференциальное и интегральное исчисления для втузов. - М.: Наука, 1985, ч 2, с.400-410.

2. Ответить на вопросы:

1. Сформулируйте 1-й и 2-й законы коммутации.
2. Изобразите схемы замещения идеализированного индуктивного элемента при нулевых начальных условиях.
3. Изобразите схему замещения идеализированного индуктивного элемента при ненулевых начальных условиях.
4. Изобразите схему замещения идеализированного емкостного элемента при нулевых начальных условиях.
5. Изобразите схему замещения идеализированного емкостного элемента при ненулевых начальных условиях.
6. Используя прямое преобразование Лапласа, определите изображение $F(s)$ для единичной функции $1(t)$ (функции Хевисайда).
7. Перечислите основные свойства преобразований Лапласа.

8. Для заданных цепей (рисунки 4.57-4.59) определите начальные условия на основании законов коммутации и составьте операторные схемы замещения:

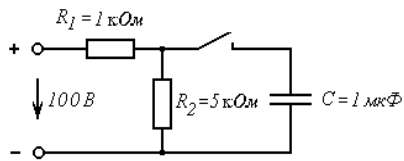


Рисунок 4.57

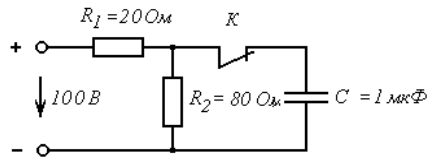


Рисунок 4.58

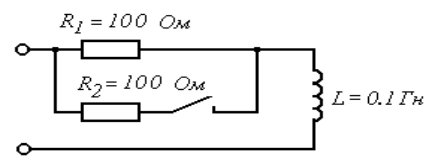


Рисунок 4.59

9. Запишите выражение для закона Ома в операторной форме при нулевых и ненулевых начальных условиях для цепи, содержащей последовательно соединенные R, L, C элементы.

10. Назовите этапы алгоритма операторного метода расчета переходных процессов в электрической цепи.

3. Проанализировать решение задач:

№ 7.1, 7.10 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1982. - с. 207-209, 213-215)

В ходе практического занятия выполнить задания:

задание №1. В заданной согласно варианту электрической цепи (см. табл.4.1) рассчитать операторным методом и построить графики переходных тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ на реактивном элементе.

задание №2. В заданной согласно варианту электрической цепи (см. табл.4.2) рассчитать операторным методом и построить графики переходных тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ на реактивном элементе.

задание №3. В заданной согласно варианту сложной электрической цепи (см. табл.4.3) рассчитать операторным методом и построить графики переходных токов $i(t)$.

Таблица 4.7 -Таблица преобразований Лапласа

№ п/п	F(s)	f(t), (t > 0)
1	1	$\delta(t)$
2	$\frac{1}{s}$	1
3	$\frac{A}{s}$	A
4	$\frac{1}{s+a}$	e^{-at}
5	$\frac{s}{s+a}$	$\delta(t) - ae^{-at}$
6	$\frac{1}{s(s+a)}$	$\frac{1}{a}(1 - e^{-at})$
7	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$	$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$
8	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$	$\frac{1}{a-b}(ae^{-at} - be^{-bt})$
9	$\frac{1}{(s+a)^2}$	te^{-at}
10	$\frac{s}{(s+a)^2}$	$e^{-at}(1 - at)$
11	$\frac{1}{s(s+a)^2}$	$\frac{1}{a^2}(1 - e^{-at} - ate^{-at})$
12	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$	$\frac{1}{ab(a-b)}[(a-b) + be^{-at} - ae^{-bt}]$
13	$\frac{1}{s^2 + a^2}$	$\frac{1}{a}\sin at$
14	$\frac{s}{s^2 + a^2}$	$\cos at$
15	$\frac{1}{s(s^2 + a^2)}$	$\frac{1}{a^2}(1 - \cos at)$

16	$\frac{1}{(s+b)^2 + a^2}$	$\frac{1}{a} e^{-bt} \sin at$
17	$\frac{s}{(s+b)^2 + a^2}$	$e^{-bt} \left(\cos at - \frac{b}{a} \sin at \right)$
18	$\frac{1}{s((s+b)^2 + a^2)}$	$\frac{1}{a^2 + b^2} \left[1 - e^{-bt} \left(\cos at + \frac{b}{a} \sin at \right) \right]$

Пример выполнения заданий (вариант №0)

Задание 1. В заданной электрической цепи (см. рисунок 4.4) рассчитать операторным методом и построить графики переходного тока $i(t)$ и напряжения $u(t)$ на индуктивном элементе, если $R_1=1\text{кОм}$, $R_2=1\text{кОм}$, $L=20\text{мГн}$ (см. таблицу 4.1).

Решение

1. Определяем начальные условия по первому закону коммутации

(см. рисунок 4.4) $i_L(0) = 0$

2. Составляем операторную схему замещения (рисунок 4.60) при условии что ключ "к" замкнут и $i_L(0) = 0$

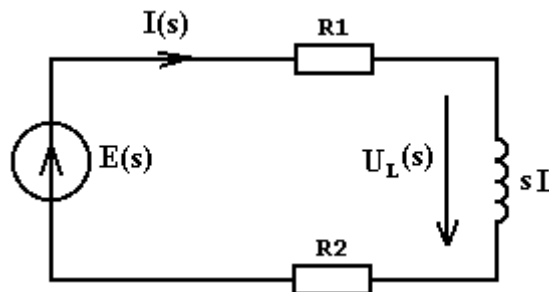


Рисунок 4.60

3. По закону Ома в операторной форме для цепи (рисунок 4.60) находим

$$I(s) = \frac{E(s)}{Z(s)} = \frac{\frac{E}{s}}{(R_1 + R_2 + sL)} = \frac{20}{s(1000 + 1000 + 0.02s)} = \frac{20}{s(0.02s + 2000)}$$

4. Преобразуем выражение для операторного тока $I(s)$ в форму, удобную для табличного преобразования по Лапласу (см. табл. 4.7 п. 6).

$$I(s) = \frac{20}{s(0.02s + 2000)} = \frac{20}{0.02s(s + 10^5)} = \frac{1000}{s(s + 10^5)}$$

5. По таблице преобразования Лапласа (см. табл. 4.7 п. 6), используя при этом также свойство линейности преобразования Лапласа, находим переходный ток

$$i(t) = \frac{1000}{10^5} \left(1 - e^{-10^5 t} \right) = 10^{-2} \left(1 - e^{-10^5 t} \right) \text{ А.}$$

6. Переходное напряжение определим, используя второй закон Кирхгофа для цепи (рисунок 4.61)

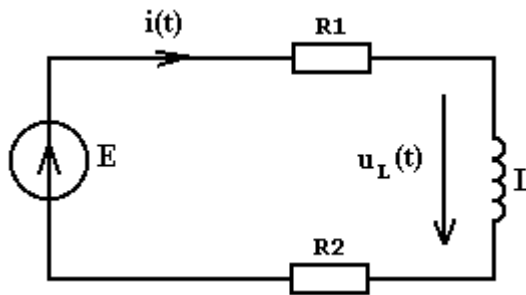


Рисунок 4.61

$$u_L(t) = u(t) = E - (R_1 + R_2)i(t) = 20 - 2000 \cdot 10^{-2} \left(1 - e^{-10^5 t}\right) = 20e^{-10^5 t} \text{ В.}$$

7. Для построения графиков $i(t)$ и $u(t)$ выполним расчеты, и результаты представим в табл. 4.8

Таблица 4.8

$t \cdot 10^{-5},$ с	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
t/τ	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$e^{-t/\tau}$	1	0.61	0.37	0.22	0.14	0.08	0.05	0.03	0.018	0.011	0.007
$1 - e^{-t/\tau}$	0	0.39	0.63	0.78	0.87	0.92	0.95	0.97	0.98	0.989	0.993
$i(t), \text{ мА}$	0	3.9	6.3	7.8	8.7	9.2	9.5	9.7	9.8	9.89	9.93
$u(t), \text{ В}$	20	12	7.4	4.5	2.7	1.6	1	0.6	0.36	0.22	0.14

9. Строим графики $i(t)$ и $u(t)$

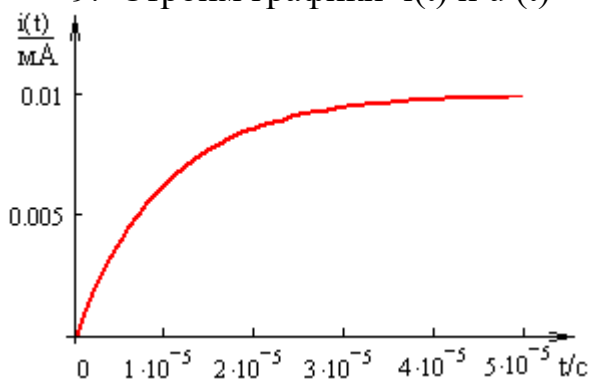


Рисунок 4.62

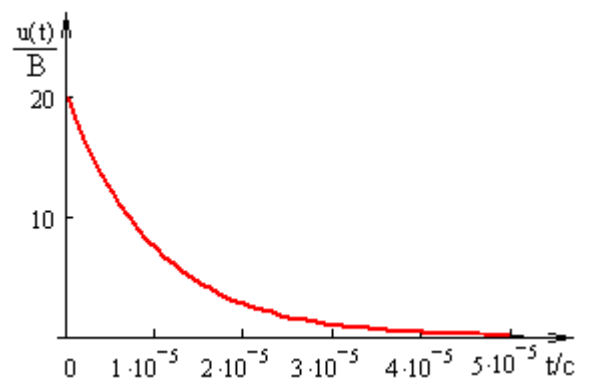


Рисунок 4.63

Задание 2. В электрической цепи (см. рисунок 4.18) операторным методом рассчитать и построить графики переходных тока $i(t)$ и напряжения на реактивном элементе $u(t)$, если $R_1=0.2\text{кОм}$, $R_2=0.2\text{кОм}$, $C=20\text{ пФ}$, $E=20\text{ В}$ (см. табл. 4.2).

Решение

1. Определяем начальные условия по второму закону коммутации

$$u_c(0) = \frac{ER_1}{R_1 + R_2} = 10\text{ В}.$$

2. Составляем операторную схему замещения (рисунок 4.64) при условии что ключ "к" в электрической цепи (см. рисунок 4.18) разомкнут

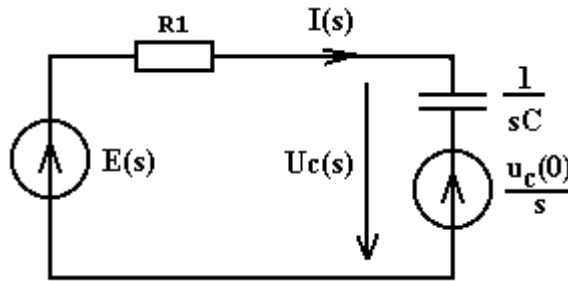


Рисунок 4.64

3. По закону Ома в операторной форме находим $I(s) = \frac{E(s) - \frac{u_c(0)}{s}}{Z(s)} = \frac{\frac{E}{s} - \frac{u_c(0)}{s}}{\left(R_1 + \frac{1}{sC}\right)}$

4. Преобразуем выражение для операторного тока $I(s)$ в форму, удобную для табличного преобразования по Лапласу (см. табл. 4.7 п.4).

$$I(s) = \frac{\frac{E}{s} - \frac{u_c(0)}{s}}{\left(R_1 + \frac{1}{sC}\right)} = \frac{E - u_c(0)}{\frac{sRC + 1}{C}} = \frac{E - u_c(0)}{R\left(s + \frac{1}{RC}\right)} = \frac{1}{200} \cdot \frac{10}{s + 25 \cdot 10^8}$$

5. По таблице преобразования Лапласа (см. табл. 4.7 п.4), используя при этом также свойство линейности преобразования Лапласа, находим переходный ток $i(t) = 0.05e^{-25 \cdot 10^8 t} \text{ А}.$

6. Переходное напряжение определим, используя второй закон Кирхгофа для цепи (рисунок 4.65)

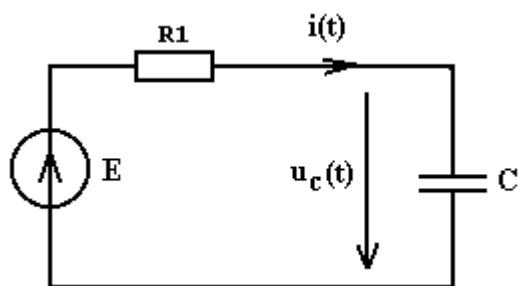


Рисунок 4.65

$$u_c(t) = u(t) = E - R_1 i(t) = 20 - 200 \cdot 0.05 \left(e^{-25 \cdot 10^8 t} \right) = 20 - 10 e^{-25 \cdot 10^8 t} \text{ В.}$$

7. Для построения графиков $i(t)$ и $u(t)$ выполним расчеты, и результаты представим в табл.4.9

Таблица 4.9

$t \cdot 10^{-10}, \text{ с}$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
t/τ	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$e^{-t/\tau}$	1	0.61	0.37	0.22	0.14	0.08	0.05	0.03	0.018	0.011	0.006
$i(t), \text{ мА}$	0.05	0.03	0.018	0.011	0.007	0.004	0.0025	0.002	0.001	0.0005	0.0003
$u(t), \text{ В}$	10	14	16	17.8	18.6	19.2	19.5	19.7	19.8	19.89	19.94

8. Строим графики $u(t)$ и $i(t)$

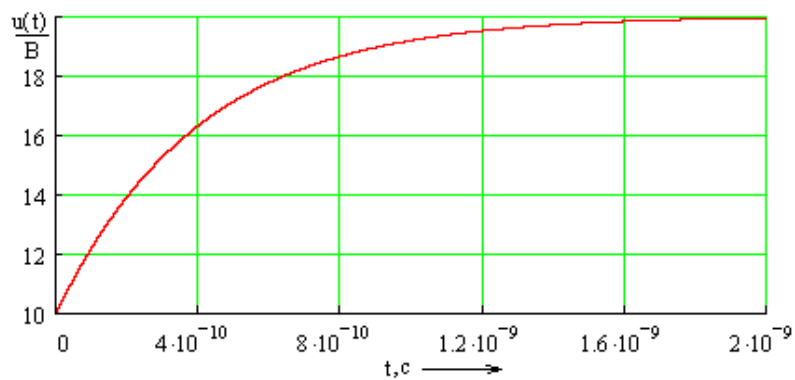


Рисунок 4.66

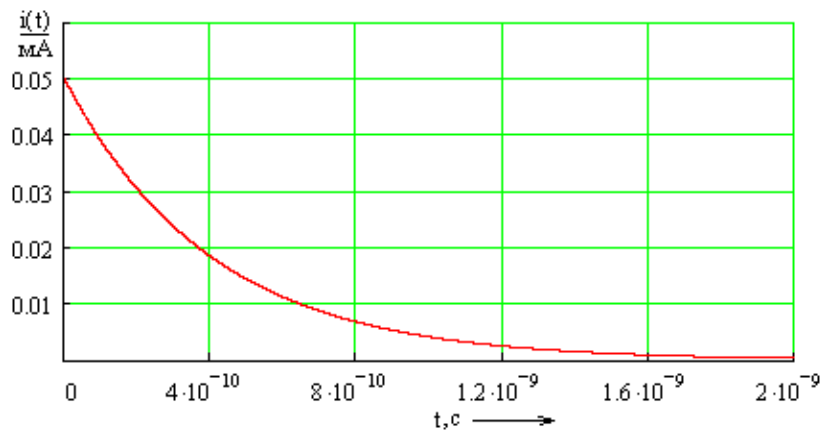


Рисунок 4.67

Задание 3. В электрической цепи (см. рисунок 4.32) рассчитать операторным методом и построить графики переходных токов, если $R_1=2\text{кОм}$, $R_2=2\text{кОм}$, $R_3=2\text{кОм}$, $L=30\text{ мГн}$, $E=20\text{ В}$ (см. табл. 4.3).

Решение

1. Определяем начальные условия по первому закону коммутации для цепи

(см. рисунок 4.32) $i_L(0) = \frac{E}{R_2 + R_1} = 0.005\text{ А}$.

2. Составляем операторную схему замещения (рисунок 4.68) при условии что ключ "к" в электрической цепи (см. рисунок 4.32) замкнут

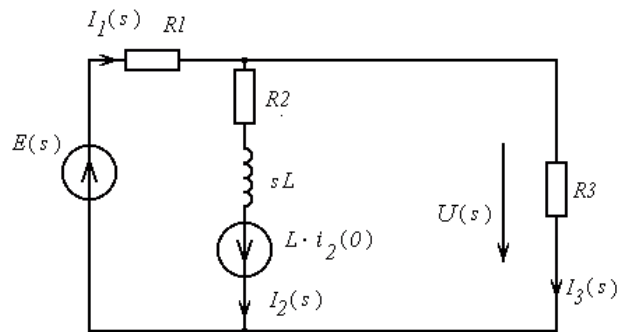


Рисунок 4.68

3. По методу двух узлов определим операторное напряжение

$$U(s) = \frac{E(s)Y_1(s) - Li_2(0)Y_2(s)}{Y_1(s) + Y_2(s) + Y_3(s)} = \frac{\frac{20}{s} \cdot 0.0005 - 30 \cdot 10^{-3} \cdot 0.005 \cdot \frac{1}{2000 + s30 \cdot 10^{-3}}}{0.0005 + \frac{1}{2000 + s30 \cdot 10^{-3}} + 0.0005} = \frac{s \cdot 15 \cdot 10^{-5} + 20}{3 \cdot 10^{-5} s(s + 10^5)}$$

Здесь $E(s) = \frac{20}{s}$, $Y_1(s) = \frac{1}{R_1} = 0.0005\text{ См}$, $Y_3(s) = \frac{1}{R_3} = 0.0005\text{ См}$,

$$Y_2(s) = \frac{1}{R_2 + sL} = \frac{1}{2000 + s30 \cdot 10^{-3}} \text{См.}$$

4. Преобразуем выражение для операторного напряжения $U(s)$ в форму, удобную для табличного преобразования по Лапласу (см. табл.4.7 п.4 и п.6).

$$U(s) = \frac{s \cdot 15 \cdot 10^{-5} + 20}{3 \cdot 10^{-5} s(s + 10^5)} = 5 \cdot \frac{1}{s + 10^5} + \frac{20 \cdot 10^5}{3} \cdot \frac{1}{s(s + 10^5)}$$

5. По таблице преобразования Лапласа (см. табл.4.7 п.4 и п.6), используя при этом также свойство линейности преобразования Лапласа, находим переходное напряжение

$$u(t) = 5e^{-10^5 t} + \frac{20 \cdot 10^5}{3} \cdot \frac{1}{10^5} \left(1 - e^{-10^5 t}\right) = 6.66 - 1.67e^{-10^5 t} \text{В.}$$

6. Определим переходные токи

$$i_3(t) = \frac{u(t)}{R_3} = 3.33 \cdot 10^{-3} - 0.85 \cdot 10^{-3} e^{-10^5 t} \text{А.}$$

$$i_1(t) = \frac{E - u(t)}{R_1} = 6.6 \cdot 10^{-3} + 0.85 \cdot 10^{-3} e^{-10^5 t} \text{А.}$$

$$i_2(t) = i_1(t) - i_3(t) = 3.3 \cdot 10^{-3} + 1.7 \cdot 10^{-3} e^{-10^5 t} \text{А.}$$

7. Строим графики переходных токов и напряжения

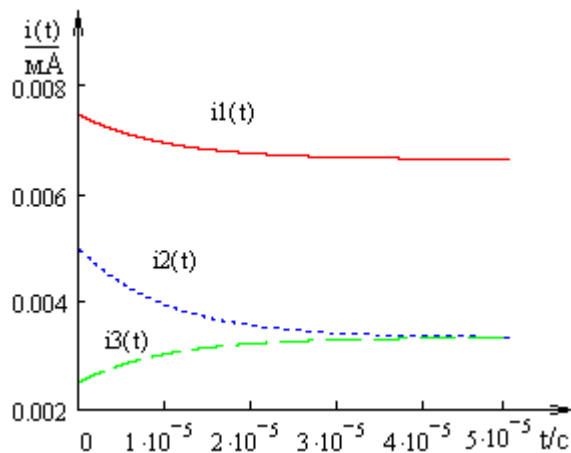


Рисунок 4.69

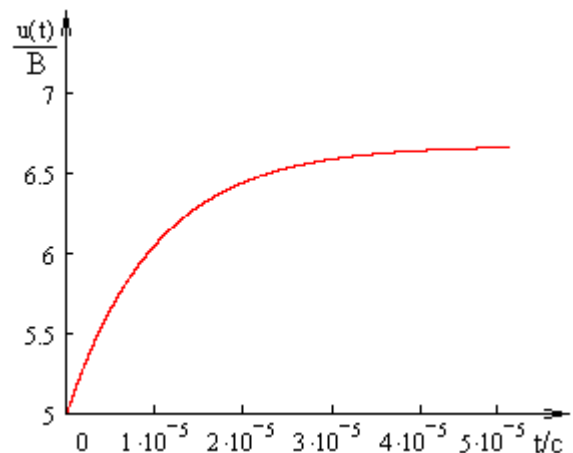


Рисунок 4.70

8. Расчет параметров четырехполюсников

Учебные вопросы:

1. Расчет А-параметров заданного четырехполюсника.
2. Расчет Y-параметров заданного четырехполюсника.
3. Расчет Z-параметров заданного четырехполюсника.

задание для подготовки к занятию

1. Изучить:

1. Никулин В.И. Теория электрических цепей. - М.: РИОР, 2013, с. 109-114.
2. Бакалов В.П., Воробиенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 241-260.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с.303-312.

2. Ответить на вопросы:

1. Что называют четырехполюсником?
2. Приведите примеры четырехполюсников техники связи.
3. Назовите основные формы систем уравнений четырехполюсника.
4. Запишите уравнение четырехполюсника в форме А - параметров.
5. Почему эти параметры называются первичными?
6. Каким образом можно определить параметры $\underline{A}_{11}$ и $\underline{A}_{21}$?
7. Каким образом можно определить параметры $\underline{A}_{12}$ и $\underline{A}_{22}$?
8. Изобразите схему каскадного соединения двух четырехполюсников и запишите матричное уравнение определения первичных параметров составного четырехполюсника.
9. Изобразите схему последовательного соединения двух четырехполюсников и запишите матричное уравнение определения первичных параметров составного четырехполюсника.

10. Изобразите схему параллельного соединения двух четырехполюсников и запишите матричное уравнение определения первичных параметров составного четырехполюсника.

11. Поясните алгоритм перемножения двух матриц.

12. Поясните алгоритм сложения двух матриц.

3. Проанализировать решение задач:

№ 11.1, 11.13 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1982. - с. 321-322, 324-325)

В ходе практического занятия выполнить задания:

задание №1. Два одинаковых четырехполюсника (табл.5.1) соединены каскадно. Определить А - параметры составного четырехполюсника.

задание №2. Два одинаковых четырехполюсника (табл.5.1) соединены параллельно. Определить Y- и А - параметры составного четырехполюсника.

задание №3. Два одинаковых четырехполюсника (табл.5.1) соединены последовательно. Определить Z-и А - параметры составного четырехполюсника.

задание №4. Два одинаковых четырехполюсника (табл.5.1) соединены последовательно - параллельно. Определить H-и А - параметры составного четырехполюсника.

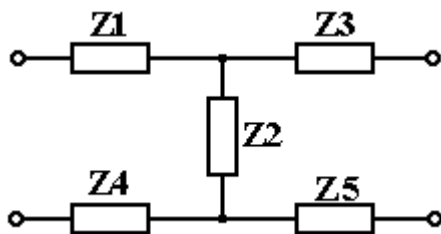


Рис. 5.1

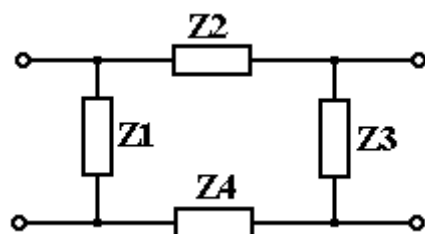


Рис. 5.2

Таблица 5.1

№ варианта	Рис.№	Z_1 , Ом	Z_2 , Ом	Z_3 , Ом	Z_4 , Ом	Z_5 , Ом	E_r , В	Z_r , Ом	Z_n , Ом
0	1	10	j10	5	0	0	10	10	20
1	2	10	j5	10	0	-	12	20	10
2	1	0	-j10	10	0	0	15	25	50
3	2	10	0	10	-j4	-	20	15	16
4	1	5	-j5	0	0	0	10	5	20
5	1	0	j4	0	j4	4	25	6	12
6	1	-j2	2	-j4	0	0	30	8	16
7	2	j5	5	10	j5	-	20	10	20
8	1	10	j10	-j10	0	0	10	20	10
9	1	5	-j10	5	j5	j5	20	10	30
10	2	10	-j20	10	20	-	25	20	40
11	2	10	j5	10	5	-	12	20	10
12	1	j3	-j10	10	0	0	15	25	50
13	2	10	0	8	-j4	-	20	15	16
14	1	8	-j5	5	0	0	10	5	20
15	1	0	j4	3	j4	4	25	6	12
16	1	-j2	4	-j4	0	0	30	8	16
17	2	j5	5	5	j5	-	20	10	20
18	1	7	j10	j10	0	0	10	20	10
19	1	0	-j10	5	j5	j5	20	10	30
20	2	10	-j20	10	0	-	25	20	40
21	2	10	j5	10	10	-	12	20	10
22	1	0	-j9	10	3	0	15	25	50
23	2	6	0	10	-j4	-	20	15	16
24	1	5	-j5	9	0	0	10	5	20
25	1	3	j4	0	j4	4	25	6	12
26	1	j2	9	-j4	0	0	30	8	16
27	2	j5	3	9	j5	-	20	10	20
28	1	10	10	j10	0	0	10	20	10
29	1	5	j10	5	-j5	j5	20	10	30
30	2	10	-j20	0	20	-	25	20	40

31	2	10	j5	12	0	-	12	20	10
32	1	3	-j10	10	0	0	15	25	50
33	2	4	0	10	-j4	-	20	15	16
34	1	6	-j5	0	0	0	10	5	20
35	1	0	j4	8	j4	4	25	6	12
36	1	-j2	2	j4	0	0	30	8	16
37	2	j5	15	10	j5	-	20	10	20
38	1	10	j20	j10	0	0	10	20	10
39	1	5	-j10	5	-j5	j5	20	10	30
40	2	20	j25	10	20	-	25	20	40
41	2	10	j15	j10	0	-	12	20	10
42	1	0	-j10	j20	0	0	15	25	50
43	2	10	0	j10	-j6	-	20	15	16
44	1	15	-j19	0	0	0	10	15	20
45	1	10	j4	0	J8	4	25	6	12
46	1	-j2	3	-j6	0	0	30	8	16
47	2	j5	5	10	j5	-	20	10	20

Пример выполнения заданий (вариант № 0)

Задание № 1. Два одинаковых четырехполюсника (таблица 5.1, вариант №0) соединены каскадно. Рассчитать А- параметры составного четырехполюсника.

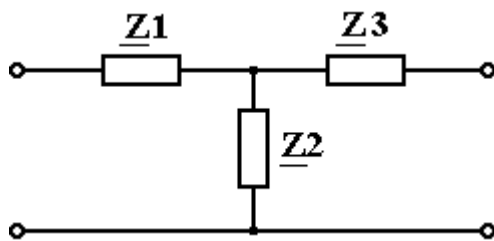


Рис.5.3

$$\underline{Z}_1 = 10 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_2 = j10 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_3 = 5 \text{ Ом}.$$

Решение

1. Система уравнений четырехполюсника в форме А:

$$\underline{U}_1 = \underline{A}_{11}\underline{U}_2 + \underline{A}_{12}\underline{I}_2$$

$$\underline{I}_1 = \underline{A}_{21}\underline{U}_2 + \underline{A}_{22}\underline{I}_2$$

2. Расчет параметров при $\underline{I}_2 = 0$ (режим холостого хода относительно выходных зажимов).

2.1. Схема четырехполюсника в режиме холостого хода (рис.5.4)

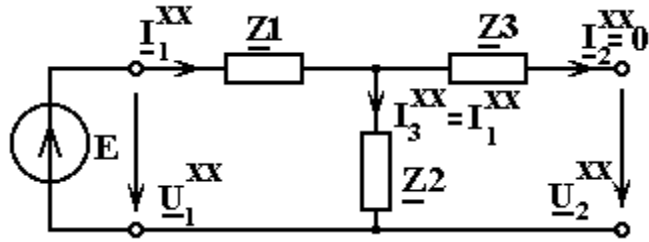


Рис.5.4

2.2. Система уравнений для режима холостого хода

$$\underline{U}_1^{xx} = \underline{A}_{11} \underline{U}_2^{xx}$$

$$\underline{I}_1^{xx} = \underline{A}_{21} \underline{U}_2^{xx}$$

2.3. Токи и напряжения в схеме (рис.5.4)

$$\underline{U}_1^{xx} = \underline{I}_1^{xx} (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)$$

$$\underline{U}_2^{xx} = \underline{I}_1^{xx} \underline{Z}_2$$

2.4. Первичные параметры $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{21}$

$$\underline{A}_{11} = \frac{\underline{U}_1^{xx}}{\underline{U}_2^{xx}} = \frac{\underline{I}_1^{xx} (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}{\underline{I}_1^{xx} \underline{Z}_2} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} = 1 + \frac{10}{j10} = 1 - j2$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{\underline{I}_1^{xx}}{\underline{U}_2^{xx}} = \frac{\underline{I}_1^{xx}}{\underline{I}_1^{xx} \underline{Z}_2} = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{j10} = -j0.1 \text{ См.}$$

3. Расчет первичных параметров при $\underline{U}_2 = 0$ (режим короткого замыкания).

3.1. Схема четырехполюсника в режиме короткого замыкания (рис.5.5)

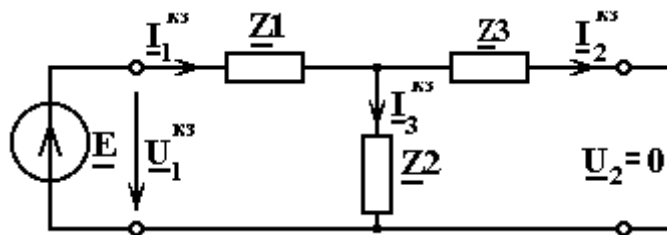


Рис.5.5

3.2. Система уравнений для режима короткого замыкания

$$\underline{U}_1^{кз} = \underline{A}_{12} \underline{I}_2^{кз}$$

$$\underline{I}_1^{кз} = \underline{A}_{22} \underline{I}_2^{кз}$$

3.3. Токи и напряжения в четырехполюснике при коротком замыкании

$$\underline{U}_1^{кз} = \underline{I}_1^{кз} (\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}) = \underline{I}_1^{кз} \cdot \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}$$

$$\underline{I}_2^{K3} = \underline{I}_1^{K3} \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}$$

3.4. Первичные параметры $\underline{A}_{12}$, $\underline{A}_{22}$

$$\begin{aligned} \underline{A}_{12} &= \frac{\underline{U}_1^{K3}}{\underline{I}_2^{K3}} = \frac{\underline{I}_1^{K3} (\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3) (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3) \cdot \underline{I}_1^{K3} \cdot \underline{Z}_2} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} = \\ &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} = 10 + 5 + \frac{10 \cdot 5}{j10} = 15 - j5 \text{ Ом}, \end{aligned}$$

$$\underline{A}_{22} = \frac{\underline{I}_1^{K3}}{\underline{I}_2^{K3}} = \frac{\underline{I}_1^{K3} (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)}{\underline{I}_1^{K3} \cdot \underline{Z}_2} = 1 + \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} = 1 + \frac{5}{j10} = 1 - j0,5.$$

4. Проверка:

$$\begin{aligned} \underline{A}_{11} \underline{A}_{22} - \underline{A}_{21} \cdot \underline{A}_{12} &= (1 - j1)(1 - j0,5) - (-j0,1) \cdot (15 - j5) = \\ &= 1 - j1 - j0,5 - 1,5 + j1,5 + 0,5 = 1 \end{aligned}$$

5. Расчет А - параметров составного четырехполюсника.

5.1. Схема составного четырехполюсника (рис.5.6)

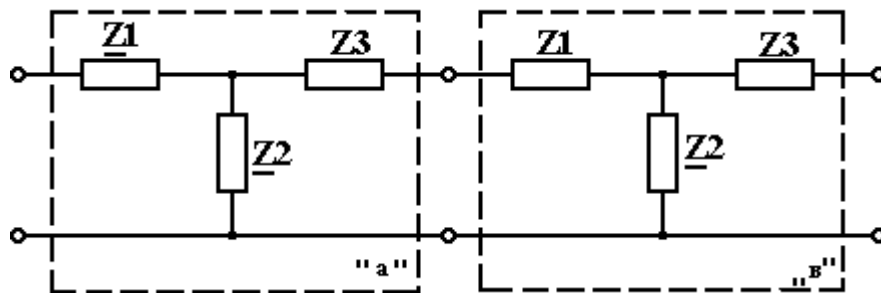


Рис.5.6

5.2. Матрица составного четырехполюсника $[\underline{A}] = [\underline{A}_a] \cdot [\underline{A}_b]$

Здесь $[\underline{A}_a] = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11a} & \underline{A}_{12a} \\ \underline{A}_{21a} & \underline{A}_{22a} \end{bmatrix}$ – матрица А параметров четырехполюсника «а»

$$[\underline{A}_b] = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11b} & \underline{A}_{12b} \\ \underline{A}_{21b} & \underline{A}_{22b} \end{bmatrix} \text{ – матрица А параметров четырехполюсника «в»}$$

По условию задачи $[\underline{A}_a] = [\underline{A}_b]$

5.3. Элементы матрицы А составного четырехполюсника

$$\underline{A}_{11} = \underline{A}_{11a} \cdot \underline{A}_{11b} + \underline{A}_{12a} \cdot \underline{A}_{21b} = (1 - j1)(1 - j1) + (15 - j5)(-j0,1) = -0,5 - j3,5,$$

$$\underline{A}_{12} = \underline{A}_{11a} \cdot \underline{A}_{12b} + \underline{A}_{12a} \cdot \underline{A}_{22b} = (1 - j1)(15 - j5) + (15 - j5) \cdot (1 - j0,5) = 22,5 - j32,5 \text{ Ом},$$

$$\underline{A}_{21} = \underline{A}_{21a} \cdot \underline{A}_{11b} + \underline{A}_{22a} \cdot \underline{A}_{21b} = -j0,1 \cdot (1 - j1) + (1 - j0,5)(-j0,1) = -0,5 - j0,2 \text{ См},$$

$$\underline{A}_{22} = \underline{A}_{21a} \cdot \underline{A}_{21b} + \underline{A}_{22a} \cdot \underline{A}_{22b} = -j0.1(15 - j5) + (1 - j0.5)(1 - j0.5) = 0.25 - j0.5.$$

5.4.

$$\text{Проверка: } \underline{A}_{11} \cdot \underline{A}_{22} - \underline{A}_{12} \cdot \underline{A}_{21} = (-0.5 - j3.5)(0.25 - j2.5) - (22.5 - j32.5)(-0.15 - j0.2) = 1$$

Задание № 2. Два одинаковых четырехполюсника (рис.5.3) соединены параллельно. Рассчитать $\underline{Y}$ -, $\underline{A}$ -параметры составного четырехполюсника, если $\underline{Z}_1 = 10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2 = j10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_3 = 5 \text{ Ом}$ (таблица 5.1, вариант № 0).

Решение

1. Система уравнений четырехполюсника в форме $\underline{Y}$.

$$\underline{I}_1 = \underline{Y}_{11} \underline{U}_1 + \underline{Y}_{12} \underline{U}_2$$

$$\underline{I}_2 = \underline{Y}_{21} \underline{U}_1 + \underline{Y}_{22} \underline{U}_2$$

2. Расчет первичных параметров при $\underline{U}_2 = 0$ (короткое замыкание выходных зажимов).

2.1. Схема четырехполюсника (рис.5.7)

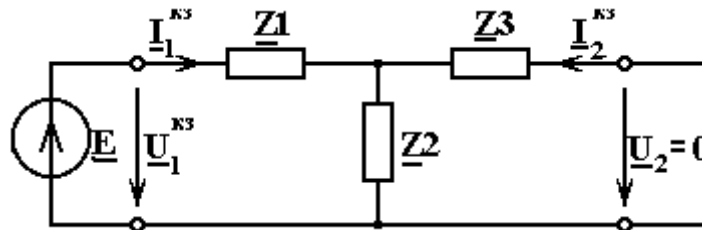


Рис.5.7

2.2. Система уравнений при коротком замыкании выходных зажимов

$$\underline{I}_1^{K3} = \underline{Y}_{11} \underline{U}_1^{K3}$$

$$\underline{I}_2^{K3} = \underline{Y}_{21} \underline{U}_1^{K3}$$

2.3. Токи и напряжения в схеме

$$\underline{U}_1^{K3} = \underline{I}_1^{K3} \cdot \left(\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} \right) = \underline{I}_1^{K3} \cdot \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3},$$

$$-\underline{I}_2^{K3} = \underline{I}_1^{K3} \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.$$

2.4. Первичные параметры $\underline{Y}_{11}, \underline{Y}_{21}$

$$\begin{aligned} \underline{Y}_{11} &= \frac{\underline{I}_1^{K3}}{\underline{U}_1^{K3}} = \frac{\underline{I}_1^{K3} (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)}{\underline{I}_1^{K3} (\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3)} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3} = \\ &= \frac{j10 + 5}{10 \cdot j10 + 10 \cdot 5 + j10 \cdot 5} = 0.07 - j0.01 \text{ См}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{Y}_{21} &= \frac{\underline{I}_2^{K3}}{\underline{U}_1^{K3}} = \frac{-\underline{I}_1^{K3} \cdot \underline{Z}_2 \cdot (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3)}{(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) \underline{I}_1^{K3} \cdot (\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3)} = \\ &= \frac{-\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3} = \frac{-j10}{10 \cdot j10 + 10 \cdot 5 + j10 \cdot 5} = -0.06 - j0.02 \text{ См.}\end{aligned}$$

3. Расчет первичных параметров при $\underline{U}_1 = 0$ (короткое замыкание входных зажимов).

3.1. Схема четырехполюсника при коротком замыкании входных зажимов (рис.5.8)

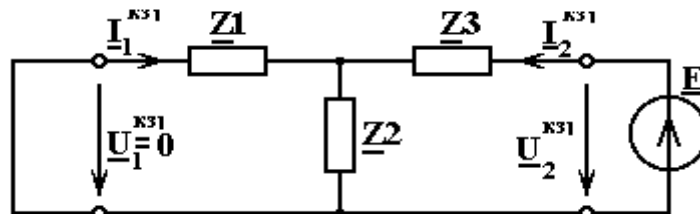


Рис.5.8

3.2. Система уравнений четырехполюсника при коротком замыкании входных зажимов

$$\begin{aligned}\underline{I}_{11}^{K3} &= \underline{Y}_{12} \underline{U}_2^{K31} \\ \underline{I}_2^{K31} &= \underline{Y}_{22} \underline{U}_2^{K31}\end{aligned}$$

3.3. Токи и напряжения в схеме

$$\begin{aligned}\underline{U}_2^{K31} &= \underline{I}_2^{K31} \left(\underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} \right) = \underline{I}_2^{K31} \cdot \frac{\underline{Z}_3 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}, \\ -\underline{I}_1^{K31} &= \underline{I}_2^{K31} \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.\end{aligned}$$

3.4. Первичные параметры $\underline{Y}_{12}, \underline{Y}_{22}$

$$\begin{aligned}\underline{Y}_{12} &= \frac{\underline{I}_1^{K31}}{\underline{U}_2^{K31}} = \frac{-\underline{I}_2^{K31} \cdot \underline{Z}_2 \cdot (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}{(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) \cdot \underline{I}_2^{K31} (\underline{Z}_3 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2)} = \\ &= \frac{-\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2} = \frac{-j10}{5 \cdot 10 + 5 \cdot j10 + 10 \cdot j10} = -0.06 - j0.02 \text{ См,} \\ \underline{Y}_{22} &= \frac{\underline{I}_2^{K31}}{\underline{U}_2^{K31}} = \frac{\underline{I}_2^{K31} (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}{\underline{I}_2^{K31} (\underline{Z}_3 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2)} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}{\underline{Z}_3 \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_2} = \\ &= \frac{10 + j10}{5 \cdot 10 + 5 \cdot j10 + 10 \cdot j10} = 0.08 - j0.04 \text{ См.}\end{aligned}$$

4. Проверка: $\underline{Y}_{12} - \underline{Y}_{21} = -0.06 - j0.02 + 0.06 + j0.02 = 0$

5. Расчет А - параметров составного четырехполюсника.

5.1. Схема составного четырехполюсника (рис.5.9)

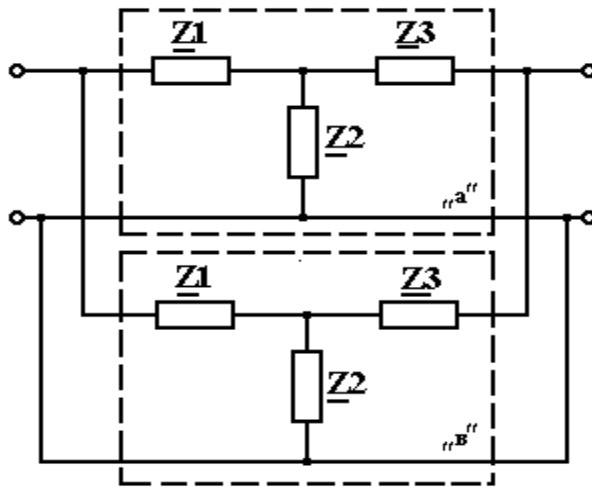


Рис. 5.9

5.2. Матрица Y - параметров составного четырехполюсника $[Y] = [Y_a] + [Y_b]$

Здесь $[Y_a]$ – матрица Y -параметров четырехполюсника «а»,

$[Y_b]$ – матрица Y -параметров четырехполюсника «в»

По условию задачи $[Y_a] = [Y_b]$

5.3. Элементы матрицы составного четырехполюсника

$$\underline{Y}_{11} = \underline{Y}_{11a} + \underline{Y}_{11b} = 2\underline{Y}_{11a} = 2 \cdot (0.07 - j0.01) = 0.14 - j0.02 \text{ См},$$

$$\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{12a} + \underline{Y}_{12b} = 2\underline{Y}_{12a} = 2 \cdot (0.06 - j0.02) = -0.12 - j0.04 \text{ См},$$

$$\underline{Y}_{21} = \underline{Y}_{21a} + \underline{Y}_{21b} = 2\underline{Y}_{21a} = 2(-0.06 - j0.02) = -0.12 - j0.04 \text{ См},$$

$$\underline{Y}_{22} = \underline{Y}_{22a} + \underline{Y}_{22b} = 2\underline{Y}_{22a} = 2(0.08 - j0.04) = 0.16 - j0.08 \text{ См}.$$

5.4. Матрица A - параметров составного четырехполюсника может быть определена через Y параметры (табл.5.2) [3]

$$[A] = \begin{bmatrix} \frac{-\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} & \frac{-1}{\underline{Y}_{21}} \\ -\frac{|\underline{Y}|}{\underline{Y}_{21}} & \frac{-\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}} \end{bmatrix}$$

Таблица 5.2

Определяемые параметры	В зависимости от параметров				
	$\underline{Y}$	$\underline{Z}$	$\underline{H}$	$\underline{F}$	$\underline{A}$

$\underline{\mathbf{Y}}$	$\frac{\underline{Y}_{11}\underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{21}\underline{Y}_{22}}$	$\frac{\frac{\underline{Z}_{22}-\underline{Z}_{12}}{ \underline{Z} }}{\frac{-\underline{Z}_{21}}{ \underline{Z} }}$	$\frac{\frac{1}{\underline{H}_{11}}-\frac{\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{11}}}{\frac{\underline{H}_{21}}{\underline{H}_{11}}-\frac{ \underline{H} }{\underline{H}_{11}}}$	$\frac{\frac{ \underline{F} }{\underline{F}_{22}}-\frac{\underline{F}_{12}}{\underline{F}_{22}}}{\frac{-\underline{F}_{21}}{\underline{F}_{22}}-\frac{1}{\underline{F}_{22}}}$	$\frac{\frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{12}}-\frac{ \underline{A} }{\underline{A}_{12}}}{\frac{-1}{\underline{A}_{12}}-\frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{12}}}$
$\underline{\mathbf{Z}}$	$\frac{\frac{\underline{Y}_{22}-\underline{Y}_{12}}{ \underline{Y} }}{\frac{-\underline{Y}_{21}}{ \underline{Y} }}$	$\frac{\underline{Z}_{11}\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{21}\underline{Z}_{22}}$	$\frac{\frac{ \underline{H} }{\underline{H}_{22}}-\frac{\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{22}}}{\frac{-\underline{H}_{21}}{\underline{H}_{22}}-\frac{1}{\underline{H}_{22}}}$	$\frac{\frac{1}{\underline{F}_{11}}-\frac{\underline{F}_{12}}{\underline{F}_{11}}}{\frac{\underline{F}_{21}}{\underline{F}_{11}}-\frac{ \underline{F} }{\underline{F}_{11}}}$	$\frac{\frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{21}}-\frac{ \underline{A} }{\underline{A}_{21}}}{\frac{1}{\underline{A}_{21}}-\frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{21}}}$
$\underline{\mathbf{H}}$	$\frac{\frac{1}{\underline{Y}_{11}}-\frac{\underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{11}}}{\frac{\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{11}}-\frac{ \underline{Y} }{\underline{Y}_{11}}}$	$\frac{\frac{ \underline{Z} }{\underline{Z}_{22}}-\frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{22}}}{\frac{-\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{22}}-\frac{1}{\underline{Z}_{22}}}$	$\frac{\underline{H}_{11}\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{21}\underline{H}_{22}}$	$\frac{\frac{\underline{F}_{22}}{ \underline{F} }-\frac{\underline{F}_{12}}{ \underline{F} }}{\frac{-\underline{F}_{21}}{ \underline{F} }-\frac{\underline{F}_{11}}{ \underline{F} }}$	$\frac{\frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22}}-\frac{ \underline{A} }{\underline{A}_{22}}}{\frac{-1}{\underline{A}_{22}}-\frac{\underline{A}_{21}}{\underline{A}_{22}}}$
$\underline{\mathbf{F}}$	$\frac{\frac{ \underline{Y} }{\underline{Y}_{22}}-\frac{\underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{22}}}{\frac{-\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{22}}-\frac{1}{\underline{Y}_{22}}}$	$\frac{\frac{1}{\underline{Z}_{11}}-\frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11}}}{\frac{\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{11}}-\frac{ \underline{Z} }{\underline{Z}_{11}}}$	$\frac{\frac{\underline{H}_{22}}{ \underline{H} }-\frac{\underline{H}_{12}}{ \underline{H} }}{\frac{-\underline{H}_{22}}{ \underline{H} }-\frac{\underline{H}_{11}}{ \underline{H} }}$	$\frac{\underline{F}_{11}\underline{F}_{12}}{\underline{F}_{21}\underline{F}_{22}}$	$\frac{\frac{\underline{A}_{21}}{\underline{A}_{11}}-\frac{ \underline{A} }{\underline{A}_{11}}}{\frac{1}{\underline{A}_{11}}-\frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11}}}$
$\underline{\mathbf{A}}$	$\frac{\frac{-\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}}-\frac{-1}{\underline{Y}_{21}}}{\frac{- \underline{Y} }{\underline{Y}_{21}}-\frac{-\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}}}$	$\frac{\frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{21}}-\frac{ \underline{Z} }{\underline{Z}_{21}}}{\frac{1}{\underline{Z}_{21}}-\frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21}}}$	$\frac{\frac{- \underline{H} }{\underline{H}_{21}}-\frac{-\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{21}}}{\frac{-\underline{H}_{22}}{\underline{H}_{21}}-\frac{-1}{\underline{H}_{21}}}$	$\frac{\frac{1}{\underline{F}_{21}}-\frac{\underline{F}_{22}}{\underline{F}_{21}}}{\frac{\underline{F}_{11}}{\underline{F}_{21}}-\frac{ \underline{F} }{\underline{F}_{21}}}$	$\frac{\underline{A}_{11}\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21}\underline{A}_{22}}$

В таблице $|\underline{\mathbf{Y}}| = \underline{Y}_{11}\underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12}\underline{Y}_{21}$, $|\underline{\mathbf{Z}}| = \underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}\underline{Z}_{21}$, $|\underline{\mathbf{H}}| = \underline{H}_{11}\underline{H}_{22} - \underline{H}_{12}\underline{H}_{21}$,

$$|\underline{\mathbf{F}}| = \underline{F}_{11}\underline{F}_{22} - \underline{F}_{12}\underline{F}_{21}, \quad |\underline{\mathbf{A}}| = \underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{12}\underline{A}_{21}$$

5.5. Элементы матрицы $[\underline{\mathbf{A}}]$ составного четырехполюсника

$$\underline{A}_{11} = -\frac{\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} = -\frac{0.16 - j0.08}{-0.2 - j0.04} = 1 - j1,$$

$$\underline{A}_{12} = -\frac{1}{\underline{Y}_{21}} = \frac{-1}{-0.12 - j0.04} = 7.5 - j2.5 \text{ Ом},$$

$$\begin{aligned} \underline{A}_{21} &= -\frac{\underline{Y}_{11}\underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12}\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{21}} = \\ &= -\frac{(0.14 - j0.02)(0.16 - j0.08) - (0.12 - j0.04)(0.12 - j0.04)}{-0.12 - j0.04} = -j0.2 \text{ См}, \end{aligned}$$

$$\underline{A}_{22} = -\frac{\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}} = -\frac{0.14 - j0.02}{-0.12 - j0.04} = 1 - j0.5.$$

5.6. Проверка: $\underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{21} \cdot \underline{A}_{12} = (1 - j1)(1 - j0.5) - (-j0.2)(7.5 - j2.5) = 1$

Задание № 3. Два одинаковых четырехполюсника (рис.5.3) (таблица 5.1. вариант № 0) соединены последовательно. Рассчитать $\underline{Z}$ – и $\underline{A}$ -параметры составного четырехполюсника.

Решение

1. Система уравнений четырехполюсника в форме $\underline{Z}$

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_{11}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{12}\underline{I}_2$$

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_{21}\underline{I}_1 + \underline{Z}_{22}\underline{I}_2$$

2. Расчет первичных параметров при $\underline{I}_1 = 0$ (режим холостого хода относительно входных зажимов).

2.1. Схема четырехполюсника (рис.5.10)

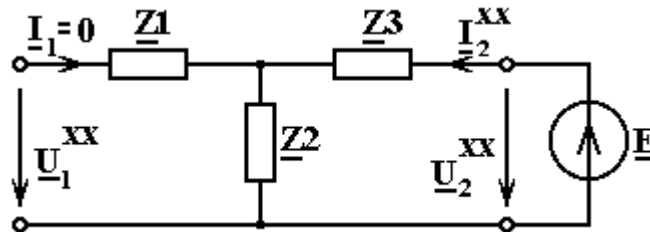


Рис.5.10

2.2. Система уравнений для рассматриваемого режима

$$\underline{U}_1^{xx} = \underline{Z}_{12}\underline{I}_2^{xx}$$

$$\underline{U}_2^{xx} = \underline{Z}_{22}\underline{I}_2^{xx}$$

2.3. Токи и напряжения в схеме (рис. 5.10)

$$\underline{U}_2^{xx} = \underline{I}_2^{xx}(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2)$$

$$\underline{U}_2^{xx} = \underline{Z}_2 \underline{I}_2^{xx}$$

2.4. Первичные параметры $\underline{Z}_{12}, \underline{Z}_{22}$

$$\underline{Z}_{12} = \frac{\underline{U}_1^{xx}}{\underline{I}_2^{xx}} = \frac{\underline{I}_2^{xx} \underline{Z}_2}{\underline{I}_2^{xx}} = \underline{Z}_2 = j10 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{22} = \frac{\underline{U}_2^{xx}}{\underline{I}_2^{xx}} = \frac{\underline{I}_2^{xx} (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2)}{\underline{I}_2^{xx}} = \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 = 5 + j10 \text{ Ом}.$$

3. Расчет первичных параметров при $\underline{I}_2 = 0$ (режим холостого хода относительно выходных зажимов).

3.1. Расчётная схема четырехполюсника (рис.5.11)

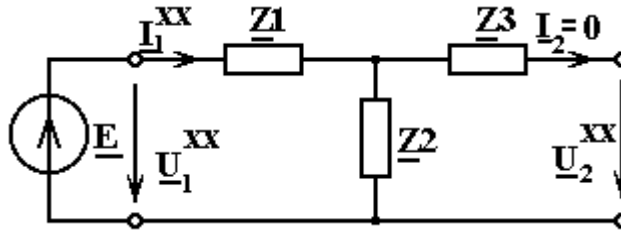


Рис. 5.11

3.2. Система уравнений четырехполюсника для рассматриваемого режима

$$\underline{U}_1^{xx} = \underline{Z}_{11} \underline{I}_1^{xx}$$

$$\underline{U}_2^{xx} = \underline{Z}_{21} \underline{I}_1^{xx}$$

3.3. Система уравнений четырехполюсника для рассматриваемого режима

$$\underline{U}_1^{xx} = (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) \underline{I}_1^{xx}$$

$$\underline{U}_2^{xx} = \underline{I}_1^{xx} \cdot \underline{Z}_2$$

3.4. Первичные параметры $\underline{Z}_{11}$ и $\underline{Z}_{21}$:

$$\underline{Z}_{11} = \frac{\underline{U}_1^{xx}}{\underline{I}_1^{xx}} = \frac{\underline{I}_1^{xx} (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}{\underline{I}_1^{xx}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = 10 + j10 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{21} = \frac{\underline{U}_2^{xx}}{\underline{I}_1^{xx}} = \frac{\underline{I}_1^{xx} \underline{Z}_2}{\underline{I}_1^{xx}} = \underline{Z}_2 = j10 \text{ Ом}.$$

4. Проверка: $\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{21} = j10 - j10 = 0$

5. Расчет А-параметров составного четырехполюсника.

5.1. Схема составного четырехполюсника (соединение последовательное с учетом выполнения регулярности соединений) (рис.5.12).

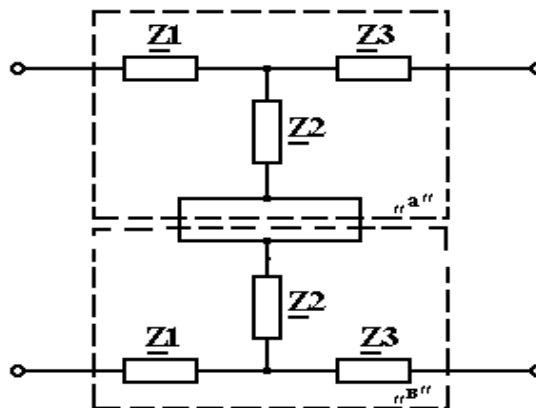


Рис. 5.12

5.2. Матрица $\underline{Z}$ -параметров составного четырехполюсника $[\underline{Z}] = [\underline{Z}_a] + [\underline{Z}_b]$

Здесь $[\underline{Z}_a]$ – матрица Z-параметров четырехполюсника «а»,

$[\underline{Z}_b]$ – матрица Z-параметров четырехполюсника «в».

По условию задачи $[Z_a] = [Z_b]$.

5.3. Элементы матрицы составного четырехполюсника

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_{11a} + \underline{Z}_{11b} = 2\underline{Z}_{11a} = 2 \cdot (10 + j10) = 20 + j20 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{12a} + \underline{Z}_{12b} = 2\underline{Z}_{12a} = 2(j10) = j20 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{21} = \underline{Z}_{21a} + \underline{Z}_{21b} = 2(j10) = j20 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_{22a} + \underline{Z}_{22b} = 2\underline{Z}_{22a} = 2(5 + j10) = 10 + j20 \text{ Ом}.$$

5.4. Матрица А-параметров составного четырехполюсника может быть определена через Z-параметры (табл.5.2) [3].

$$[\underline{A}] = \begin{bmatrix} \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{21}} & \frac{|\underline{Z}|}{\underline{Z}_{21}} \\ 1 & \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21}} \end{bmatrix}$$

5.5. Элементы матрицы $[\underline{A}]$ составного четырехполюсника

$$\underline{A}_{11} = \frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{21}} = \frac{20 + j20}{j20} = 1 - j1,$$

$$\underline{A}_{12} = \frac{|\underline{Z}|}{\underline{Z}_{21}} = \frac{\underline{Z}_{11} \cdot \underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12} \cdot \underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{21}} = \frac{(20 + j20) \cdot (10 + j20) - j20 \cdot j20}{j20} = 30 - j10 \text{ Ом},$$

$$\underline{A}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_{21}} = \frac{1}{j20} = -j0.05 \text{ См},$$

$$\underline{A}_{22} = \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21}} = \frac{10 + j20}{j20} = 1 - j0.5.$$

$$5.6. \text{Проверка: } \underline{A}_{11} \cdot \underline{A}_{22} - \underline{A}_{21} \cdot \underline{A}_{12} = (1 - j1) \cdot (1 - j0.5) - (j0.05) \cdot (30 - j10) = 1$$

Задание № 4. Два одинаковых четырехполюсника (рис.5.3) (таблица 5.1 вариант № 0) соединены последовательно-параллельно. Рассчитать Н- и А -параметры составного четырехполюсника.

Решение

1. Система уравнений четырехполюсника в форме Н:

$$\underline{U}_1 = \underline{H}_{11}\underline{I}_1 + \underline{H}_{12}\underline{U}_2$$

$$\underline{I}_2 = \underline{H}_{21}\underline{I}_1 + \underline{H}_{22}\underline{U}_2$$

2. Расчет Н-параметров при $\underline{I}_1 = 0$ (режим холостого хода относительно входных зажимов).

2.1. Расчётная схема четырехполюсника (рис.5.13)

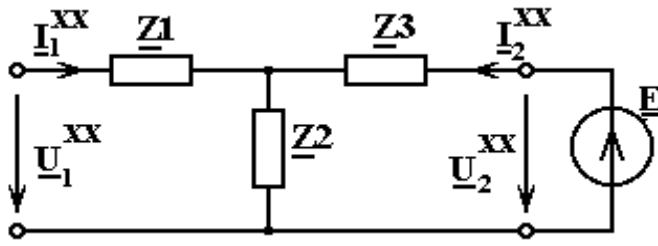


Рис. 5.13

2.2. Система уравнений четырехполюсника для рассматриваемого режима

$$\begin{aligned}\underline{U}_1^{xx} &= \underline{H}_{12} \cdot \underline{U}_2^{xx} \\ \underline{I}_2^{xx} &= \underline{H}_{22} \underline{U}_2^{xx}\end{aligned}$$

2.3. Напряжения в схеме (рис.5.13) $\underline{U}_2^{xx} = \underline{I}_2^{xx} (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2)$, $\underline{U}_1^{xx} = \underline{I}_2^{xx} \cdot \underline{Z}_2$.

2.4. Первичные параметры $\underline{H}_{12}, \underline{H}_{22}$

$$\begin{aligned}\underline{H}_{12} &= \frac{\underline{U}_1^{xx}}{\underline{U}_2^{xx}} = \frac{\underline{I}_2^{xx} \cdot \underline{Z}_2}{\underline{I}_2^{xx} (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2)} = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2} = \frac{j10}{5 + j10} = 0.8 + j0.4, \\ \underline{H}_{22} &= \frac{\underline{I}_2^{xx}}{\underline{U}_2^{xx}} = \frac{\underline{I}_2^{xx}}{\underline{I}_2^{xx} (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2)} = \frac{1}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2} = \frac{1}{5 + j10} = 0.04 - j0.08 \text{ См.}\end{aligned}$$

3. Расчет H параметров при $\underline{U}_2 = 0$ (режим короткого замыкания относительно выходных зажимов).

3.1. Расчётная схема четырехполюсника (рис.5.14)

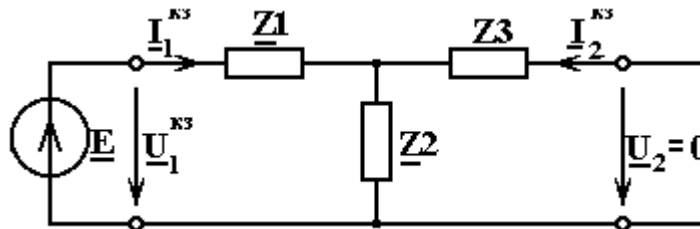


Рис. 5.14

3.2. Система уравнений четырехполюсника для рассматриваемого режима

$$\begin{aligned}\underline{U}_1^{k3} &= \underline{H}_{11} \underline{I}_1^{k3} \\ \underline{I}_2^{k3} &= \underline{H}_{21} \underline{I}_1^{k3}\end{aligned}$$

3.3. Токи и напряжения в схеме с учетом выбранных условных положительных направлений

$$\begin{aligned}\underline{U}_1^{k3} &= \underline{I}_1^{k3} \left(\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} \right) = \underline{I}_1^{k3} \left(\frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} \right), \\ -\underline{I}_2^{k3} &= \underline{I}_1^{k3} \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}.\end{aligned}$$

3.4. Первичные параметры $\underline{H}_{11}, \underline{H}_{21}$

$$\underline{H}_{11} = \frac{\underline{U}_1^{K3}}{\underline{I}_1^{K3}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{10 \cdot j10 + 10 \cdot 5 + j10 \cdot 5}{j10 + 5} = 14 + j2 \text{ Ом},$$

$$\underline{H}_{21} = \frac{\underline{I}_2^{K3}}{\underline{I}_1^{K3}} = -\frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = -\frac{j10}{j10 + 5} = -0.8 - j0.4.$$

4. Проверка: $\underline{H}_{12} + \underline{H}_{21} = 0.8 + j0.4 - 0.8 - j0.4 = 0$

5. Расчет А-параметров составного четырехполюсника.

5.1. Схема составного четырехполюсника (соединение последовательно-параллельное с учетом выполнения регулярности соединений) (рис.5.15).

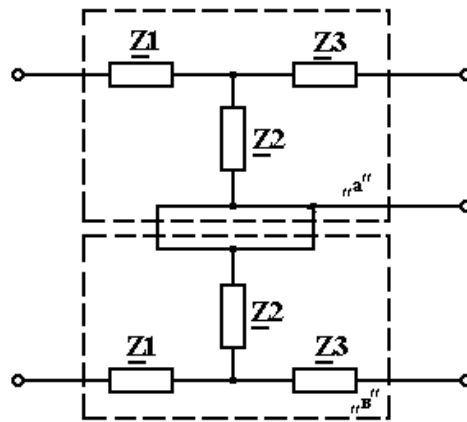


Рис.5.15

5.2. Матрица Н-параметров составного четырехполюсника $[\underline{H}] = [\underline{H}_a] + [\underline{H}_b]$

Здесь $[\underline{H}_a]$ - матрица Н-параметров четырехполюсника «а»,

$[\underline{H}_b]$ - матрица Н-параметров четырехполюсника «в».

По условию задачи $[\underline{H}_a] = [\underline{H}_b]$.

5.3. Элементы матрицы $[\underline{H}]$ составного четырехполюсника

$$\underline{H}_{11} = \underline{H}_{11a} + \underline{H}_{11b} = 2 \cdot \underline{H}_{11a} = 2(14 + j2) = 28 + j4 \text{ Ом},$$

$$\underline{H}_{12} = \underline{H}_{12a} + \underline{H}_{12b} = 2 \cdot \underline{H}_{12a} = 2(0.8 + j0.4) = 1.6 + j0.8,$$

$$\underline{H}_{21} = \underline{H}_{21a} + \underline{H}_{21b} = 2 \cdot \underline{H}_{21a} = 2(-0.8 - j0.4) = -1.6 - j0.8,$$

$$\underline{H}_{22} = \underline{H}_{22a} + \underline{H}_{22b} = 2 \cdot \underline{H}_{22a} = 2(0.04 - j0.08) = 0.08 - j0.16 \text{ См}.$$

5.4. Матрица $\underline{A}$ -параметров составного четырехполюсника может быть определена по известным $\underline{H}$ -параметрам (табл.5.2) [3]

$$[\underline{A}] = \begin{bmatrix} \frac{-[\underline{H}]}{\underline{H}_{21}} & \frac{-\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{21}} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{21} \\ \frac{-\underline{H}_{22}}{\underline{H}_{21}} & \frac{-1}{\underline{H}_{21}} \end{bmatrix}$$

5.5. Элементы матрицы $[A]$ - составного четырехполюсника

$$\underline{A}_{11} = -\frac{|\underline{H}|}{\underline{H}_{21}} = -\frac{\underline{H}_{11}\underline{H}_{22} - \underline{H}_{21}\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{21}} = -\frac{(28 + j4)(0.08 - j0.16) - (-1.6 - j0.8)(1.6 + j0.8)}{-1.6 - j0.8} = 2 - j2,$$

$$\underline{A}_{12} = -\frac{\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{21}} = -\frac{28 + j4}{-1.6 - j0.8} = 15 - j5 \text{ Ом},$$

$$\underline{A}_{21} = -\frac{\underline{H}_{22}}{\underline{H}_{21}} = -\frac{0.08 - j0.16}{-1.6 - j0.8} = -j0.1 \text{ См},$$

$$\underline{A}_{22} = -\frac{1}{\underline{H}_{21}} = -\frac{1}{-1.6 - j0.8} = 0.5 - j0.25.$$

$$5.6. \text{Проверка: } \underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{21}\underline{A}_{12} = (2 - j2)(0.5 - j0.25) - (-j0.1)(15 - j5) = 1$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Никулин В.И. Теория электрических цепей. - М.: РИОР, 2016
2. Попов В.П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа, 2005
3. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника.- М.: Энергоатомиздат, 1987.
4. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. Руководство к решению задач Учеб. пособие для радиотехн. спец. вузов 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высшая школа, 2002
5. Немцов М.В. Электротехника и электроника: Учебник для вузов. - М.: МЭИ, 2003.
6. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982.
7. Атабеков Г.И., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники: Нелинейные цепи. - М.: Энергия, 1970, часть 2.

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

Методические указания

по выполнению курсовой работы
по дисциплине «Теория электрических и радиотехнических цепей»
для студентов направления подготовки /специальности
11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
Направленность (профиль)
«Интеллектуальная обработка данных в инфокоммуникационных
системах и сетях»

Ставрополь 2026

СОДЕРЖАНИЕ

	с
1 Задания и исходные данные для анализа электрических цепей	4
1.1 Однофазные электрические цепи синусоидального тока	4
1.2 Трехфазные электрические цепи.....	12
1.3 Переходные процессы в линейных электрических цепях.....	14
2 Пример выполнения курсовой работы	17
2.1 Анализ однофазных электрических цепей синусоидального тока.....	17
2.1.1 Расчет цепи методом контурных токов.....	17
2.1.2 Расчет цепи методом узловых потенциалов.....	22
2.1.3 Расчет цепи методом наложения.....	24
2.1.4 Расчет цепи методом эквивалентного генератора.....	26
2.1.4.1 Расчет цепи методом эквивалентного генератора напряжения.....	26
2.1.4.2 Расчет цепи методом эквивалентного генератора тока.....	29
2.2 Анализ трехфазных электрических цепей	31
2.3 Анализ переходных процессов в линейных электрических цепях.....	39
2.3.1 Анализ переходных процессов классическим методом.....	39
2.3.2 Анализ переходных процессов операторным методом.....	41
3 Требования к оформлению курсовой работы	44
4 Вопросы для защиты курсовой работы	44
Литература.....	47

1 Задания и исходные данные для анализа электрических цепей

1.1 Однофазные электрические цепи синусоидального тока

Целевая установка:

Рассчитать токи в ветвях и напряжения на элементах заданной сложной линейной электрической цепи синусоидального тока методом контурных токов, методом узловых потенциалов, методом наложения, методом эквивалентного генератора. Построить векторные и временные диаграммы рассчитанных токов и напряжений.

Задание 1.1 Методом контурных токов рассчитать мгновенные токи в ветвях и напряжения на элементах заданной линейной электрической цепи (таблица 1). Проверить выполнение баланса мощностей. Построить векторные и временные диаграммы рассчитанных токов и напряжений.

Задание 1.2 Методом узловых потенциалов рассчитать комплексные токи в ветвях и напряжения на элементах заданной линейной электрической цепи (таблица 1). Проверить выполнение баланса мощностей.

Задание 1.3 Методом наложения рассчитать комплексные токи в ветвях и напряжения на элементах заданной линейной электрической цепи.

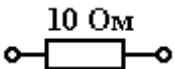
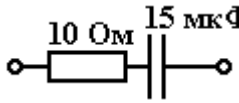
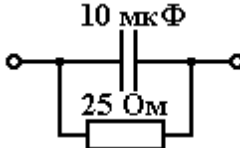
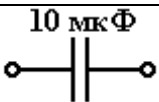
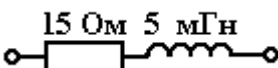
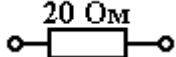
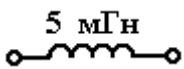
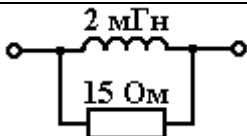
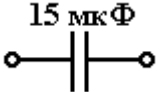
Задание 1.4 Методом эквивалентного генератора напряжения и эквивалентного генератора тока рассчитать комплексные токи в ветвях и напряжения на элементах заданной линейной электрической цепи.

Числовые исходные данные и схема заданного варианта определяются по заданному шифру, состоящему из 6 цифр: АБ ВГ ДЕ, где АБ - номер рисунка схемы электрической цепи;

ВГ - исходные данные из таблицы 1;

ДЕ - схема и параметры сопротивлений ветвей из таблиц 1 и 2

Таблица 1- Исходные данные источников энергии и номера схем элементов											
Исходные данные источников энергии								Номера схем элементов Z			
№	f, кГц	E _{m1} ,В	Ψ _{e1} ,°	E _{m2} ,В	Ψ _{e2} ,°	J _m , А	Ψ _i ,°	№	Z1	Z2	Z3
01	1.1	10	0	15	30	1.0	0	01	0	1	4
02	1.3	40	30	22	0	0.8	60	02	7	2	6
03	1.5	24	0	40	45	1.4	30	03	2	8	4
04	1.7	36	0	30	0	0.4	30	04	2	0	6
05	1.9	36	45	24	60	1.5	0	05	2	7	3
06	1.2	20	30	46	90	0.6	0	06	7	1	4
07	1.4	24	0	14	30	1.6	45	07	0	2	3
08	1.6	14	60	28	0	1.2	30	08	2	1	3
09	1.8	36	60	30	30	1.3	0	09	2	8	6
10	1.1	30	0	38	45	1.4	60	10	5	0	1
11	1.3	24	30	26	30	1.7	0	11	7	8	5
12	1.2	10	30	42	0	1.0	30	12	4	0	1
13	1.4	15	45	12	90	1.1	0	13	0	8	4
14	1.6	18	90	46	0	0.5	45	14	3	0	2
15	1.5	14	30	24	60	0.9	0	15	2	1	3
16	1.7	28	60	15	0	0.6	45	16	7	2	6
17	1.9	18	0	40	30	1.5	0	17	3	0	2
18	1.8	20	45	26	45	1.7	0	18	0	2	3
19	1.1	30	30	42	0	0.7	90	19	5	1	0
20	1.3	34	60	28	45	1.8	30	20	3	2	0
21	1.5	30	0	48	60	1.1	60	21	1	2	5
22	1.2	22	30	30	0	0.6	0	22	8	0	5
23	1.4	16	0	35	45	2.0	30	23	4	1	2
24	1.6	20	0	14	0	1.2	60	24	6	2	1
25	1.7	32	60	42	30	1.6	0	25	1	0	4
26	1.9	12	0	40	60	0.8	0	26	8	2	3
27	1.8	22	45	15	0	1.4	45	27	2	7	3
28	1.9	32	60	26	0	0.7	30	28	2	0	6
29	1.8	15	90	12	30	0.5	0	29	1	7	4
30	1.7	16	0	22	45	1.3	60	30	5	1	7
31	1.6	22	30	46	0	1.0	90	31	6	7	2
32	1.5	32	45	24	90	1.6	0	32	8	7	4
33	1.4	10	0	28	45	0.6	0	33	4	1	2
34	1.3	30	0	48	60	0.9	30	34	3	2	7
35	1.2	28	60	20	0	1.7	30	35	6	7	2
36	1.1	30	45	35	0	0.8	30	36	1	2	5
37	1.9	34	90	14	45	1.2	0	37	4	2	8
38	1.2	12	30	38	30	1.5	0	38	6	7	8
39	1.8	28	0	22	60	0.7	60	39	8	2	6
40	1.3	18	45	50	0	1.1	30	40	5	7	8

Таблица 2- Схемы и параметры пассивных элементов цепи					
Z	Схема и параметры	Z	Схема и параметры	Z	Схема и параметры
0		3		6	
1		4		7	
2		5		8	

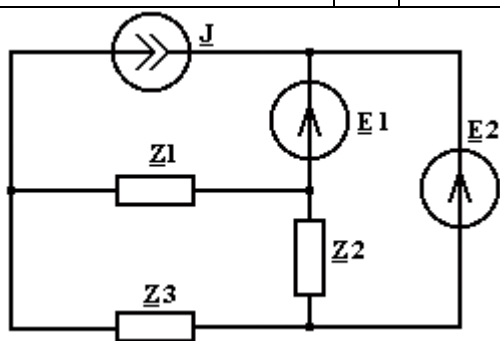


Рисунок 01

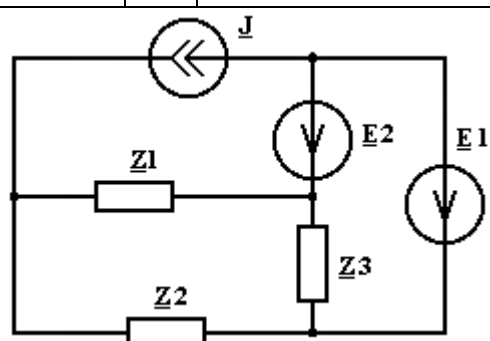


Рисунок 02

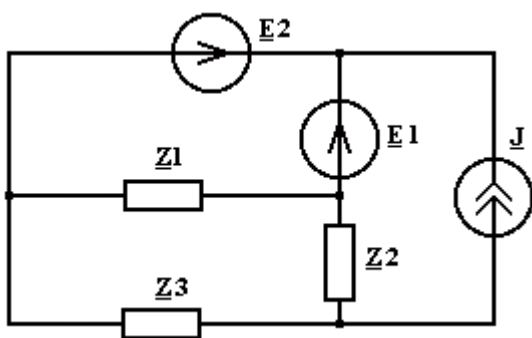


Рисунок 03

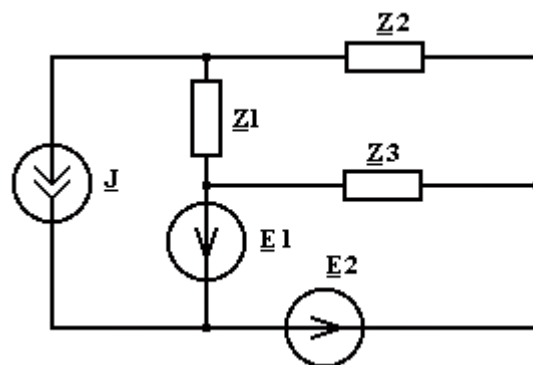


Рисунок 04

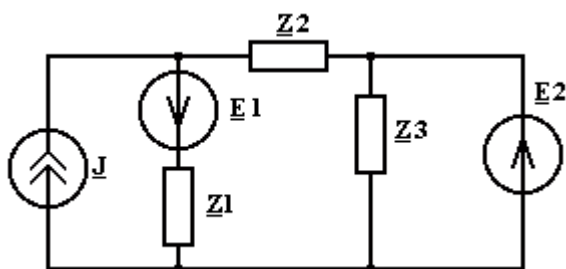


Рисунок 05

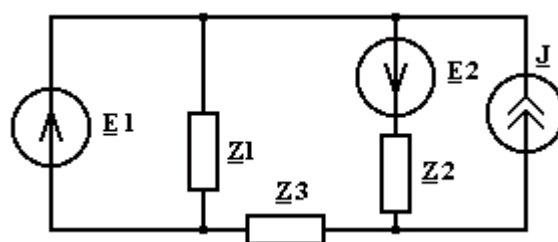


Рисунок 06

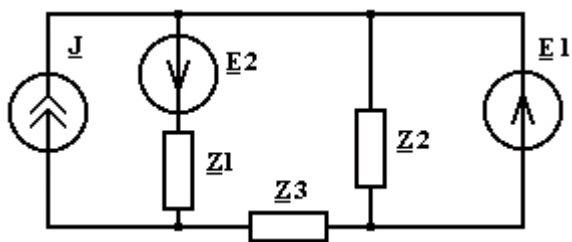


Рисунок 07

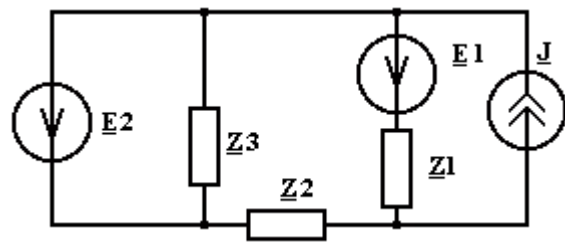


Рисунок 08

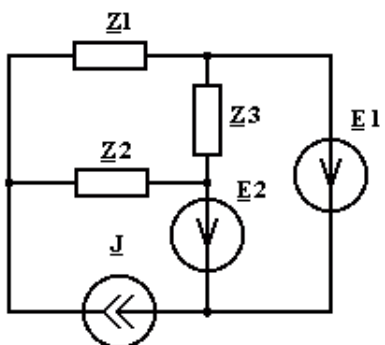


Рисунок 09

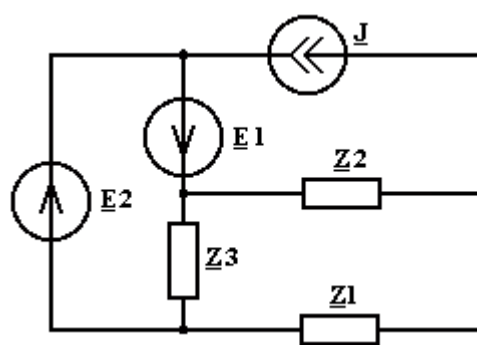


Рисунок 10

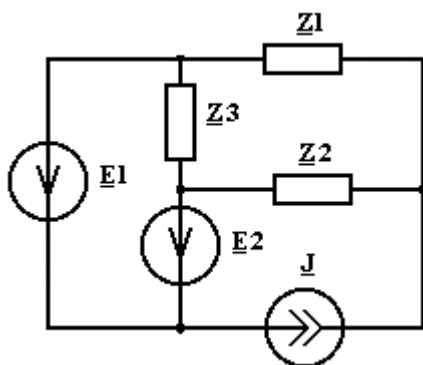


Рисунок 11

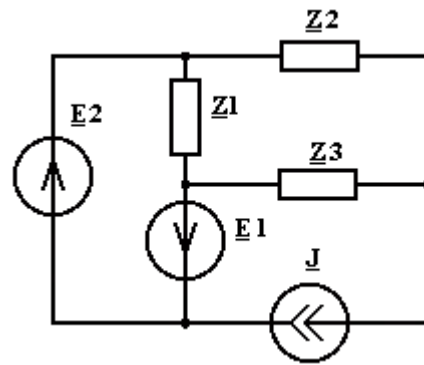


Рисунок 12

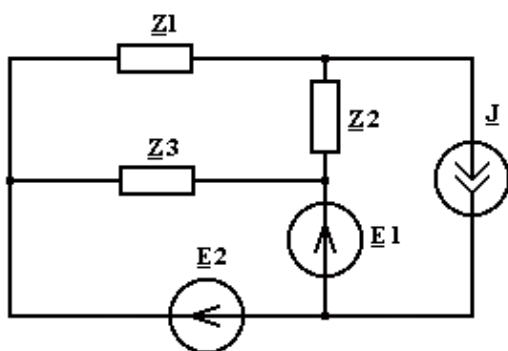


Рисунок 13

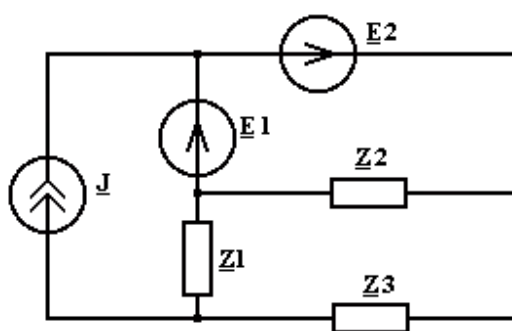


Рисунок 14

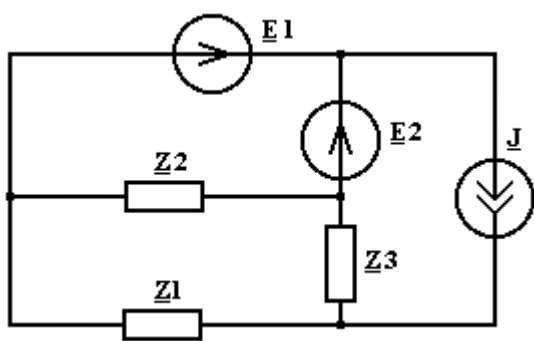


Рисунок 15

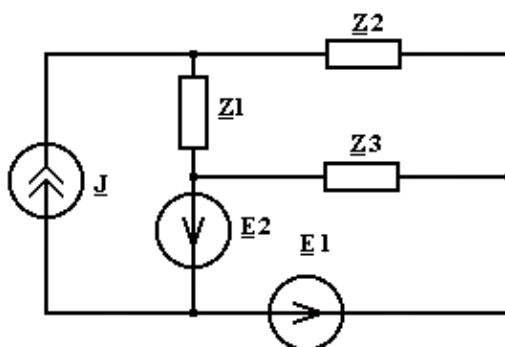


Рисунок 16

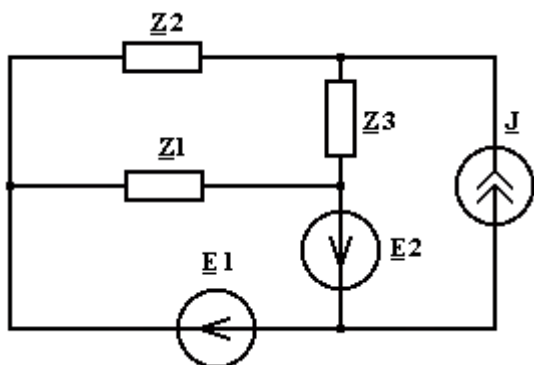


Рисунок 17

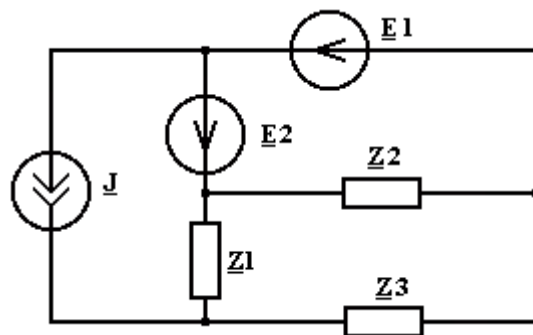


Рисунок 18

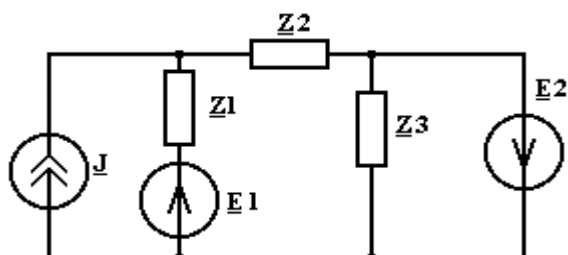


Рисунок 19

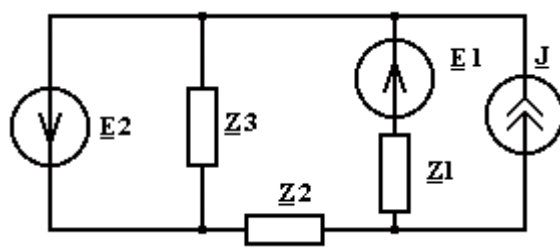


Рисунок 20

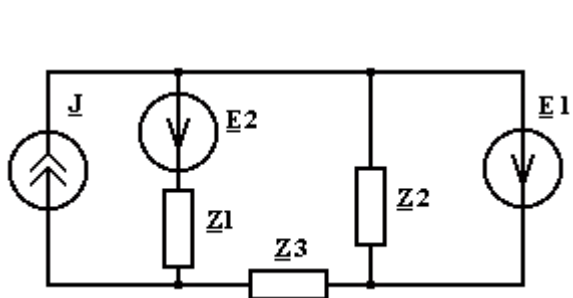


Рисунок 21

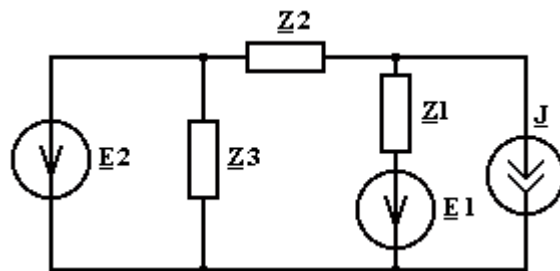


Рисунок 22

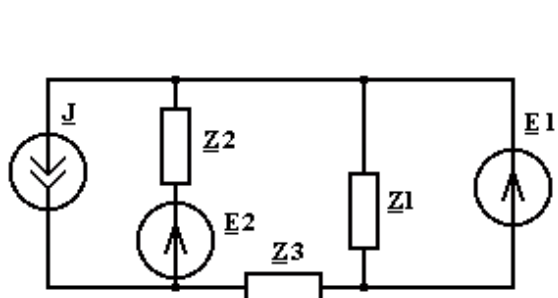


Рисунок 24

Рисунок 23

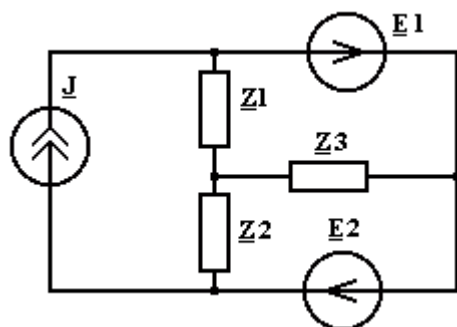


Рисунок 25

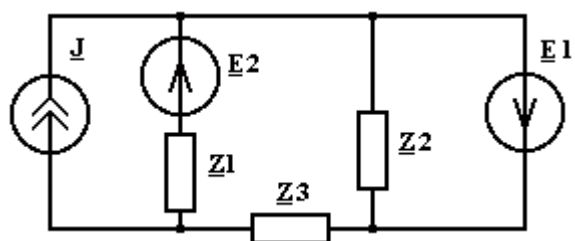


Рисунок 27

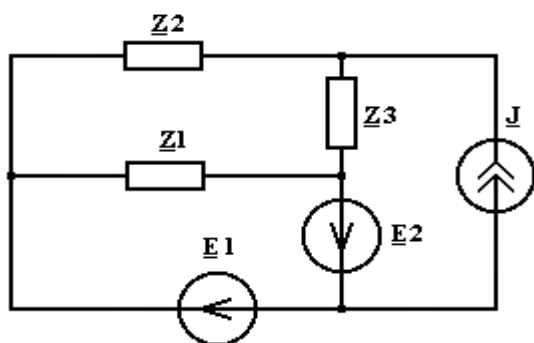


Рисунок 29

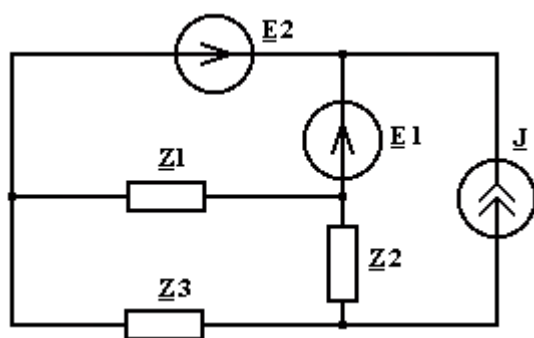


Рисунок 31

Рисунок 26

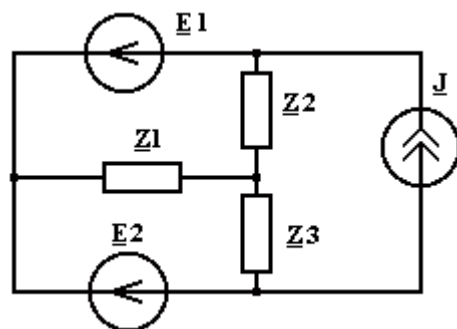


Рисунок 28

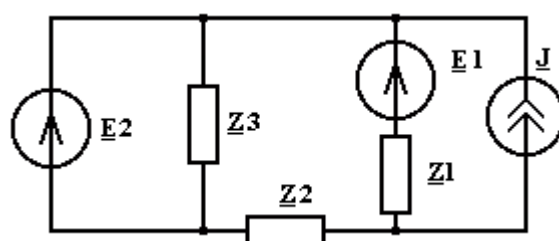


Рисунок 30

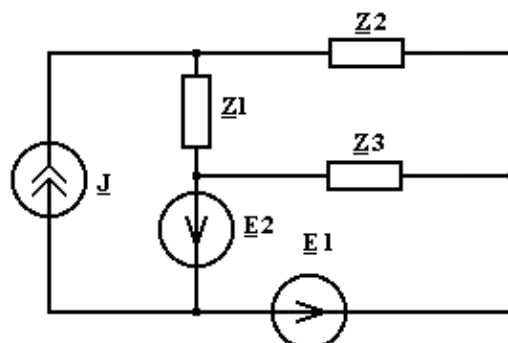
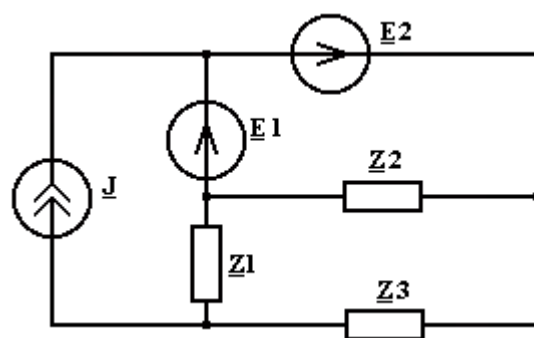


Рисунок 32



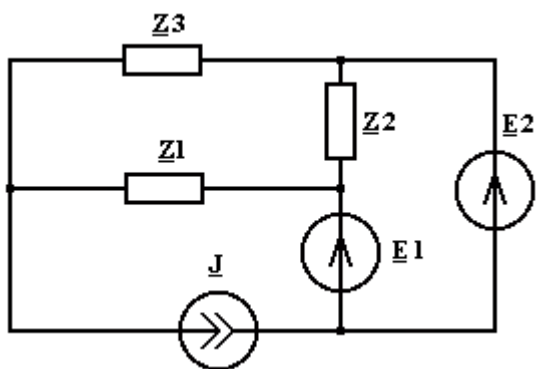


Рисунок 33

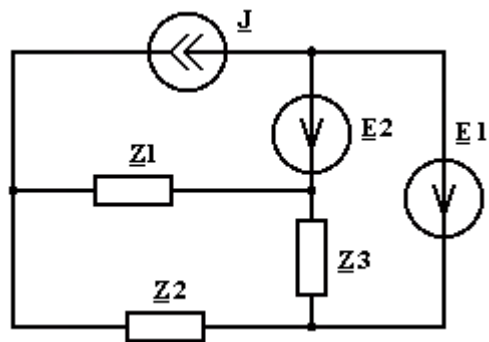


Рисунок 34

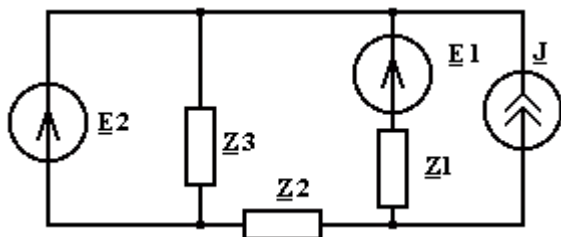


Рисунок 35

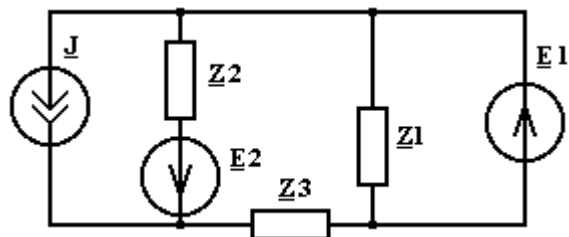


Рисунок 36

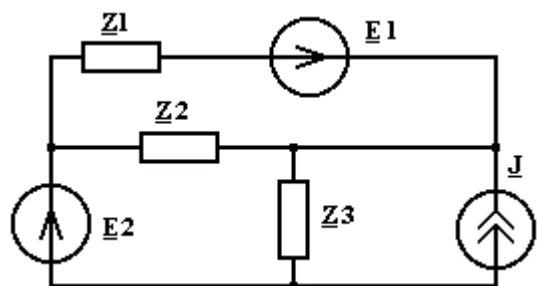


Рисунок 37

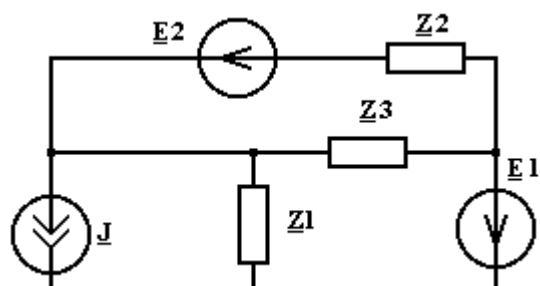


Рисунок 38

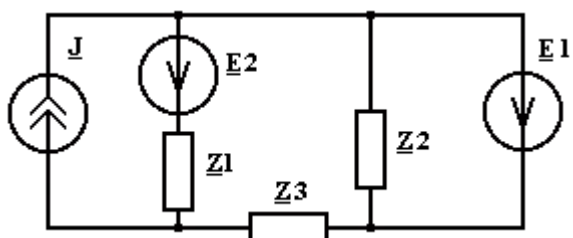


Рисунок 39

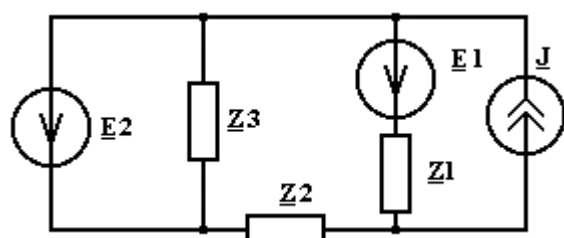


Рисунок 40

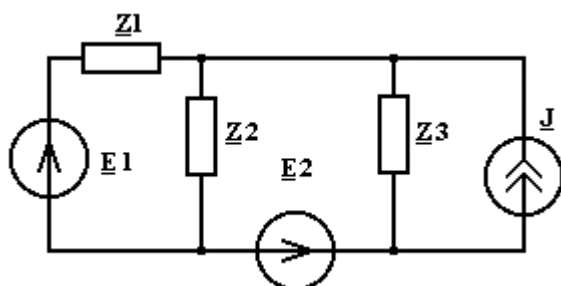


Рисунок 41

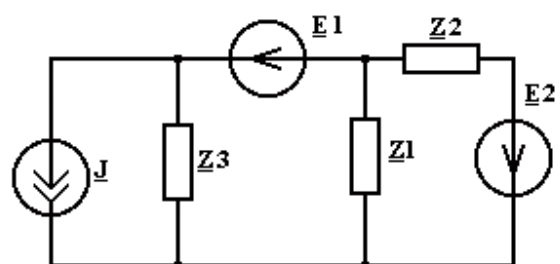


Рисунок 42

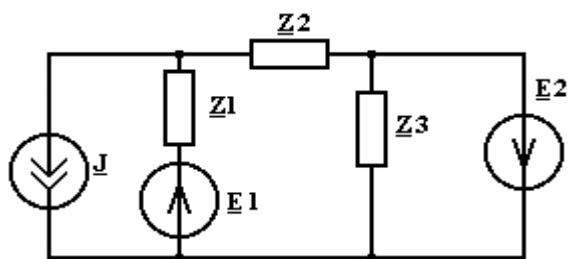


Рисунок 43

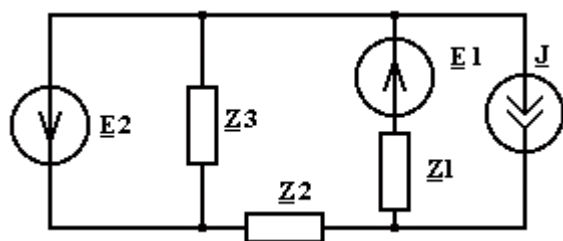


Рисунок 44

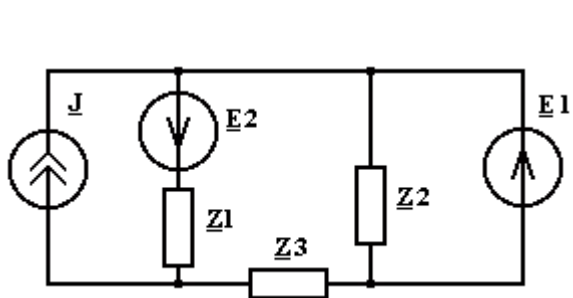


Рисунок 45

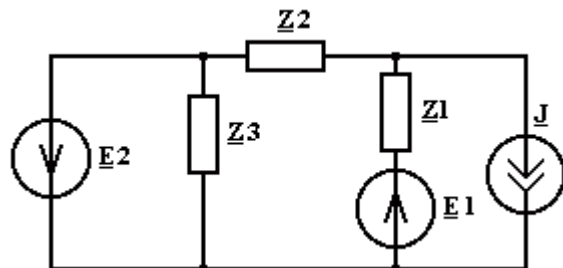


Рисунок 46

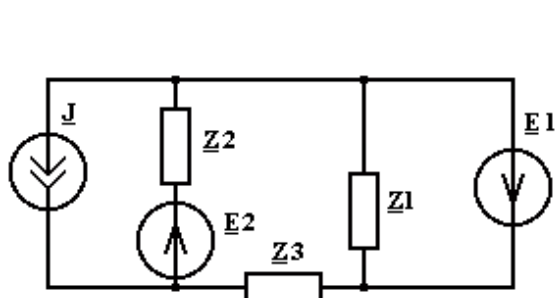


Рисунок 47

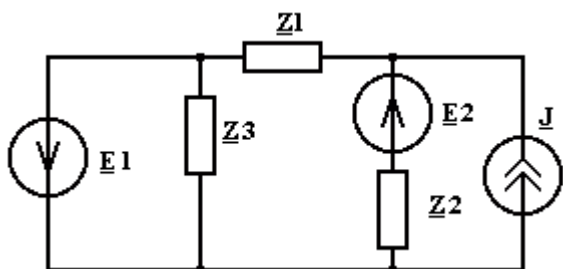


Рисунок 48

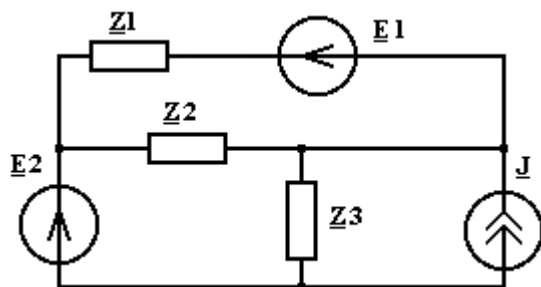


Рисунок 49

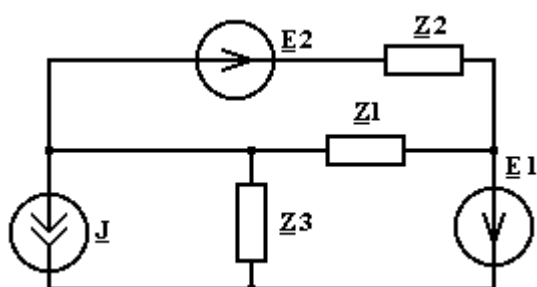


Рисунок 50

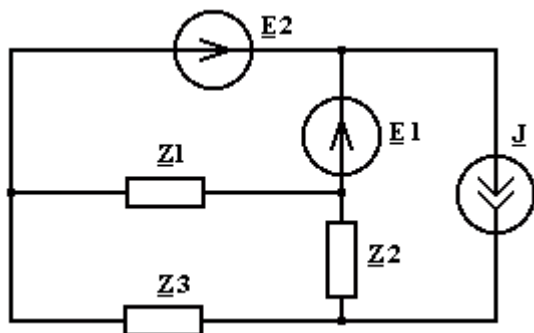


Рисунок 51

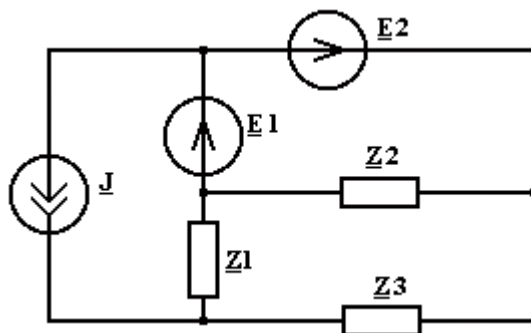


Рисунок 52

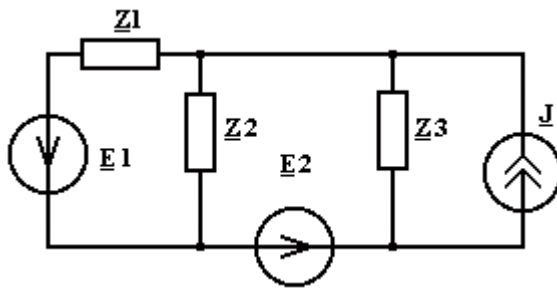


Рисунок 53

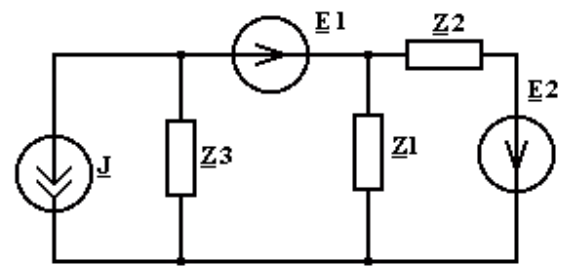


Рисунок 54

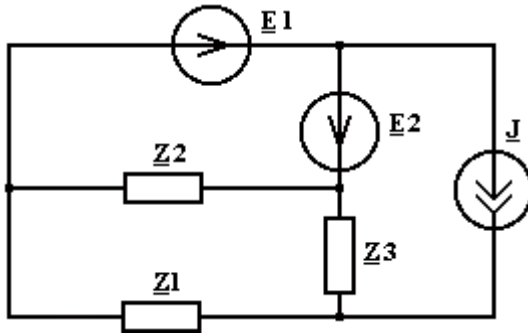


Рисунок 55

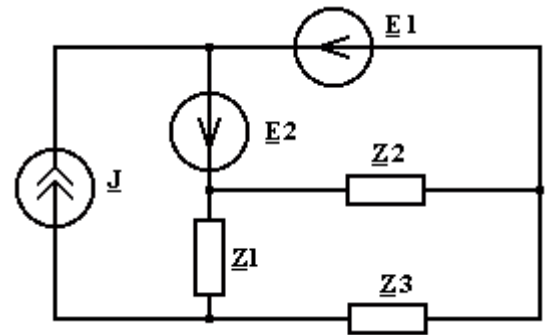


Рисунок 56

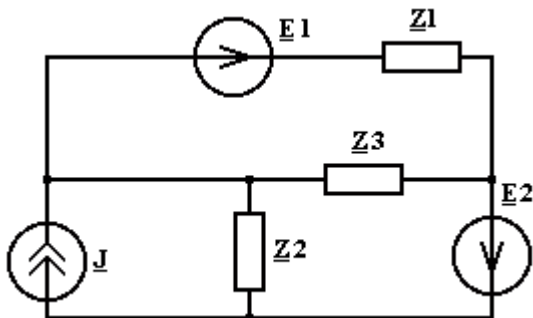


Рисунок 57

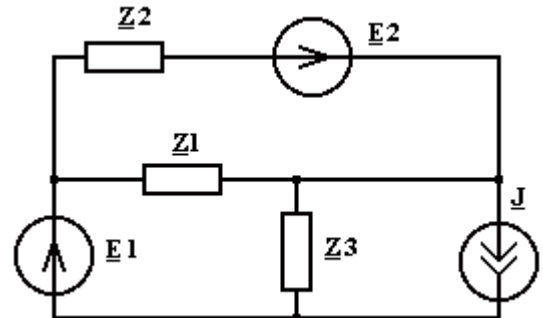


Рисунок 58

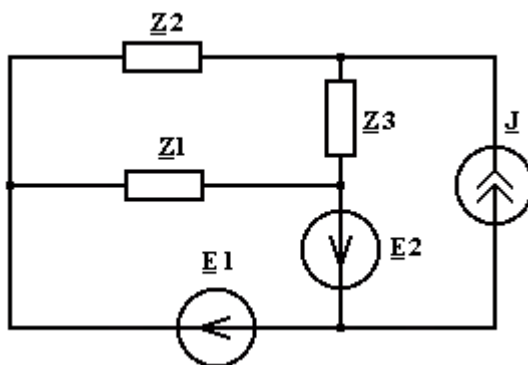


Рисунок 59

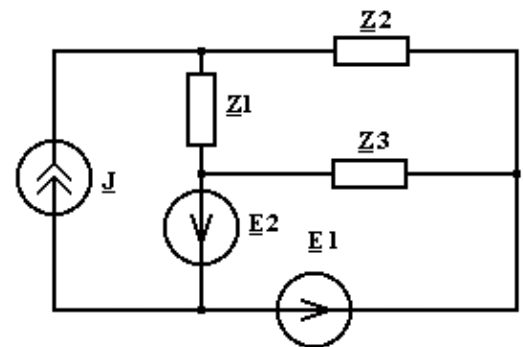


Рисунок 60

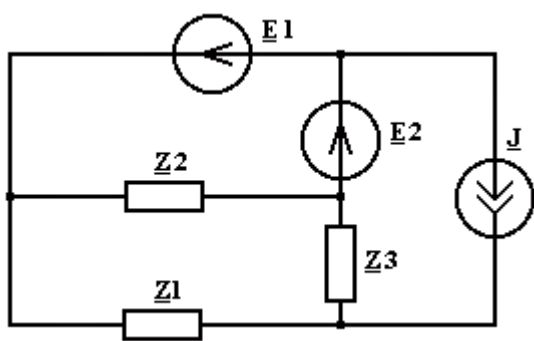


Рисунок 61

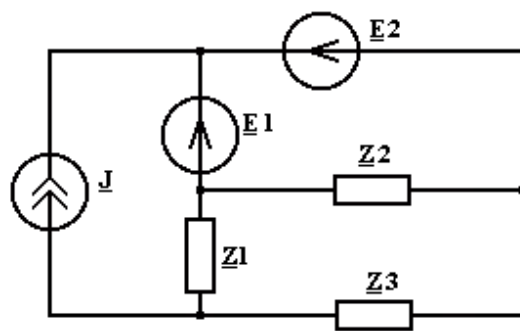


Рисунок 62

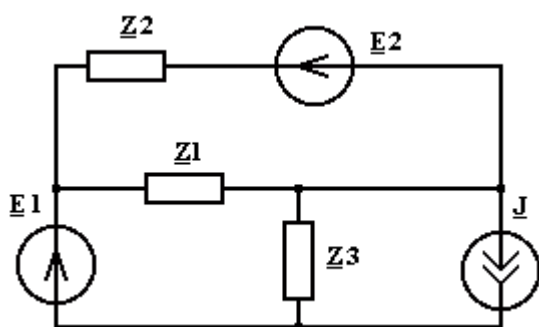


Рисунок 63

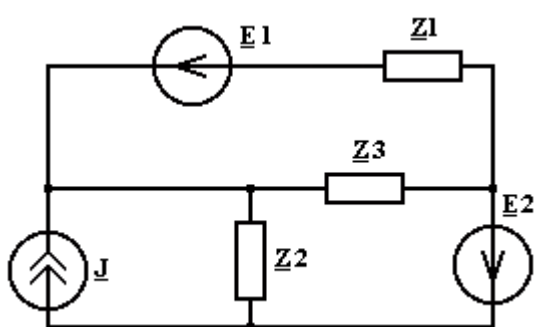


Рисунок 64

1.2 Трехфазные электрические цепи

Целевая установка:

1. Рассчитать токи, напряжения и мощность в трехфазной цепи с несимметричным приемником, фазы которого соединены звездой. Выполнить расчеты токов при обрыве нейтрального провода. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

2. Рассчитать токи, напряжения и мощность в трехфазной цепи с несимметричным приемником, фазы которого соединены треугольником. Выполнить расчеты токов при обрыве одного из линейных проводов. Построить векторные диаграммы токов и напряжений.

Задание 2.1 К симметричной трехфазной линии напряжением $U_{\text{л}}$ (таблица 3) подключен несимметричный приемник, фазы которого соединены звездой с нейтральным проводом. Комплексные сопротивления фаз приемника $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$, $\underline{Z}_c$ заданы согласно варианту (таблица 3). Рассчитать токи в фазах приемника, в линейных проводах и в нейтральном проводе. Построить векторные диаграммы токов и напряжений. Рассчитать мощность, потребляемую трехфазным приемником.

Задание 2.2 К симметричной трехфазной линии напряжением $U_{\text{л}}$ (таблица 3) подключен несимметричный приемник, фазы которого соединены звездой без нейтрального провода. Комплексные сопротивления фаз приемника $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$, $\underline{Z}_c$ заданы согласно варианту (таблица 3). Рассчитать токи в фазах приемника и в линейных проводах. Рассчитать токи в фазах приемника и в линейных проводах при коротком замыкании одной из фаз приемника. Построить векторные диаграммы токов и напряжений. Рассчитать мощность, потребляемую трехфазным приемником.

Задание 2.3 К симметричной трехфазной линии напряжением $U_{\text{л}}$ (таблица 3) подключен несимметричный приемник, фазы которого соединены треугольником. Комплексные сопротивления фаз приемника $\underline{Z}_a$, $\underline{Z}_b$, $\underline{Z}_c$ заданы согласно варианту (таблица 3). Рассчитать токи в фазах

приемника, в линейных проводах. Рассчитать токи в фазах приемника, в линейных проводах в случае обрыва одного из линейных проводов (таблица 3). Построить векторные диаграммы токов и напряжений. Рассчитать мощность, потребляемую трехфазным приемником.

Таблица 3 - Исходные данные для расчета трехфазных цепей

Вариант №	Uл, В	Z_a , Ом	Z_b , Ом	Z_c , Ом	Вариант №	Короткое замыкание фазы	Вариант №	Обрыв линейного провода
0	220	10	-j20	j30	0	а	0	А
1	360	j10	15	-j20	1	в	1	В
2	120	10-j10	j15	20	2	с	2	С
3	150	20	20-j60	40+j30	3	а	3	А
4	170	j60	10+j2	20-j40	4	в	4	В
5	225	15-j20	10	-j25	5	с	5	С
6	300	20+j50	24-j50	10+j10	6	а	6	А
7	100	20	j25	-j10	7	в	7	В
8	110	25-j60	30+j9	45-j50	8	с	8	С
9	125	150	j80	-j40	9	а	9	А
10	220	-j25	20	45+j40	10	в	10	В
11	360	10+j30	15-j35	20+j80	11	с	11	С
12	120	20+j50	24-j50	10+j10	12	а	12	А
13	150	10	-j20	j30	13	в	13	В
14	170	j10	15	-j20	14	с	14	С
15	225	10-j10	j15	20	15	а	15	А
16	300	20-j25	30-j60	30+j30	16	в	16	В
17	100	15-j90	j10	-j25	17	с	17	С
18	110	20+j80	29-j50	60+j10	18	а	18	А
19	125	j20	-j25	12-j10	19	в	19	В
20	220	25-j60	8+j40	45-j50	20	с	20	С

21	360	10-j50	j80	-j40	21	a	21	A
22	120	30-j25	20	45-j40	22	B	22	B
23	150	80+j30	15-j35	40+j80	23	c	23	C
24	170	10+j70	15-j20	80+j30	24	a	24	A
25	225	-j10	15+j8	-j20	25	B	25	B
26	300	10-j10	j15	20-j20	26	c	26	C
27	100	20+j7	20-j60	20+j30	27	a	27	A
28	110	90+j60	10+j2	20-j40	28	B	28	B
29	125	50-j20	10+j8	-j25	29	c	29	C
30	220	20+j30	20-j50	20+j10	30	a	30	A
31	360	20-j45	j25	10-j10	31	B	31	B
32	120	25-j60	30+j6	35-j50	32	c	32	C
33	150	15-j60	j80	50-j40	33	a	33	A
34	170	-j25	20+j8	45+j40	34	B	34	B
35	225	10+j40	15-j35	20+j80	35	c	35	C
36	300	10+j60	8-j20	j30	36	a	36	A
37	100	25-j10	15+j5	40-j20	37	B	37	B
38	110	10-j10	8+j15	20-j6	38	c	38	C
39	125	20	20-j60	40+j30	39	a	39	A
40	220	j60	10+j7	20-j40	40	B	40	B

1.3 Переходные процессы в линейных электрических цепях

Целевая установка:

1. Классическим методом рассчитать переходные токи и напряжения в линейной электрической цепи, заданной согласно варианту (таблица 4). Построить временные диаграммы переходных токов и напряжений.

2. Операторным методом рассчитать переходные токи и напряжения в линейной электрической цепи, заданной согласно варианту (таблица 4). Построить временные диаграммы переходных токов и напряжений.

Таблица 4- Исходные данные для расчета переходных токов и напряжений

вариант №	схема Рис. №	R ₁ , кОм	R ₂ , кОм	R ₃ , кОм	L, мГн	C, мкФ	E, В	J, мА
1	3.2	1	2	3	-	0.01	25	-
2	3.3	2	3	1	-	0.02	-	0.01
3	3.4	3	1	2	10	-	-	0.02
4	3.5	4	2	3	20	-	15	-
5	3.6	2	5	3	-	0.03	10	-
6	3.7	1	3	1	25	-	-	0.03
7	3.8	3	2	2	-	0.04	-	0.04
8	3.9	4	3	1	-	0.05	24	-
9	3.10	2	6	3	35	-	27	-
10	3.11	5	4	4	40	-	-	0.025
11	3.12	1	2	2	-	0.06	-	0.035
12	3.13	4	3	1	10	-	23	-
13	3.14	2	1	3	45	-	-	0.020
14	3.15	1	2	1	-	0.03	25	-
15	3.16	3	5	2	10	-	23	-
16	3.17	4	3	2	25	-	22	-
17	3.18	2	2	3	-	0.04	-	0.080
18	3.19	5	3	1	-	0.02	30	-
19	3.20	1	6	2	35	-	20	-
20	3.21	2	4	3	20	-	28	-
21	3.22	1	2	3	-	0.07	-	0.060
22	3.23	2	3	4	35	-	20	-

23	3.24	3	1	3	-	0.03	-	0.035
24	3.2	1	5	1	-	0.05	21	-
25	3.3	2	3	2	-	0.02	-	0.015
26	3.4	1	2	2	40	-	-	0.025
27	3.5	2	3	3	30	-	29	-
28	3.6	3	6	1	-	0.03	30	-
29	3.7	2	4	2	24	-	-	0.036
30	3.8	1	2	3	-	0.02	-	0.048
31	3.2	2	5	1	-	0.01	25	-
32	3.3	3	3	2	-	0.02	-	0.01
33	3.4	4	2	3	10	-	-	0.02
34	3.5	2	3	3	20	-	15	-
35	3.6	1	6	1	-	0.03	10	-
36	3.7	3	4	2	25	-	-	0.03
37	3.8	4	2	1	-	0.04	-	0.04
38	3.9	2	3	3	-	0.05	24	-
39	3.1	5	1	1	35	-	27	-
40	3.11	1	2	2	40	-	-	0.025

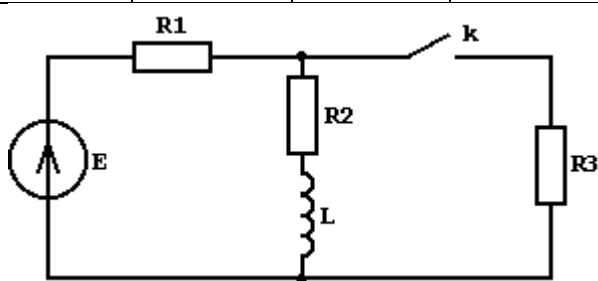


Рисунок 3.1

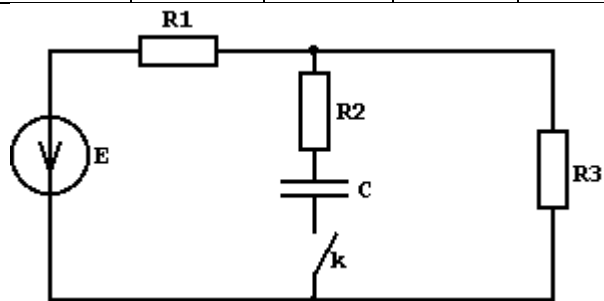


Рисунок 3.2

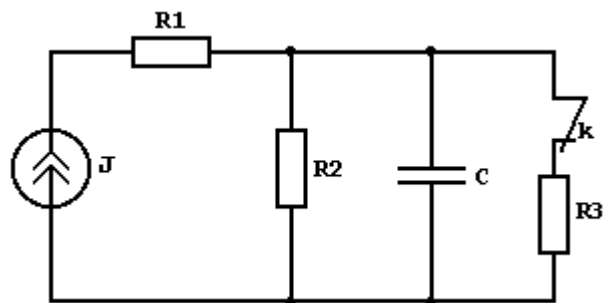


Рисунок 3.3

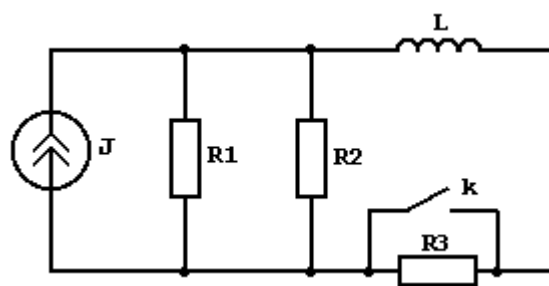


Рисунок 3.4

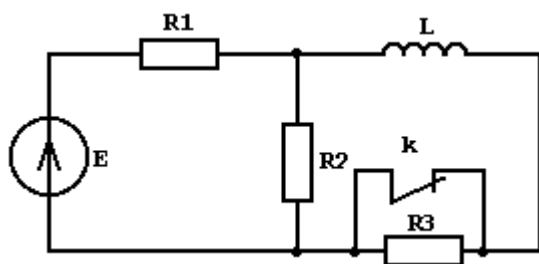


Рисунок 3.5

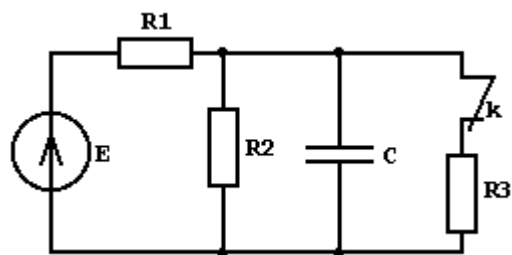


Рисунок 3.6

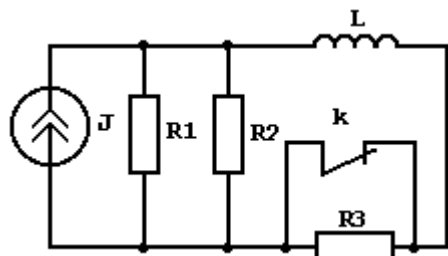


Рисунок 3.7

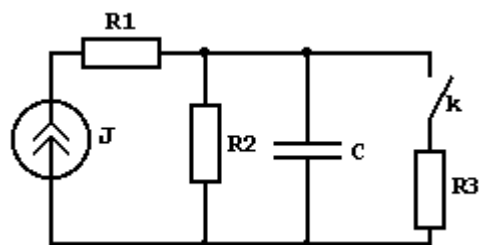


Рисунок 3.8

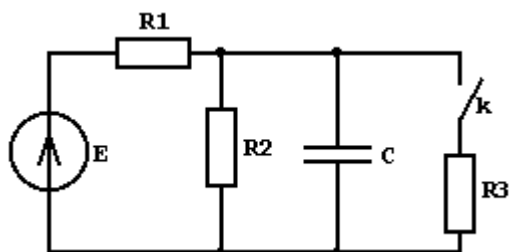


Рисунок 3.9

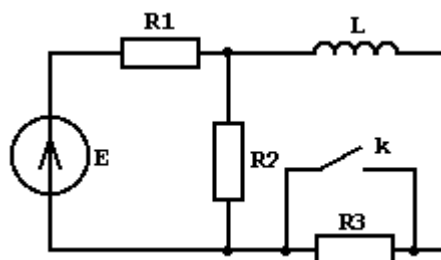


Рисунок 3.10

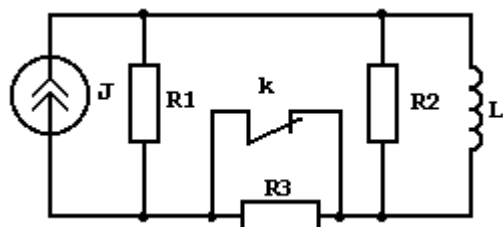


Рисунок 3.11

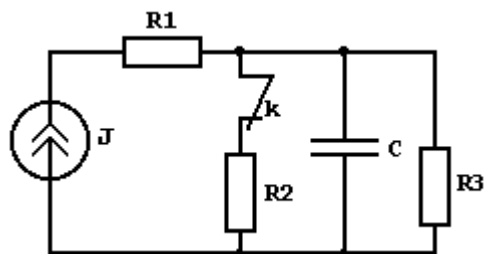


Рисунок 3.12

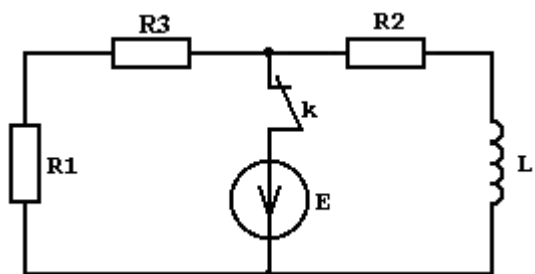


Рисунок 3.13

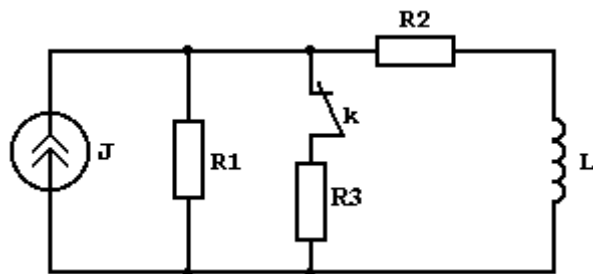


Рисунок 3.14

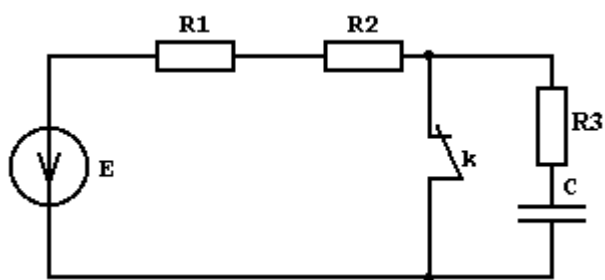


Рисунок 3.15

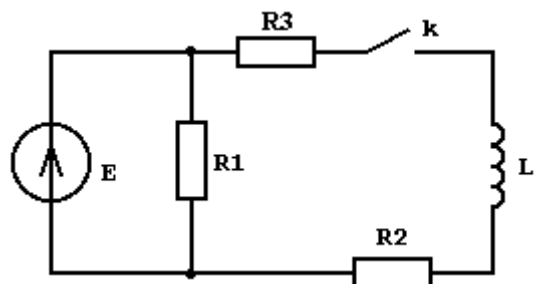


Рисунок 3.16

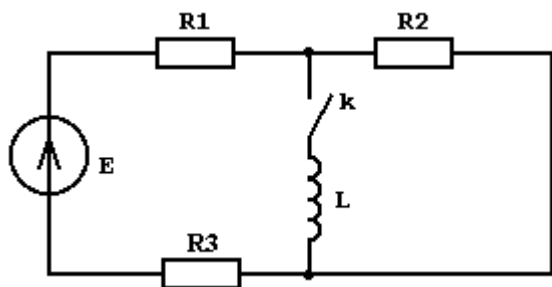


Рисунок 3.17

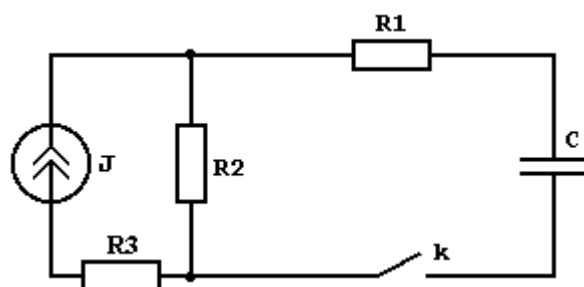


Рисунок 3.18

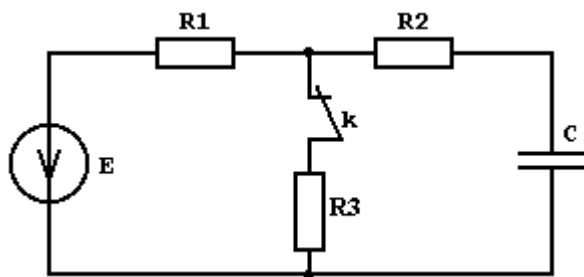


Рисунок 3.19

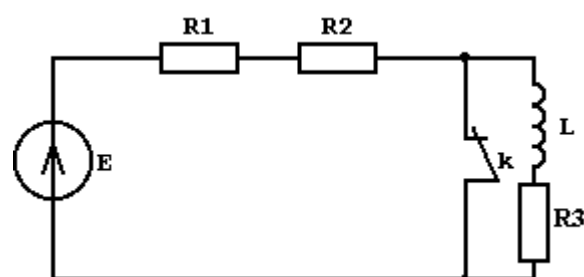


Рисунок 3.20

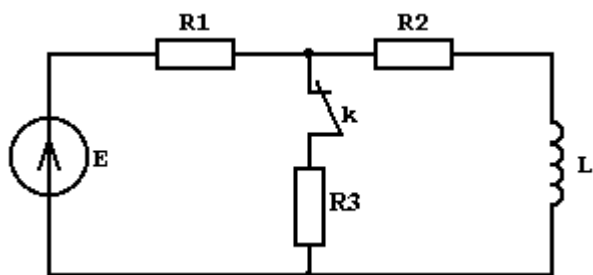


Рисунок 3.21

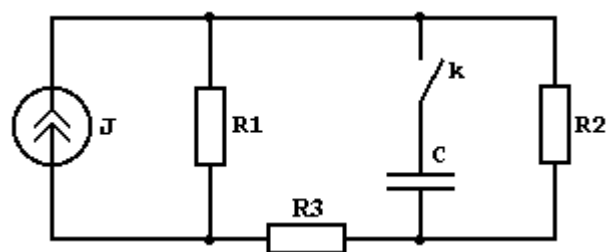


Рисунок 3.22

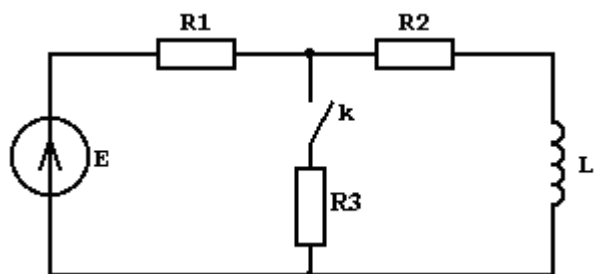


Рисунок 3.23

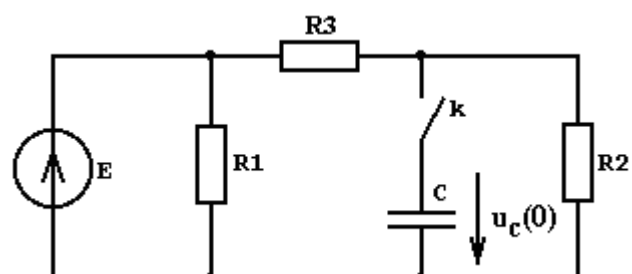


Рисунок 3.24

2 ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Анализ электрических цепей в установившихся и переходных режимах

2.1 Анализ однофазных электрических цепей синусоидального тока

Исходные данные. Схема заданной электрической цепи (рисунок 1.1).

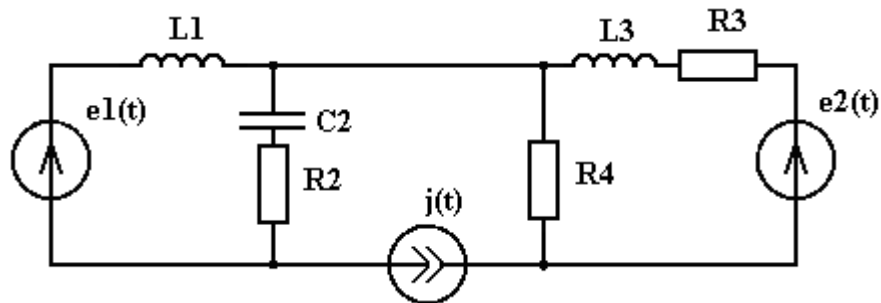


Рисунок 1.1 - Схема заданной электрической цепи

Амплитуда ЭДС $E_{m1} = 20$ В, начальная фаза $\psi_{e1} = 45^\circ$, частота колебаний $f = 1$ кГц, амплитуда ЭДС $E_{m2} = 21.21$ В, начальная фаза $\psi_{e2} = 90^\circ$, амплитуда тока источника тока $J_m = 0.1414$ А, начальная фаза $\psi_i = -90^\circ$, $L_1 = 1.592$ мГн, $R_2 = 30$ Ом, $C_2 = 3.979$ мкФ, $L_3 = 2.387$ мГн, $R_3 = 15$ Ом, $R_4 = 25$ Ом.

2.1.1 Расчет цепи методом контурных токов

1. Определяем комплексные сопротивления элементов электрической цепи

$$\underline{Z}_1 = j2\pi f L_1 = j \cdot 2 \cdot 3.14 \cdot 10^3 \cdot 1.592 \cdot 10^{-3} = j10 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - j \frac{1}{2\pi f C_2} = 30 - j \frac{1}{2 \cdot 3.14 \cdot 10^3 \cdot 3.979 \cdot 10^{-6}} = 30 - j40 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j2\pi f L_3 = 15 + j2 \cdot 3.14 \cdot 10^3 \cdot 2.387 \cdot 10^{-3} = 15 + j15 \text{ Ом}, \quad \underline{Z}_4 = R_4 = 25 \text{ Ом},$$

комплексные действующие значения ЭДС

$$\underline{E}_1 = \frac{E_{m1}}{\sqrt{2}} e^{j\psi_{e1}} = \frac{20}{1.414} e^{j45^\circ} = 10 + j10 \text{ В}, \quad \underline{E}_2 = \frac{E_{m2}}{\sqrt{2}} e^{j\psi_{e2}} = \frac{21.21}{1.414} e^{j90^\circ} = j15 \text{ В}, \quad \text{и}$$

комплексное действующее значение тока источника

$$\underline{J} = \frac{J_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_j} = \frac{0.1414}{1.414} e^{-j90^\circ} = -j0.1 \text{ А}.$$

2. Изображаем схему цепи в комплексной форме (рисунок 1.2)

3. Определяем число контурных токов (число независимых контуров)

$$N = n_b - n_y + 1 = 5 - 3 + 1 = 3$$

4. Определяем число уравнений $n = n_b - n_y + 1 - n_J = 5 - 3 + 1 - 1 = 2$

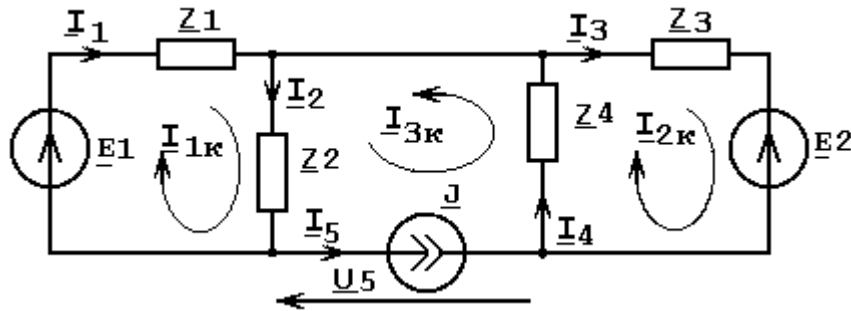


Рисунок 1.2- Схема электрической цепи в комплексной форме

5. Указываем направления контурных токов и токов в ветвях схемы (рисунок 1.2). При этом контурные токи выбираем таким образом, чтобы через ветвь с источником тока проходил только один контурный ток.

В схеме (рисунок 1.2) контурный ток $I_{3k} = J = -j0.1$ А.

6. Записываем систему 2^x уравнений для трех контурных токов

$$\underline{Z}_{11}I_{1k} + \underline{Z}_{12}I_{2k} + \underline{Z}_{13}I_{3k} = \underline{E}_{11}$$

$$\underline{Z}_{21}I_{1k} + \underline{Z}_{22}I_{2k} + \underline{Z}_{23}I_{3k} = \underline{E}_{22}$$

7. Определяем собственные сопротивления контуров $\underline{Z}_{nn}$, как арифметическую сумму сопротивлений элементов, входящих в контур «n»

$$\underline{Z}_{11} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = j10 + 30 - j40 = 30 - j30 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{22} = \underline{Z}_3 + \underline{Z}_4 = 15 + j15 + 25 = 40 + j15 \text{ Ом}.$$

8. Определяем общие сопротивления $\underline{Z}_{kn}$ контуров k и n. Со знаком "+" берем сопротивления элементов, в которых контурные токи совпадают по направлению $\underline{Z}_{12} = \underline{Z}_{21} = 0$ Ом, $\underline{Z}_{13} = \underline{Z}_{31} = \underline{Z}_2 = 30 - j40$ Ом, $\underline{Z}_{23} = \underline{Z}_{32} = \underline{Z}_4 = 25$ Ом.

9. Определяем контурные ЭДС $\underline{E}_{nn}$ как алгебраическую сумму ЭДС, входящих в данный контур. Со знаком "+" в сумму входят ЭДС, совпадающие по направлению с контурным током. $\underline{E}_{11} = \underline{E}_1 = 10 + j10$ В, $\underline{E}_{22} = -\underline{E}_2 = -j15$ В.

10. После подстановки рассчитанных величин в систему уравнений получим $(30 - j30)I_{1k} + (0)I_{2k} + (30 - j40)(-j0.1) = 10 + j10$

$$(0)\underline{I}_{1k} + (40+j15)\underline{I}_{2k} + 25(-j0.1) = -j15$$

$$\text{или } (30-j30)\underline{I}_{1k} = 10+j10-(30-j40)(-j0.1)$$

$$(40+j15)\underline{I}_{2k} = -j15-25(-j0.1)$$

$$11. \text{ Решая систему уравнений } (30-j30)\underline{I}_{1k} = 14+j13$$

$$(40+j15)\underline{I}_{2k} = -j12.5,$$

определим контурные токи $\underline{I}_{1k} = 0.017+j0.45 \text{ A}$, $\underline{I}_{2k} = -0.103-j0.274 \text{ A}$.

12. Определяем токи в ветвях

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1k} = 0.017+j0.45 = 0.45e^{j88} \text{ A},$$

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_{1k} + \underline{I}_{3k} = 0.017+j0.45 + (-j0.1) = 0.017+j0.35 = 0.35e^{j87} \text{ A},$$

$$\underline{I}_3 = \underline{I}_{2k} = -0.103-j0.274 = 0.293e^{-j111} \text{ A},$$

$$\underline{I}_4 = \underline{I}_{2k} + \underline{I}_{3k} = -0.103-j0.274+(-j0.1) = -0.103-j0.374 = 0.388e^{-j105} \text{ A},$$

$$\underline{I}_5 = \underline{I}_{3k} = -j0.1 = 0.1e^{-j90} \text{ A}.$$

13. Рассчитываем баланс мощностей:

13.1. Мощности источников электрической энергии

$$\underline{S}_{\text{изз}} = \underline{E}_1 \underline{I}_1^* + \underline{U}_5 \underline{J}^* - \underline{E}_2 \underline{I}_3^* = (10+j10)(0.017-j0.45) + (11.932+j0.484)(j0.1) - \\ - j15(-0.103+j0.274) = 8.728-j1.599 \text{ ВА}$$

Здесь $\underline{U}_5$ -комплексное напряжение на источнике тока (рисунок 1.2.)

$$\underline{U}_5 = \underline{I}_4 \underline{Z}_4 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2,$$

$\underline{I}_1^*, \underline{J}^*, \underline{I}_3^*$ - комплексные сопряженные токи.

13.2. Мощности приемников электрической энергии

$$\underline{S}_{\text{пээ}} = \underline{I}_1^2 \underline{Z}_1 + \underline{I}_2^2 \underline{Z}_2 + \underline{I}_3^2 \underline{Z}_3 + \underline{I}_4^2 \underline{Z}_4 = 0.45^2(j10) + 0.35^2(30-j40) + 0.293^2(15+j15) + \\ + 0.388^2(25) = 8.728-j1.599 \text{ ВА}$$

11.3. Вывод: $\underline{S}_{\text{изз}} = \underline{S}_{\text{пээ}}$ - мощности, развиваемые источниками электрической энергии, равны мощностям, расходуемым в приемниках электрической энергии.

13. Рассчитываем комплексные напряжения на участках цепи:

$$\underline{U}_1 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 = (j10)0.45e^{j88} = 10e^{j90}0.45e^{j88} = 4.5e^{j178} \text{ В},$$

$$\underline{U}_2 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2 = (30-j40)0.35e^{j87} = 50e^{-j53}0.35e^{j87} = 17.52e^{j34} \text{ В},$$

$$\underline{U}_3 = \underline{Z}_3 \underline{I}_3 = (15+j15)0.293e^{-j111} = 21.21e^{j45}0.293e^{-j111} = 6.21e^{-j65.6} \text{ В},$$

$$\underline{U}_4 = \underline{Z}_4 \underline{I}_4 = (25) 0.388 e^{-j105^\circ} = 9.7 e^{-j105^\circ} \text{ В},$$

14. Мгновенные ЭДС, напряжения и токи в цепи определяются выражениями

$$e_1(\omega t) = E_{m1} \sin(\omega t + \psi_{e1}) = 20 \sin(6280t + 45^\circ) \text{ В};$$

$$e_2(\omega t) = E_{m2} \sin(\omega t + \psi_{e2}) = 21.21 \sin(6280t + 90^\circ) \text{ В};$$

$$u_1(\omega t) = U_{m1} \sin(\omega t + \psi_{u1}) = 6.368 \sin(6280t + 178^\circ), \text{ В};$$

$$u_2(\omega t) = U_{m2} \sin(\omega t + \psi_{u2}) = 24.777 \sin(6280t + 34^\circ), \text{ В};$$

$$u_3(\omega t) = U_{m3} \sin(\omega t + \psi_{u3}) = 8.778 \sin(6280t - 65.6^\circ), \text{ В};$$

$$u_4(\omega t) = U_{m4} \sin(\omega t + \psi_{u4}) = 13.712 \sin(6280t - 105^\circ), \text{ В};$$

$$i_1(\omega t) = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t + \psi_{i1}) = 0.637 \sin(6280t + 88^\circ), \text{ А};$$

$$i_2(\omega t) = \sqrt{2} I_2 \sin(\omega t + \psi_{i2}) = 0.496 \sin(6280t + 87^\circ), \text{ А};$$

$$i_3(\omega t) = \sqrt{2} I_3 \sin(\omega t + \psi_{i3}) = 0.414 \sin(6280t - 111^\circ), \text{ А};$$

$$i_4(\omega t) = \sqrt{2} I_4 \sin(\omega t + \psi_{i4}) = 0.548 \sin(6280t - 105^\circ), \text{ А};$$

$$i_5(\omega t) = \sqrt{2} I_5 \sin(\omega t + \psi_{i5}) = 0.141 \sin(6280t - 90^\circ), \text{ А}.$$

15. Графики мгновенных ЭДС, напряжений и токов в цепи представлены на рисунках 1.3 и 1.4.

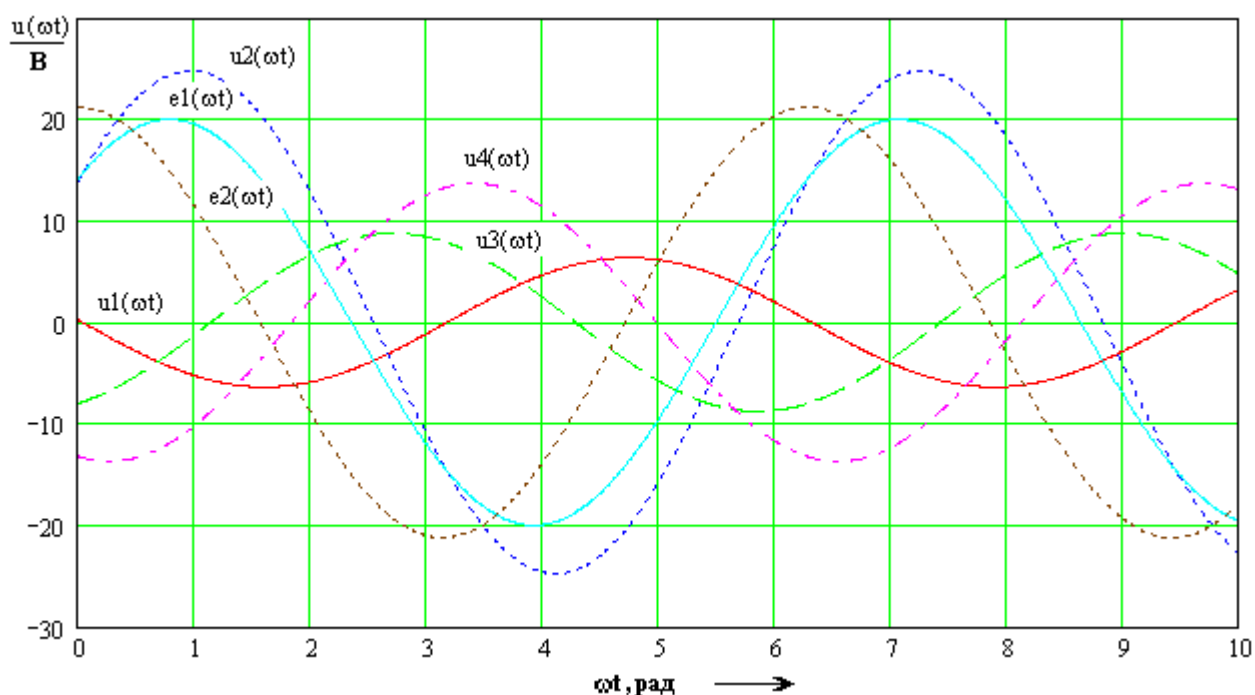


Рисунок 1.3 - Графики мгновенных ЭДС и напряжений в цепи

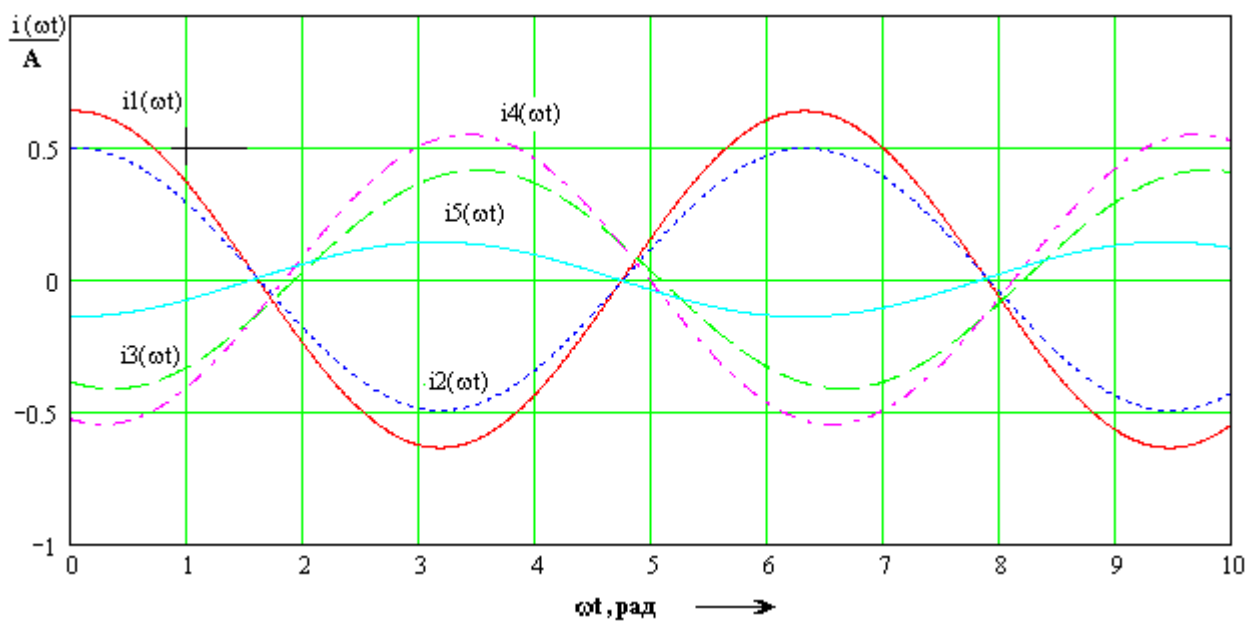


Рисунок 1.4- Графики мгновенных токов в цепи

16. Векторные диаграммы напряжений и токов изображены на рисунках 1.5, 1.6.

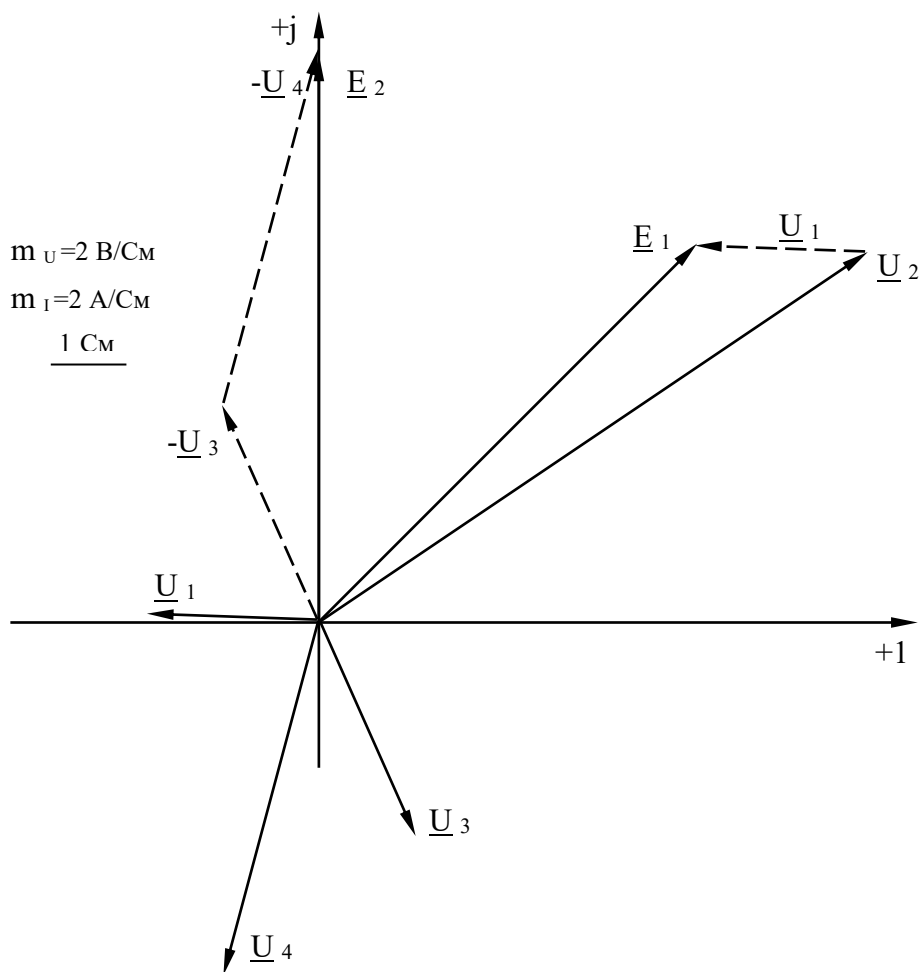


Рисунок 1.5- Векторные диаграммы напряжений и ЭДС

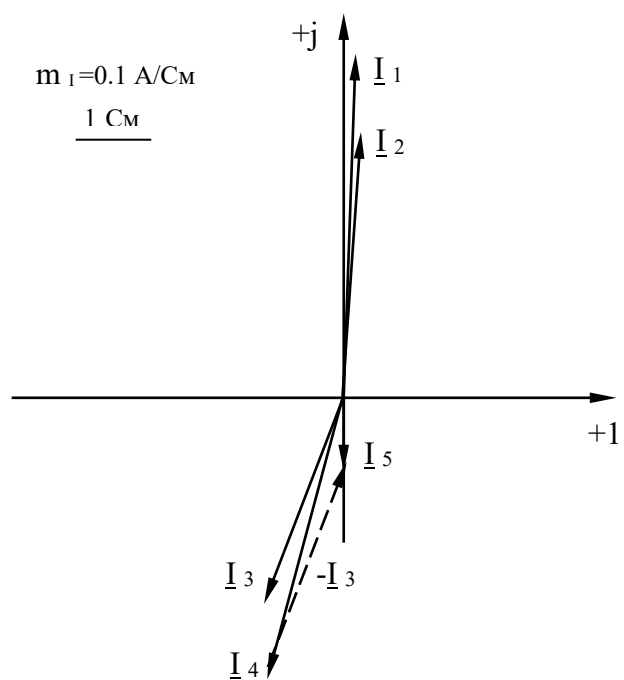


Рисунок 1.6- Векторные диаграммы токов

2.1.2 Расчет цепи методом узловых потенциалов

1. Укажем номера узлов на схеме (рисунок 1.7). Узлы 1' и 1'' следует рассматривать как один узел, так как они соединены идеальным проводником и, следовательно, их потенциалы равны между собой. Выбираем в качестве опорного узла узел 3 и принимаем его потенциал $\varphi_3 = 0$. На рисунке 1.7 показываем его соединение с корпусом.

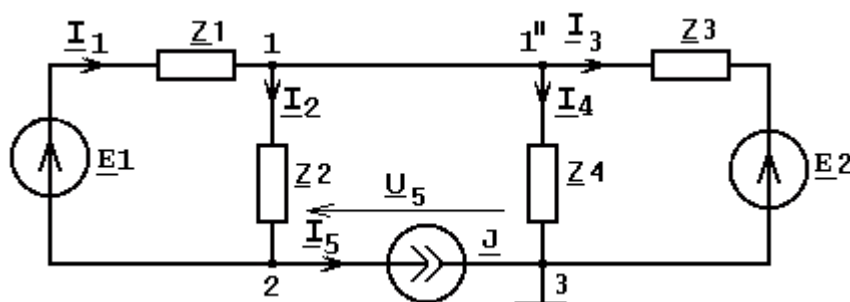


Рисунок 1.7

2. Число уравнений $N = n_y - 1 - n_e = 3 - 1 - 0 = 2$.

Здесь n_y - число узлов в цепи,

n_e - число ветвей, состоящих только из идеализированных источников ЭДС. В схеме (рисунок 1.7) таких ветвей нет, т.е. $n_e = 0$.

3. Составляем систему уравнений

$$\underline{Y}_{11} \varphi_1 - \underline{Y}_{12} \varphi_2 = \sum_1 \underline{EY} + \sum_1 \underline{J}$$

$$-\underline{Y}_{21} \varphi_1 + \underline{Y}_{22} \varphi_2 = \sum_2 \underline{EY} + \sum_2 \underline{J}$$

Здесь $\underline{Y}_{11}$ - сумма проводимостей ветвей, присоединенных к узлу 1,

$\underline{Y}_{22}$ - сумма проводимостей ветвей, присоединенных к узлу 2,

$\underline{Y}_{12}$ - сумма проводимостей ветвей, соединяющих узел 1 и узел 2 между собой,

$\underline{Y}_{21}$ - сумма проводимостей ветвей, соединяющих узел 2 и узел 1,

$\sum_1 \underline{EY}$ - алгебраическая сумма произведений ЭДС ветвей, присоединенных к узлу 1, на проводимости этих ветвей. При этом со знаком «+» берутся те ЭДС, которые имеют направление к узлу 1, а со знаком «-» берутся те ЭДС, которые имеют направление от узла 1,

$\sum_1 \underline{J}$ - алгебраическая сумма токов источников тока, присоединенных к узлу

1. При этом со знаком «+» берутся те токи, которые направлены к узлу 1, а со знаком «-» - токи, которые направлены от узла 1,

$\sum_2 \underline{EY}$ - алгебраическая сумма произведений ЭДС ветвей, присоединенных к узлу 2, на их проводимости. При этом со знаком «+» берутся те ЭДС, которые имеют направление к узлу 2,

$\sum_2 \underline{J}$ - алгебраическая сумма токов источников тока, присоединенных к узлу

2. При этом со знаком «+» берутся те токи, которые направлены к узлу 2, а со знаком «-» - токи, которые направлены от узла 2.

4. Определяем величины, необходимые для решения системы уравнений

$$\underline{Y}_{11} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3} + \frac{1}{\underline{Z}_4} = \frac{1}{j10} + \frac{1}{30 - j40} + \frac{1}{15 + j15} + \frac{1}{25} = 0.085 - j0.117 \text{ См}$$

$$\underline{Y}_{12} = \underline{Y}_{21} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{j10} + \frac{1}{30 - j40} = 0.012 - j0.084 \text{ См},$$

$$\underline{Y}_{22} = \frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{j10} + \frac{1}{30 - j40} = 0.012 - j0.084 \text{ См}$$

$$\sum_1 \underline{EY} = \underline{E}_1 \cdot \frac{1}{\underline{Z}_1} + \underline{E}_2 \cdot \frac{1}{\underline{Z}_3} = (10 + j10) \cdot \frac{1}{j10} + j15 \cdot \frac{1}{15 + j15} = 1.5 - j0.5 \text{ А},$$

$$\sum_1 \underline{J} = 0, \sum_2 \underline{EY} = -\underline{E}_1 \cdot \frac{1}{\underline{Z}_1} = -(10 + j10) \cdot \frac{1}{j10} = -1 + j \text{ А}, \sum_2 \underline{J} = -\underline{J} = j0.1 \text{ А}$$

5. Решая систему уравнений $(0.085 - j0.117)\varphi_1 - (0.012 - j0.084)\varphi_2 = 1.5 - j0.5$

$$- (0.012 - j0.084)\varphi_1 + (0.012 - j0.084)\varphi_2 = -1 + j1.1$$

находим потенциалы $\varphi_1 = 2.568 + j9.349 \text{ В}$, $\varphi_2 = -11.932 - j0.484 \text{ В}$.

6. Выбираем направления токов в ветвях (рисунок 1.7).

7. Применяя закон Ома для участка цепи, находим токи в ветвях

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{\varphi}_2 - \underline{\varphi}_1 + \underline{E}_1}{\underline{Z}_1} = 0.017 + j0.45 = 0.45e^{j88^\circ} \text{ А},$$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{\varphi}_1 - \underline{\varphi}_2}{\underline{Z}_2} = 0.017 + j0.35 = 0.35e^{j87^\circ} \text{ А},$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{\varphi}_1 - \underline{\varphi}_3 - \underline{E}_2}{\underline{Z}_3} = -0.103 - j0.274 = 0.293e^{-j111^\circ} \text{ А},$$

$$\underline{I}_4 = \frac{\underline{\varphi}_1 - \underline{\varphi}_3}{\underline{Z}_4} = 0.103 + j0.374 = 0.388e^{-j105^\circ} \text{ А}.$$

8. Ток в ветви с источником тока $\underline{I}_5 = \underline{J} = -j0.1 = 0.1e^{-j90^\circ} \text{ А}.$

9. Проверим выполнение первого закона Кирхгофа для узла 2

$$-\underline{I}_1 - \underline{I}_5 + \underline{I}_2 = -0.017 - j0.45 + j0.1 + 0.017 + j0.35 = 0$$

10. Рассчитываем баланс мощностей:

10.1. Мощности, развиваемые источниками электрической энергии

$$\underline{S}_{\text{изз}} = \underline{E}_1 \underline{I}_1^* + \underline{U}_5 \underline{J}^* - \underline{E}_2 \underline{I}_3^* = (10 + j10)(0.017 - j0.45) + (11.932 + j0.484)(j0.1) - j15(-0.103 + j0.274) = 8.728 - j1.599 \text{ ВА}.$$

Здесь $\underline{U}_5$ -комплексное напряжение на источнике тока (рисунок 1.7)

$$\underline{U}_5 = -\underline{I}_4 \underline{Z}_4 + \underline{I}_2 \underline{Z}_2$$

$\underline{I}_1^*, \underline{J}^*, \underline{I}_3^*$ - комплексные сопряженные токи.

10.2. Мощности, расходуемые в приемниках электрической энергии

$$\underline{S}_{\text{пээ}} = \underline{I}_1^2 \underline{Z}_1 + \underline{I}_2^2 \underline{Z}_2 + \underline{I}_3^2 \underline{Z}_3 + \underline{I}_4^2 \underline{Z}_4 = 0.45^2(j10) + 0.35^2(30 - j40) + 0.293^2(15 + j15) + 0.388^2(25) = 8.728 - j1.599 \text{ ВА}.$$

10.3. Вывод: мощности, развиваемые источниками электрической энергии, равны мощностям, расходуемым в приемниках электрической энергии.

2.1.3 Расчет цепи методом наложения

Рассчитать ток в ветви с сопротивлением $\underline{Z}_4$ электрической цепи (рисунок 1.8), если $\underline{Z}_1 = 6 - j8 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2 = 5 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_3 = 3 + j40 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_4 = 4 \text{ Ом}$, $\underline{E}_1 = 30 \text{ В}$, $\underline{E}_2 = 10 + j10 \text{ В}$, $\underline{J}_1 = 5 \text{ А}$.

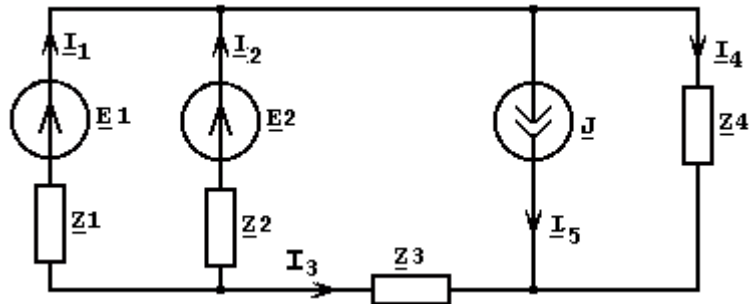


Рисунок 1.8

1. В заданной схеме (рисунок 1.8) указываем направления токов.
2. Из схемы (рисунок 1.8) исключаем источники $\underline{E}_2$ и $\underline{J}_1$ и рассчитываем токи в ветвях с элементом $\underline{Z}_4$ полученной схемы (рисунок 1.9).

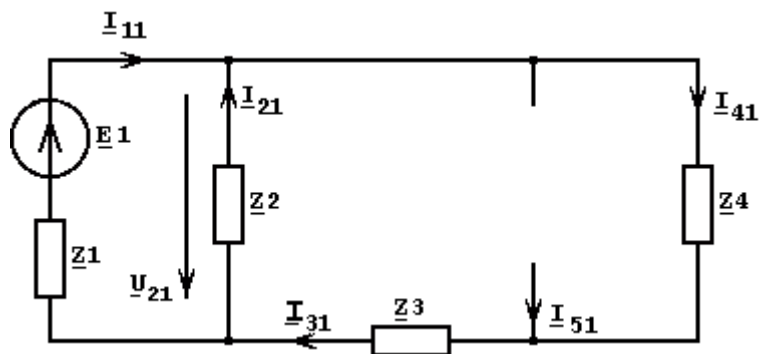


Рисунок 1.9

- 2.1. Указываем направления токов в ветвях схемы (рисунок 1.9).
- 2.2. В схеме (рисунок 1.9) ток $I_{51} = 0$, т.к. сопротивление ветви, из которой исключен источник тока $\underline{J}_1$, имеет бесконечно большую величину. При этом ток $I_{31} = I_{41}$. Следовательно, сопротивления

$\underline{Z}_4$ и $\underline{Z}_3$ соединены последовательно. Ток

$$\underline{I}_{41} = \frac{\underline{U}_{21}}{\underline{Z}_4 + \underline{Z}_3} = \frac{5.21 + j6.266}{4 + 3 + j4} = 0.947 + j0.354 \text{ A.}$$

2.3. Согласно второму закону Кирхгофа $\underline{E}_1 = \underline{I}_{11} \cdot \underline{Z}_1 + \underline{U}_{21}$, тогда

$$\underline{U}_{21} = \underline{E}_1 - \underline{I}_{11} \underline{Z}_1 = 30 - (1.983 + j1.607) \cdot (6 - j8) = 6.21 + j6.266 \text{ V.}$$

2.4. Ток $\underline{I}_{11} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_{\text{э1}}} = \frac{30}{9.125 - j7.375} = 1.989 + j1.607 \text{ A,}$

здесь $\underline{Z}_{\text{э1}}$ - эквивалентное комплексное сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\text{э1}} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4)}{\underline{Z}_2 + (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4)} = 6 - j8 + \frac{5(3 + j4 + 4)}{5 + 3 + j4 + 4} = 6 - j8 + \frac{5(7 + j4)}{12 + j4} = 9.125 - j7.375 \text{ Ом.}$$

3. Из схемы (рисунок 1.8) исключаем источники $\underline{I}_2$ и $\underline{E}_1$ (рисунок 1.10).

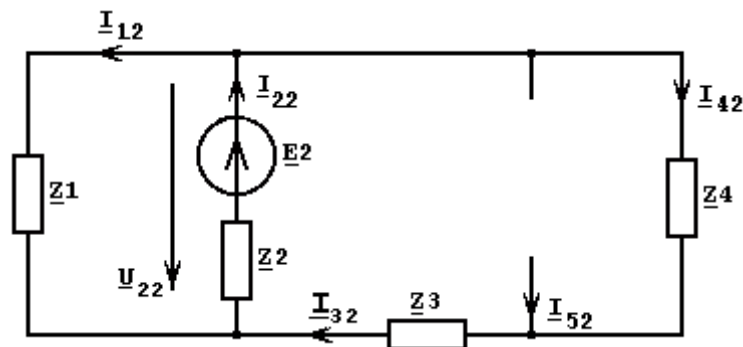


Рисунок 1.10

3.1. Указываем направления токов и напряжений в схеме (рисунок 1.10).

3.2. В полученной схеме элементы $\underline{Z}_4$ и $\underline{Z}_3$ соединены последовательно. Эквивалентное сопротивление этого участка цепи $\underline{Z}_{43} = \underline{Z}_4 + \underline{Z}_3 = 4 + 3 - j4 = 7 + j4 \text{ Ом.}$

3.3. Ток $\underline{I}_{42} = \underline{I}_{32} = \frac{\underline{U}_{22}}{\underline{Z}_{43}} = \frac{4.029 + j3.644}{7 + j4} = 0.658 + j0.144 \text{ A.}$

3.3.1. Используя второй закон Кирхгофа, можно записать $\underline{E}_2 = \underline{U}_{22} + \underline{I}_{22} \underline{Z}_2$, отсюда

$$\underline{U}_{22} = \underline{E}_2 - \underline{I}_{22} \underline{Z}_2 = 10 + j10 - (0.608 + j0.685) \cdot 5 = 4.029 + j3.644 \text{ V.}$$

3.3.2. Для определения тока I_{22} изобразим эквивалентную схему цепи (рисунок 1.11)

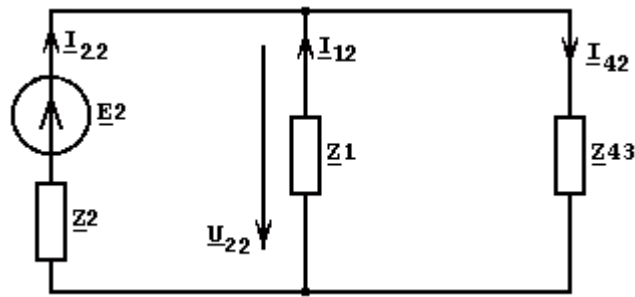


Рисунок 1.11

3.3.3. Комплексные сопротивления Z_2, Z_1 и Z_{43} образуют смешанное соединение элементов. Эквивалентное сопротивление при смешанном соединении определяется выражением

$$Z_{32} = Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_{43}}{Z_1 + Z_{43}} = 5 + \frac{(6 - j8) \cdot (7 + j4)}{6 - j8 + 7 + j4} = 10.892 - j0.649 \text{ Ом.}$$

3.3.4. По закону Ома
$$I_{22} = \frac{E_2}{Z_{32}} = \frac{10 + j10}{10.892 - j0.649} = 0.608 + j0.685 \text{ А.}$$

4. Из схемы рисунок 1.8 исключаем источники E_1 и E_2 (рисунок 1.12).

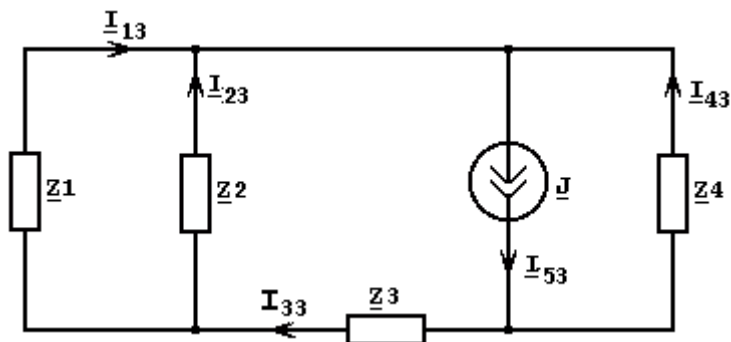


Рисунок 1.12

4.1. Указываем направления токов и напряжений в схеме (рисунок 1.12)

4.2. Комплексные сопротивления Z_2, Z_1 и Z_3 образуют смешанное соединение элементов (рисунок 1.12). Эквивалентное комплексное сопротивление этого участка цепи

$$Z_{33} = Z_3 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = 3 + j4 + \frac{(6 - j8) \cdot 5}{6 - j8 + 7 + j5} = 6.514 + j2.919 \text{ Ом.}$$

4.3. Ток $\underline{I}_{43}$ в схеме (рисунок 1.13) определим по правилу делителя тока

$$\underline{I}_{43} = \underline{I}_{53} \cdot \frac{\underline{Z}_{33}}{\underline{Z}_{33} + \underline{Z}_4} = \underline{J} \cdot \frac{\underline{Z}_{33}}{\underline{Z}_{33} + \underline{Z}_4} = 5 \cdot \frac{6.514 + j2.919}{6.514 + j2.919 + 4} = 3.234 + j0.49 \text{ A.}$$

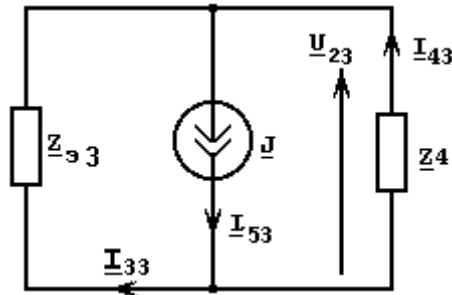


Рисунок 1.13

5. Используя принцип суперпозиции, находим ток в ветвях с элементом $\underline{Z}_4$ заданной схемы (рисунок 1.8)

$$\underline{I}_4 = \underline{I}_{41} + \underline{I}_{42} - \underline{I}_{43} = 0.947 + j0.354 + 0.658 + j0.144 - 3.234 - j0.49 = -1.629 + j8.262 \cdot 10^{-3} = 1.629 e^{j179.7^\circ} \text{ A}$$

6. Мгновенный ток

$$i_4 = \text{Im}_4 \sin(\omega t + \psi_i) = 1.629 \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + 179.7^\circ) = 2.304 \sin(\omega t + 179.7^\circ) \text{ A.}$$

2.1.4 Расчет цепи методом эквивалентного генератора

Рассчитать ток в ветви с сопротивлением $\underline{Z}_4$ электрической цепи (рисунок 1.8) методом эквивалентного генератора, если $\underline{Z}_1 = 6 - j8 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2 = 5 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_3 = 3 + j40 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_4 = 4 \text{ Ом}$, $\underline{E}_1 = 30 \text{ В}$, $\underline{E}_2 = 10 + j10 \text{ В}$, $\underline{J}_1 = 5 \text{ A}$.

2.1.4.1 Расчет цепи методом эквивалентного генератора напряжения

1. Эквивалентная схема для расчета тока в элементе $\underline{Z}_4$ имеет вид (рисунок 1.14).

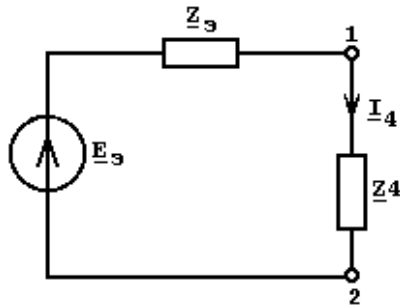


Рисунок 1.14

2. Определим параметры эквивалентного генератора напряжения $\underline{E}_3$ и $\underline{Z}_3$.

2.1. Находим $\underline{Z}_3$. Для этого из схемы (рисунок 1.8) исключаем все источники ЭДС ($\underline{E}_1$ и $\underline{E}_2$) и тока ($\underline{I}_1$) и элемент $\underline{Z}_4$ и определяем $\underline{Z}_3$ относительно узлов 1-2, к которым был подсоединен элемент $\underline{Z}_4$ (рисунок 1.15).

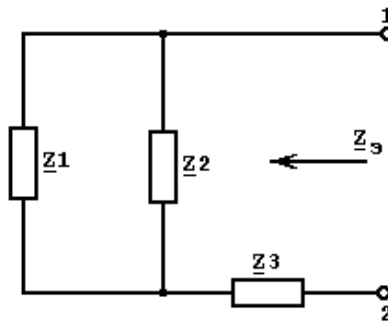


Рисунок 1.15

Элементы $\underline{Z}_1$, $\underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_3$ образуют смешанную схему соединения, следовательно,

$$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = 3 + j4 + \frac{(6 - j8) \cdot 5}{6 - j8 + 5} = 6.514 + j2.919 \text{ Ом.}$$

2.2. Находим $\underline{E}_3 = \underline{U}^{xx}$.

2.2.1. Схема для расчета $\underline{E}_3$ представлена на (рисунок 1.16)

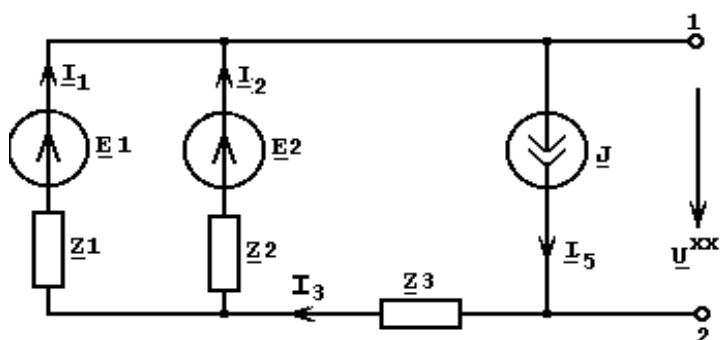


Рисунок 1.16

2.2.2. Указываем направления токов и напряжений в схеме (рисунок 1.16).

2.2.3. Напряжение $\underline{U}^{xx}$ определим по методу наложения.

2.2.3.1. Из схемы (рисунок 1.16) исключаем $\underline{E}_2$ и $\underline{J}$ и находим $\underline{U}^{xx}$ (рисунок 1.17).

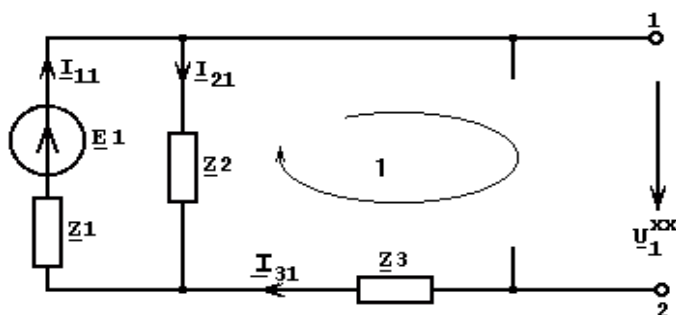


Рисунок 1.17

2.2.3.2. Для контура 1 (рисунок 1.17) в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать $\underline{U}_1^{xx} + \underline{I}_{31}\underline{Z}_3 - \underline{I}_{21}\underline{Z}_2 = 0$.

Ток $\underline{I}_{31} = 0$ из-за разрыва цепи на участке 1-2. Следовательно $\underline{U}_1^{xx} = \underline{I}_{21}\underline{Z}_2$.

Ток $\underline{I}_{21}$ определяется по закону Ома

$$\underline{I}_{21} = \frac{\underline{E}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{30}{6 - j8 + 5} = \frac{30}{11 - j8} = 1.784 + j1.297 \text{ A.}$$

Таким образом $\underline{U}_1^{xx} = \underline{I}_{21}\underline{Z}_2 = (1.784 + j1.297) \cdot 5 = 8.919 + j6.486 \text{ В.}$

2.2.3.3. Из схемы (рисунок 1.16) исключаем $\underline{E}_1$ и $\underline{J}_1$ и находим $\underline{U}_2^{xx}$ (рисунок 1.18)

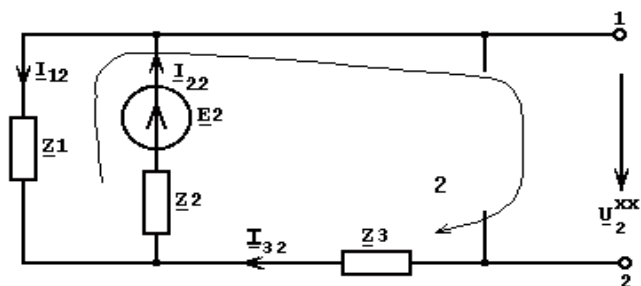


Рисунок 1.18

2.2.4. Для контура 2 (рисунок 1.18) в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать $\underline{U}_2^{xx} + I_{32} \cdot \underline{Z}_3 - I_{12} \underline{Z}_1 = 0$.

Ток $I_{32} = 0$ из-за разрыва цепи на участке 1-2. Следовательно $\underline{U}_2^{xx} = I_{12} \underline{Z}_1$.

Ток I_{12} определяется по закону Ома

$$I_{12} = \frac{\underline{E}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{10 + j10}{6 - j8 + 5} = \frac{10 + j10}{11 - j8} = 0.115 + j0.726 \text{ A.}$$

Таким образом $\underline{U}_2^{xx} = I_{12} \cdot \underline{Z}_1 = (0.115 + j0.726) \cdot (6 - j8) = 6.498 + j3.44 \text{ V.}$

2.2.4.1. Из схемы (рисунок 1.16) исключаем $\underline{E}_1$ и $\underline{E}_2$ и находим $\underline{U}_3^{xx}$ (рисунок 1.19).

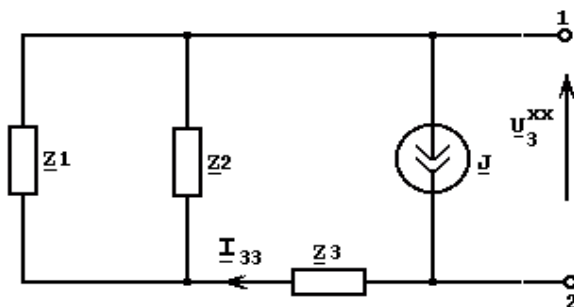


Рисунок 1.19

Элементы $\underline{Z}_3, \underline{Z}_2$ и $\underline{Z}_1$ образуют смешанную схему соединения (рисунок 1.19), следовательно, $\underline{Z}_{33} = \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = 3 + j4 + \frac{(6 - j8) \cdot 5}{6 - j8 + 5} = 6.514 + j2.919 \text{ Ом.}$

Упрощенная схема для рассматриваемого случая имеет вид (рисунок 1.20).

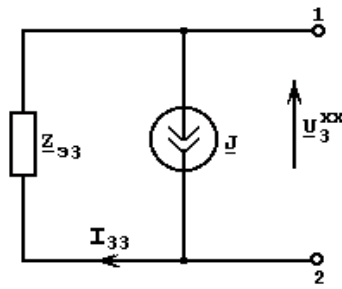


Рисунок 1.20

Из схемы (рисунок 1.20)

$$\underline{U}_3^{xx} = \underline{I}_{33} \underline{Z}_{33} = \underline{J} \cdot \underline{Z}_{33} = 5 \cdot (6.514 + j2.919) = 32.568 + j14.595 \text{ В.}$$

2.2.4.2. Напряжение $\underline{U}^{xx}$ находим, пользуясь принципом суперпозиции

$$\begin{aligned} \underline{U}^{xx} &= \underline{U}_1^{xx} + \underline{U}_2^{xx} - \underline{U}_3^{xx} = 8.919 + j6.486 + 6.498 + j3.44 - 32.568 - j14.595 = \\ &= -17.151 - j4.668 = 17.775 e^{-j165^\circ} \text{ В.} \end{aligned}$$

3. Ток в элементе Z_4 (см. рисунок 1.14) находим по закону Ома

$$\underline{I}_4 = \frac{\underline{U}^{xx}}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} = \frac{-17.151 - j4.688}{6.514 - j2.919 + 4} = -1.629 + j8.262 \cdot 10^{-3} \text{ А.}$$

2.1.4.2 Расчет цепи методом эквивалентного генератора тока

1. Эквивалентная схема для расчета тока $\underline{I}_4$ имеет вид (рисунок 1.21)

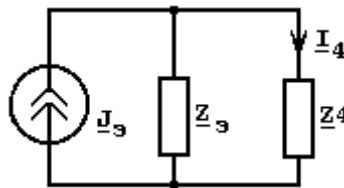


Рисунок 1.21

2. Определим параметры эквивалентного генератора тока $\underline{I}_3, \underline{Z}_3$.

2.1. Величина $\underline{Z}_3$ определяется по такому же алгоритму, как и в методе эквивалентного генератора напряжения (рисунок 1.15). Таким образом,

$$\underline{Z}_3 = \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = 3 + j4 + \frac{(6 - j8) \cdot 5}{6 - j8 + 5} = 6.514 + j2.919 \text{ Ом.}$$

2.2. Находим $\underline{I}_3 = \underline{I}_4^{k3}$ методом наложения.

2.2.1. Схема для расчета $\underline{I}_3$ представлена на рисунок 1.22

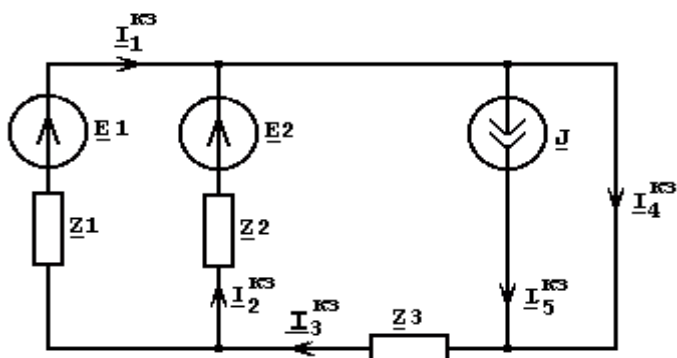


Рисунок 1.22

2.2.2. Указываем направления токов на схеме (рисунок 1.22)

2.2.3. Иключаем J и E_2 из схемы (рисунок 1.22) находим ток $I_{41}^{кз}$ (рисунок 1.23).

$$\text{Ток } I_{41}^{кз} = \frac{U_{21}}{Z_3} = \frac{3.263 + j7.003}{3 + j4} = 1.512 + j0.318 \text{ A.}$$

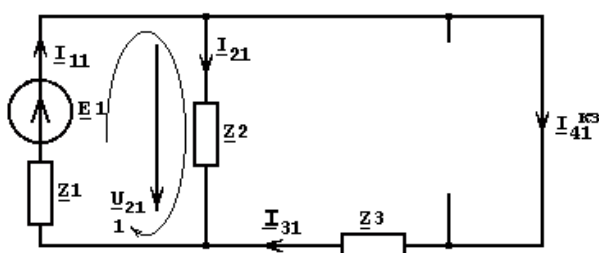


Рисунок 1.23

Напряжение U_{21} определим, используя второй закон Кирхгофа для контура 1 (рисунок 1.23)

$$U_{21} = E_1 - I_{11} Z_1 = 30 - (2.164 + j1.719) \cdot (6 - j8) = 3.263 + j7.003 \text{ V,}$$

$$\text{ток } I_{11} = \frac{E_1}{Z_{\text{э}1}} = \frac{30}{8.5 - j6.75} = 2.164 + j1.719 \text{ A,}$$

$$\text{сопротивление } Z_{\text{э}1} = Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3} = 6 - j8 + \frac{5 \cdot (3 + j4)}{5 + 3 + j4} = 8.5 - j6.75 \text{ Ом.}$$

2.2.4. Иключаем E_1 и J из схемы рисунок 1.22 и определяем ток $I_{42}^{кз}$ (рисунок 1.24).

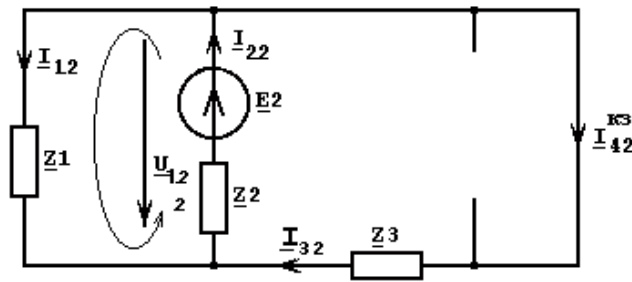


Рисунок 1.24

$$\text{Ток } I_{42}^{K3} = \frac{U_{12}}{Z_3} = \frac{2.813 + j4.314}{3 + j4} = 1.028 + j0.068 \text{ A.}$$

Напряжение U_{12} определим, используя второй закон Кирхгофа для контура 2 (рисунок 1.24)

$$U_{12} = E_2 - I_{22} \cdot Z_2 = 10 + j10 - (0.852 + j0.551) \cdot 5 = 2.813 + j4.314 \text{ B,}$$

$$\text{ток } I_{22} = \frac{E_2}{Z_{32}} = \frac{10 + j10}{9.639 + j2.062} = 0.852 + j0.551 \text{ A,}$$

$$\text{сопротивление } Z_{32} = Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_3}{Z_1 + Z_3} = 5 + \frac{(6 - j8) \cdot (3 + j4)}{6 - j8 + 3 + j4} = 9.639 + j2.062 \text{ Ом.}$$

2.2.5. Исключаем из схемы (рисунок 1.22) E_1 и E_3 и определяем ток I_{43}^{K3} (рисунок 1.25).

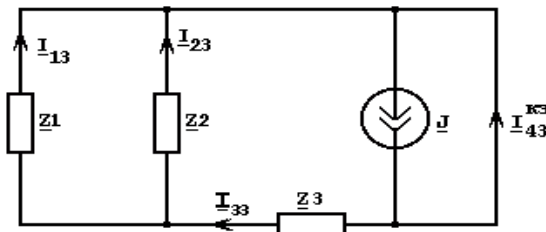


Рисунок 1.25

Участок цепи, содержащий элементы Z_1, Z_2 и Z_3 (рисунок 1.25) соединен параллельно с проводником, сопротивление которого равно нулю. Эквивалентное сопротивление такой цепи равно нулю. Упрощенная схема для рассматриваемого случая имеет вид (рисунок 1.26).



Рисунок 1.26

Из схемы (рисунок 1.26) $\underline{I}_{43}^{K3} = \underline{J} = 5 \text{ A}$.

2.2.6. Ток $\underline{I}_4^{K3} = \underline{I}_{41}^{K3} + \underline{I}_{42}^{K3} - \underline{I}_{43}^{K3} = 1.512 + j0.318 + 1.028 + j0.068 - 5 = -2.46 + j0.386 \text{ A}$.

3. Ток в элементе $\underline{Z}_4$ (рисунок 1.21) находим, используя правило делителя тока

$$\begin{aligned} \underline{I}_4 &= \underline{J}_3 \cdot \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} = \underline{I}_4^{K3} \cdot \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_4} = (-2.46 + j0.386) \cdot \frac{6.314 + j2.919}{6.314 + j2.919 + 4} = \\ &= -1.629 + j8.262 \cdot 10^{-3} = 1.629 e^{j179.7^\circ} \text{ A}. \end{aligned}$$

4. Мгновенный ток

$$i_4 = \text{Im}_4 \sin(\omega t + \psi_i) = 1.629 \sqrt{2} \sin(\omega t + 179.7^\circ) = 2.304 \sin(\omega t + 179.7^\circ) \text{ A}.$$

2.2 Анализ трехфазных электрических цепей

2.2.1 Расчет трехфазной цепи соединение по схеме «звезда с нейтральным проводом»

Схема трехфазной цепи соединение по схеме «звезда с нейтральным проводом» представлена на рисунке 2.1

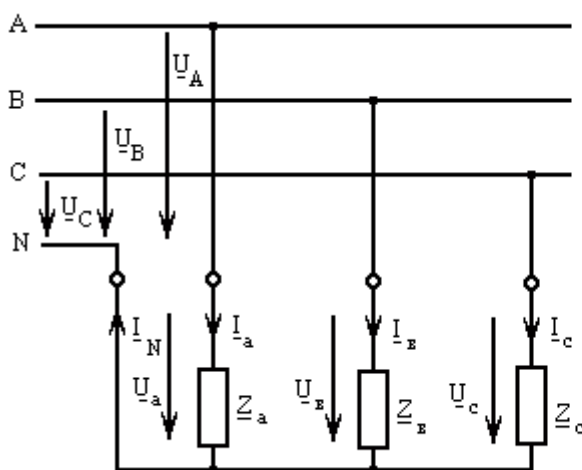


Рисунок 2.1 - Соединение фаз приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»

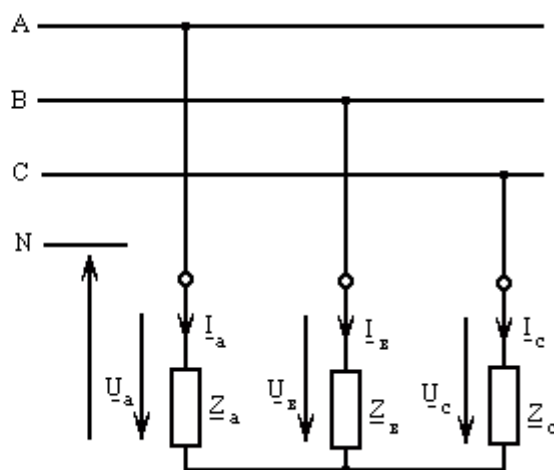


Рисунок 2.2 - Соединение фаз приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»

8. Определяем комплексные напряжения на фазах симметричного трехфазного источника (синхронного генератора)

$$\underline{U}_A = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j^0} = \frac{220}{1.73} e^{j^0} = 127 e^{j^0} \text{ В},$$

$$\underline{U}_B = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{-j120^0} = \frac{220}{1.73} (\cos 120^0 - j \sin 120^0) = -63.5 - j110 \text{ В},$$

$$\underline{U}_C = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j120^0} = \frac{220}{1.73} (\cos 120^0 + j \sin 120^0) = -63.5 + j110 \text{ В},$$

9. Определяем комплексные напряжения на фазах приемника. Так как сопротивление соединительных проводов (линейных и нейтрального) равно нулю, то

$$\underline{U}_A = \underline{U}_a = 127 \text{ В}, \quad \underline{U}_B = \underline{U}_b = 127 e^{-j120^0} \text{ В}, \quad \underline{U}_C = \underline{U}_c = 127 e^{j120^0} \text{ В}.$$

10. Определяем комплексные токи в фазах приемника, используя закон

Ома для участка цепи $\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{127 e^{j^0}}{10} = 12.7 e^{j^0} = 12.7 \text{ А}$

$$\underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{127 e^{-j120^0}}{20 e^{-j90^0}} = 6.35 e^{-j30^0} = 5.5 - j3.175 \text{ А}.$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{127 e^{j120^0}}{30 e^{j90^0}} = 4.23 e^{j30^0} = 3.667 + j2.117 \text{ А}.$$

11. Комплексный ток в нейтральном проводе определим, используя первый закон Кирхгофа:

$$\underline{I}_N = \underline{I}_a + \underline{I}_b + \underline{I}_c = 12.7 + 5.5 - j3.175 + 3.667 + j2.117 = 21.868 - j1.058 = 21.894 e^{-j2.8^0} \text{ А}.$$

12. Комплексные междуфазные (линейные) напряжения на приемнике определим, используя второй закон Кирхгофа

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b = 127 + 63.509 + j110 = 190.5 + j110 = 220 e^{j30^0} \text{ В}.$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c = -63.509 - j110 + 63.509 - j110 = -j220 = 220 e^{-j90^0} \text{ В}.$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a = -63.509 + j110 - 127 = -190.5 + j110 = 220 e^{j150^0} \text{ В}.$$

13. Векторная диаграмма токов и напряжений представлена на рисунке 2.3

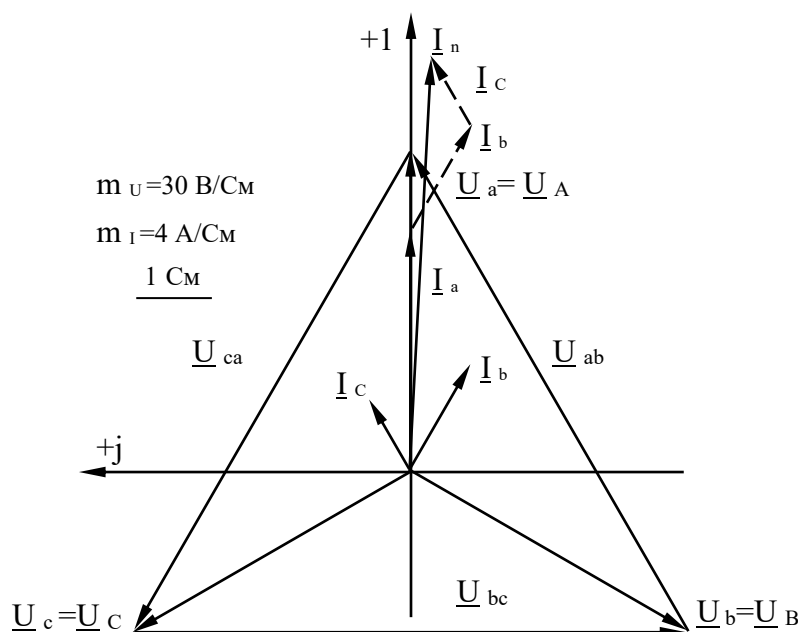


Рисунок 2.3

14. Рассчитаем комплексную мощность, потребляемую трехфазным приемником

$$\underline{S} = \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^* = 127 \cdot 12.7 + 127e^{-j120^\circ} \cdot 6.351e^{-j30^\circ} + 127e^{j120^\circ} \cdot 4.234e^{-j30^\circ} = 1613 - j269 \text{ ВА.}$$

2.2.2 Расчет трехфазной цепи соединение по схеме «звезда при обрыве нейтрального провода»

9. Определяем комплексные напряжения на фазах симметричной трехфазной цепи

$$\underline{U}_A = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j^0} = \frac{220}{1.73} e^{j^0} = 127e^{j^0} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_B = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{-j120^\circ} = \frac{220}{1.73} e^{-j120^\circ} = 127e^{-j120^\circ} \text{ В,}$$

$$\underline{U}_C = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j120^\circ} = \frac{220}{1.73} e^{j120^\circ} = 127e^{j120^\circ} \text{ В.}$$

10. Определяем комплексные проводимости фаз приемника

$$\underline{Y}_a = \frac{1}{\underline{Z}_a} = \frac{1}{10} = 0.1 \text{ См,} \quad \underline{Y}_b = \frac{1}{\underline{Z}_b} = \frac{1}{-j20} = 0.05e^{j90^\circ} = j0.05 \text{ См,}$$

$$\underline{Y}_c = \frac{1}{\underline{Z}_c} = \frac{1}{j30} = 0.033e^{-j90^\circ} = -j0.033 \text{ См.}$$

11. Определяем напряжение смещения нейтрали (напряжение между нейтральными точками сети и приемника)

$$\underline{U}_{nN} = \frac{\underline{U}_A \cdot \underline{Y}_a + \underline{U}_B \cdot \underline{Y}_b + \underline{U}_C \cdot \underline{Y}_c}{\underline{Y}_a + \underline{Y}_b + \underline{Y}_c} = \frac{127e^{j^0} \cdot 0.1 + 127e^{-j120^0} \cdot 0.05e^{j90^0} + 127e^{j120^0}}{0.1 + j0.05 - j0.033} =$$

$$= 211.057 - j45.761 = 215.96e^{-j12.23^0} \text{ В.}$$

12. Определяем комплексные напряжения на фазах приемника

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN} = 127 - 211.057 + j45.761 = -84.04 + j45.76 = 95.69e^{j151^0} \text{ В}$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} = -63.509 - j110 - 211.057 + j45.761 = -274.565 - j64.239 =$$

$$= 281.98e^{-j167^0} \text{ В}$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} = -63.509 + j110 - 211.057 + j45.761 = -274.565 + 155.76 = 315.67e^{j150^0} \text{ В.}$$

13. Рассчитываем комплексные токи в фазах приемника, используя закон Ома

$$\underline{I}_a = \underline{U}_a \underline{Y}_a = 95.69e^{j151^0} \cdot 0.1 = 9.569e^{j151^0} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_b = \underline{U}_b \underline{Y}_b = 281.98e^{-j167^0} \cdot 0.05e^{j90^0} = 14.1e^{-j77^0} \text{ А,}$$

$$\underline{I}_c = \underline{U}_c \underline{Y}_c = 315.67e^{j150^0} \cdot 0.33 \cdot e^{-j90^0} = 10.5e^{j60^0} \text{ А.}$$

14. Используя второй закон Кирхгофа, определим междуфазные (линейные) напряжения на приемнике

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b = -84.04 + j45.76 + 274.565 - j64.239 = 190.526 + j110 = 220e^{j30^0} \text{ В}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c = -274.565 - j64.239 + 274.565 - j155.761 = -j220 = 220e^{-j90^0} \text{ В}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a = -274.565 + j155.761 + 84.04 - j45.761 = -190.526 + j110 = 220e^{j150^0} \text{ В.}$$

15. По результатам расчетов токов и напряжений строим векторные диаграммы токов и напряжений (рисунок 2.4)

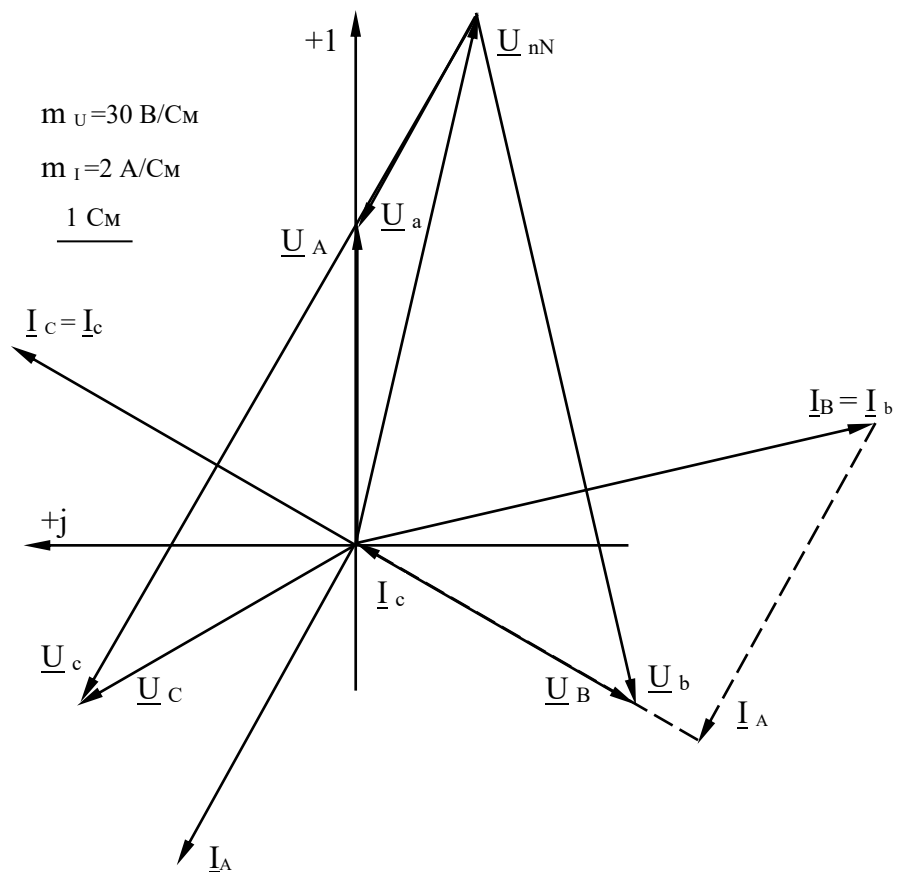


Рисунок 2.4

16. Рассчитаем мощность, потребляемую трехфазным приемником

$$\underline{S} = \underline{U}_a^* \underline{I}_a + \underline{U}_b^* \underline{I}_b + \underline{U}_c^* \underline{I}_c = 95.691e^{j151^\circ} \cdot 9.569e^{-j151^\circ} + 281.98e^{-j167^\circ} \cdot 14.1e^{j76.8^\circ} + 315.67e^{-j150^\circ} \cdot 10.522e^{-j60^\circ} = 915.676 - j654.054 \text{ ВА}$$

2.2.3. Расчет трехфазной цепи соединения по схеме «звезда без нейтрального провода» при коротком замыкании фазы «а» приемника

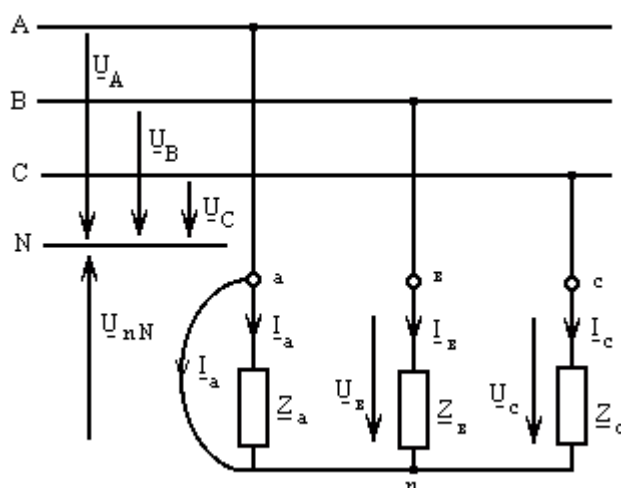


Рисунок 2.5 - Соединение фаз приемника по схеме «звезда без нейтрального провода» и коротком замыкании фазы «а» приемника

9. Определяем комплексные напряжения на фазах симметричной трехфазной цепи $\underline{U}_A = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j^0}$ $\underline{U}_B = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{-j120^0}$ $\underline{U}_C = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j120^0}$

10. Напряжение смещения определяется значением комплексного напряжения фазы сети, к которой подсоединена закороченная фаза приемника. В рассматриваемом случае

$$\underline{U}_{nN} = \underline{U}_A = 127e^{j^0} = 127 \text{ В.}$$

11. Определяем комплексные напряжения на фазах приемника

$$\underline{U}_a = \underline{U}_A - \underline{U}_{nN} = 127 - 127 = 0 \text{ В}$$

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} = -63.509 - j110 - 127 = -190.526 - j110 = 220e^{-j150^0} \text{ В}$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} = -63.509 + j110 - 127 = -190.526 + j110 = 220e^{j150^0} \text{ В}$$

12. Комплексные токи в фазах, рассчитываем, используя закон Ома

$$\underline{I}_a = \frac{\underline{U}_a}{\underline{Z}_a} = \frac{0}{10} = 0 \text{ А, } \underline{I}_b = \frac{\underline{U}_b}{\underline{Z}_b} = \frac{220e^{-j150^0}}{-j20} = 11e^{-j60^0} = 5.5 - j9.526 \text{ А}$$

$$\underline{I}_c = \frac{\underline{U}_c}{\underline{Z}_c} = \frac{220e^{j150^0}}{j30} = 7.333e^{j60^0} = 3.667 + j6.351 \text{ А.}$$

13. Комплексные токи, в линейном проводе «А» определим, используя первый закон Кирхгофа

$$\underline{I}_A = -\underline{I}_b - \underline{I}_c = -5.5 + j9.526 - 3.667 - j6.351 = -9.167 + j3.175 = 9.7e^{j161^0} \text{ А}$$

Комплексные токи в линейных проводах В и С равны фазным, т.е.

$$\underline{I}_B = \underline{I}_b = 11e^{-j60^0} \text{ А, } \underline{I}_C = \underline{I}_c = 7.333e^{j60^0} \text{ А}$$

14. Междофазные (линейные) напряжения на приемнике, определим используя второй закон Кирхгофа

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_a - \underline{U}_b = 0 + 190.526 + j110 = 220e^{j30^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_{bc} = \underline{U}_b - \underline{U}_c = -190.525 - j110 + 190.526 - j110 = -j220 = 220e^{j90^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{U}_c - \underline{U}_a = -190.526 + j110 - 0 = 220e^{j150^\circ} \text{ В.}$$

15. Векторная диаграмма токов и напряжений представлена на рисунке 2.6

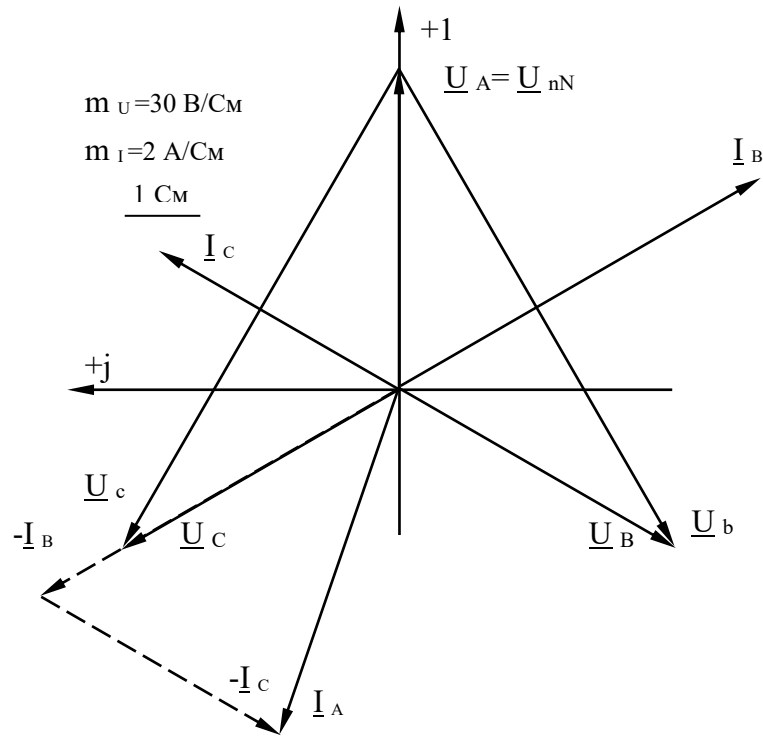


Рисунок 2.6

16. Рассчитываем мощность, потребляемую трехфазным приемником:

$$\underline{S} = \underline{U}_a^* \underline{I}_a + \underline{U}_b^* \underline{I}_b + \underline{U}_c^* \underline{I}_c = 220e^{-j150^\circ} 11e^{-j60^\circ} + 220e^{j150^\circ} \cdot 7.333e^{j60^\circ} = -j806.667 \text{ ВА}$$

2.2.4 Расчет трехфазной цепи соединения фаз приемника по схеме «треугольник»

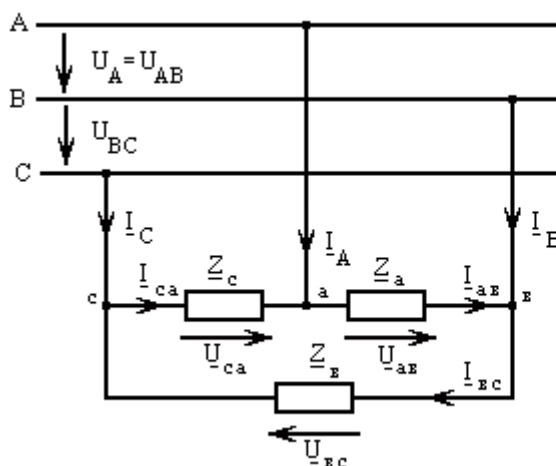


Рисунок 2.7 - Соединение фаз приемника по схеме «треугольник»

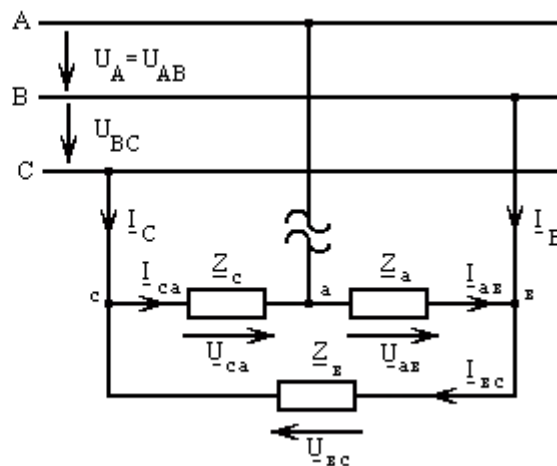


Рисунок 2.8 - Соединение фаз приемника по схеме «треугольник» и обрыве линейного провода «А»

10. Определяем комплексные линейные напряжения симметричной трехфазной цепи $\underline{U}_{AB} = U_{\text{л}} e^{j^0} = 220 e^{j^0} = 220 \text{ В},$

$$\underline{U}_{BC} = U_{\text{л}} e^{j120^0} = 220 e^{-j120^0} = -110 - j190.526 \text{ В}$$

$$\underline{U}_{CA} = U_{\text{л}} e^{j120^0} = 220 e^{j120^0} = -110 + j190.526 \text{ В.}$$

11. Комплексные напряжения на фазах приемника при условии, что сопротивления соединительных (линейных) проводов равны нулю, будут определяться соответствующими комплексными линейными напряжениями:

$$\underline{U}_{ab} = \underline{U}_{AB} = 220 \text{ В}, \quad \underline{U}_{bc} = \underline{U}_{BC} = 220 e^{-j120^0} \text{ В}, \quad \underline{U}_{cb} = \underline{U}_{CA} = 220 e^{j120^0} \text{ В.}$$

12. Комплексные токи в фазах приемника определим, используя закон Ома:

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_a} = \frac{220 e^{j^0}}{10} = 22 e^{j^0} \text{ А} = 22 \text{ А}$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_b} = \frac{220 e^{-j120^0}}{-j20} = 11 e^{-j30^0} = 9.526 - j5.5 \text{ А}$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{\underline{U}_{ca}}{\underline{Z}_b} = \frac{220 e^{j120^0}}{j30} = 7.33 e^{j30^0} = 6.351 + j3.667 \text{ А}$$

13. Комплексные токи в линейных проводах определим, пользуясь первым законом Кирхгофа

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 22 - 6.351 - j3.667 = 15.649 - j3.667 = 16.073e^{-j13^0} \text{ A}$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 9.526 - j5.5 - 22 = -12.474 - j5.5 = 13.632e^{-j156^0} \text{ A}$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 6.351 + j3.667 - 9.526 + j5.5 = -3.175 + j9.167 = 9.7e^{j109^0} \text{ A.}$$

14. По результатам расчетов строим векторную диаграмму токов и напряжений (рисунок 2.9).

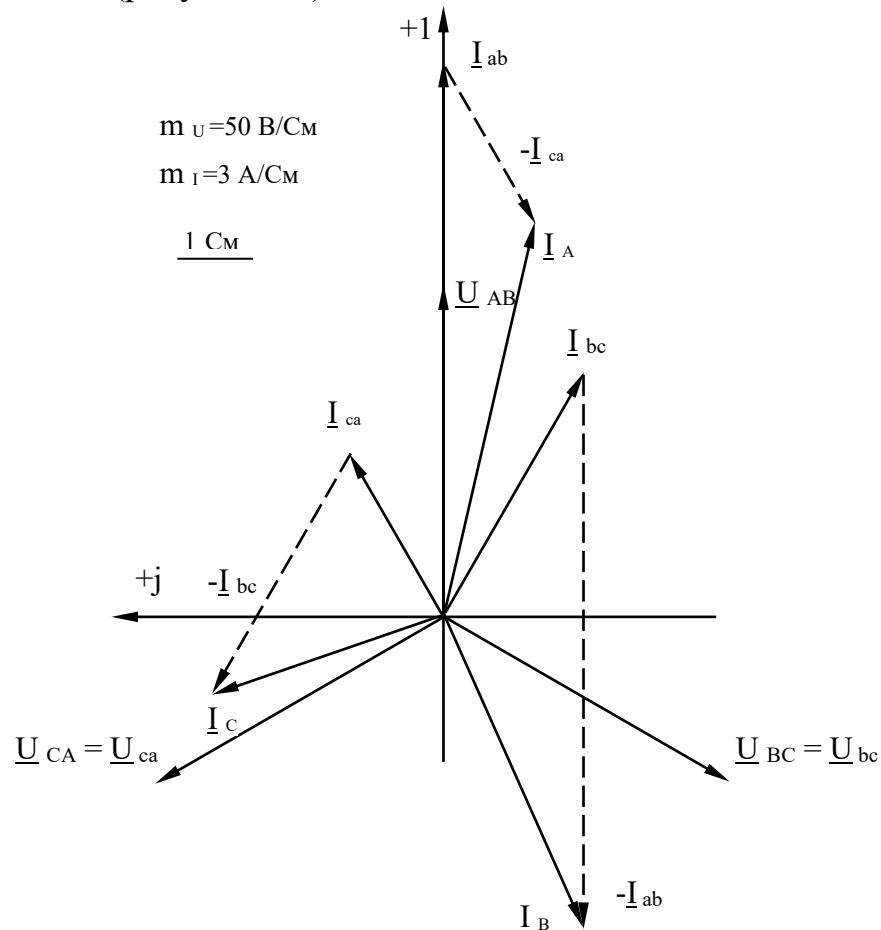


Рисунок 2.9

15. Рассчитываем комплексную мощность, потребляемую трехфазным приемником

$$\underline{S} = \underline{U}_{ab} \underline{I}_{ab}^* + \underline{U}_{bc} \underline{I}_{bc}^* + \underline{U}_{ca} \underline{I}_{ca}^* = 220.22 + 220e^{-j120^0} \cdot 11e^{j30^0} + 220e^{j120^0} \cdot 7.33e^{-j30^0} = 4840 - j806.667 \text{ ВА.}$$

2.2.5 Расчет трехфазной цепи соединения фаз приемника по схеме «треугольник» при обрыве линейного провода «А»

1. Изображаем схему цепи при обрыве линейного провода (рисунок 2.8). Условно-положительные направления токов в фазах указываем как и в схеме рисунок 2.7. Из анализа схемы (рисунок 2.8) следует, что комплексное напряжение на фазе «в» приемника $\underline{Z}_b$ равно фазному напряжению $\underline{U}_{bc} = 220e^{-j120^\circ}$ В. При этом фазы $\underline{Z}_a$ и $\underline{Z}_c$ приемника оказываются соединенными друг с другом последовательно и напряжение на этом участке равно $\underline{U}_{bc} = 220e^{-j120^\circ}$ В.

2. Используя закон Ома, рассчитаем токи в фазах приемника

$$\underline{I}_{ab} = -\frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_c} = -\frac{220e^{-j120^\circ}}{10 + j30} = 6.957e^{-j11.6^\circ} = 6.816 - j1.395 \text{ A}$$

$$\underline{I}_{bc} = \frac{\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_b} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{-j20} = 11e^{-j30^\circ} = 9.526 - j5.5 \text{ A}$$

$$\underline{I}_{ca} = \frac{-\underline{U}_{bc}}{\underline{Z}_a + \underline{Z}_c} = -\frac{220e^{-j120^\circ}}{10 + j30} = 6.957e^{-j11.6^\circ} = 6.816 - j1.395 \text{ A}.$$

3. Комплексные токи в линейных проводах определяем по первому закону Кирхгофа

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{ab} - \underline{I}_{ca} = 0$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{bc} - \underline{I}_{ab} = 9.526 - j5.5 - 6.816 + j1.395 = 2.711 - j4.105 = 4.919e^{-j56.5^\circ} \text{ A}.$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{ca} - \underline{I}_{bc} = 6.816 - j1.395 - 9.526 + j5.5 = -2.711 + j4.105 = 4.919e^{j123^\circ} \text{ A}.$$

4. Комплексные напряжения на фазах приемника «а» и «с» определим по закону Ома

$$\underline{U}_{ab} = \underline{I}_{ab} \cdot \underline{Z}_a = 6.957e^{-j11.6^\circ} \cdot 10 = 69e^{-j11.6^\circ} = 68.158 - j13.947 \text{ В}$$

$$\underline{U}_{ca} = \underline{I}_{ca} \cdot \underline{Z}_c = 6.957e^{-j11.6^\circ} \cdot 30e^{j90^\circ} = 208.71e^{j78.4^\circ} = 41.842 + j204.473 \text{ В}.$$

5. Комплексная мощность, потребляемая приемником

$$\underline{S} = |\underline{I}_{ab}|^2 (\underline{Z}_a + \underline{Z}_c) + |\underline{I}_{bc}|^2 \underline{Z}_b = 6.957^2 (10 + j30) + 11^2 (-j20) = 484 - j968 \text{ ВА}.$$

6. Полная мощность, потребляемая приемником

$$S = |\underline{S}| = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{484^2 + 968^2} = 1082 \text{ ВА}.$$

16. Векторную диаграмму токов и напряжений строим по результатам расчетов (рисунок 2.10)

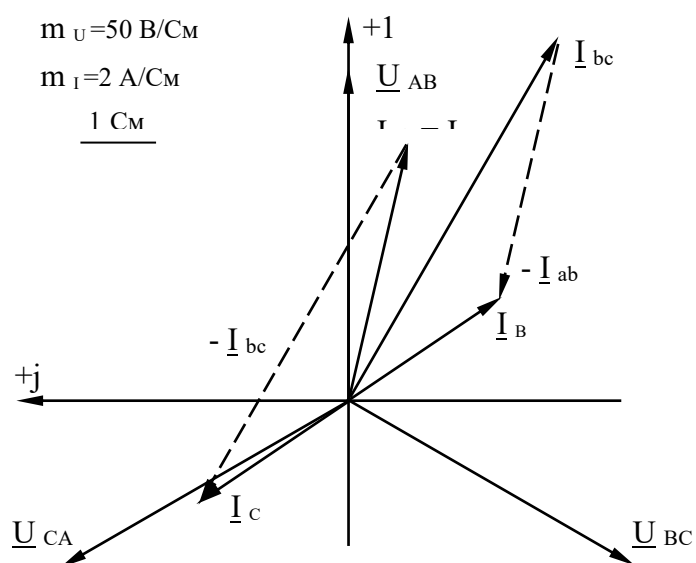


Рисунок 2.10

2.3 Анализ переходных процессов в линейных электрических цепях

В электрической цепи (рисунок 3.1) рассчитать и построить графики переходных тока $i(t)$ и напряжения на реактивном элементе $u(t)$, если $R_1=0.2\text{кОм}$, $R_2=0.2\text{кОм}$, $C=20\text{ пФ}$, $E=20\text{ В}$.

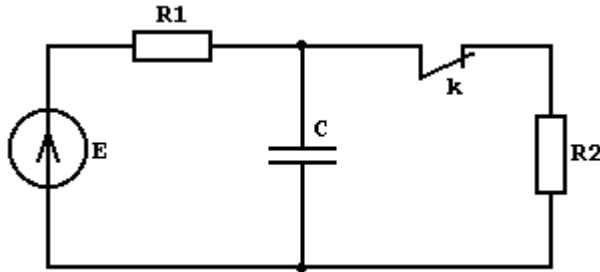


Рисунок 3.1

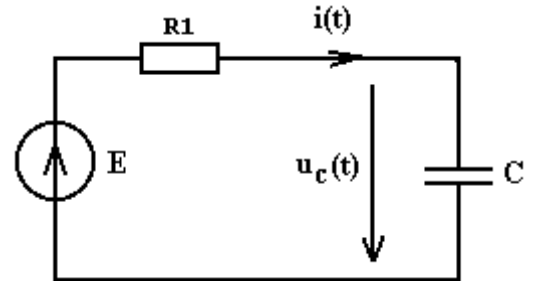


Рисунок 3.2

2.3.1 Анализ переходных процессов классическим методом

Решение

1. В заданной электрической цепи (рисунок 3.1) содержится только один емкостный элемент, в электрическом поле которого может апасаться энергия, поэтому для определения начальных условий используется второй закон коммутации, согласно которому

$$u_c(+0) = u_c(-0) = u_c(0) = \frac{E \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{E \cdot 200}{400} = \frac{E}{2} = \frac{20}{2} = 10 \text{ В.} \quad (3.1)$$

2. Составим уравнение для напряжений согласно второму закону Кирхгофа для схемы после коммутации в цепи (рисунок 3.2) $u_{R1} + u_c = E$ или

$$R_1 i + u_c = E, \quad R_1 C \frac{du_c}{dt} + u_c = E \quad (3.2)$$

3. Переходное напряжение определим как $u_c(t) = u_c^{cb} + u_c^{уст}$ (3.3).

4. $u_c^{уст}$ находим из уравнения (3.2) при $\frac{du_c}{dt} = 0$, т.е. $u_c^{уст} = E = 20 \text{ В}$.

5. $u_c^{cb}(t) = Ae^{st}$ - общее решение однородного линейного уравнения

$$R_1 C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0$$

Для определения корня s составим характеристическое уравнение $R_1 C \cdot s + 1 = 0$

$$\text{Отсюда } s = -\frac{1}{R_1 C} = -\frac{1}{200 \cdot 2 \cdot 10^{-12}} = -\frac{1}{4 \cdot 10^{-10}} = -25 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}.$$

Постоянную A находим из уравнения (3.3) с учетом начальных условий

$$u_c(0) = u_c^{уст}(0) + u_c^{cb}(0), \quad \frac{E}{2} = E + Ae^{s \cdot 0}, \quad A = -\frac{E}{2} = -10 \text{ В},$$

следовательно $u_c^{cb}(t) = -\frac{E}{2} e^{-\frac{t}{R_1 C}} = -\frac{E}{2} e^{-\frac{t}{\tau}} = -10 e^{-\frac{t}{4 \cdot 10^{-10}}} = -10 \cdot e^{-25 \cdot 10^8 t}$

В.

Здесь $\tau = R_1 C = 4 \cdot 10^{-10}$ с, τ - постоянная времени цепи.

6. Переходное напряжение

$$u_c(t) = u_c^{уст} + u_c^{cb} = E - \frac{E}{2} \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} = E \left(1 - 0.5 \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} \right) = 20 \left(1 - 0.5 \cdot e^{-25 \cdot 10^8 \cdot t} \right) \text{ В.}$$

7.

Переходный

ток

$$i(t) = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{d}{dt} \left(E - \frac{E}{2} \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} \right) = -C \cdot \frac{E}{2} \cdot \left(-\frac{1}{R_1 C} \right) \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \frac{E}{R_1} \cdot e^{-\frac{t}{R_1 C}} = \frac{20}{2 \cdot 200} e^{-25 \cdot 10^8 \cdot t} = 0.05 e^{-25 \cdot 10^8 t} \text{ А.}$$

8. Для построения графиков $i(t)$ и $u_c(t)$ выполним расчеты (таблица 1)

Таблица 1- Результаты расчетов переходных токов и напряжений

$t \cdot 10^{-10}, \text{ с}$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
t/τ	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$e^{-t/\tau}$	1	0.61	0.37	0.22	0.14	0.08	0.05	0.03	0.018	0.011	0.007
$i(t), \text{ мА}$	0.05	0.03	0.018	0.011	0.007	0.004	0.0025	0.002	0.001	0.0005	0.0003
$u(t), \text{ В}$	10	14	16	17.8	18.6	19.2	19.5	19.7	19.8	19.89	19.9

9. Строим графики $u_c(t)$ и $i(t)$

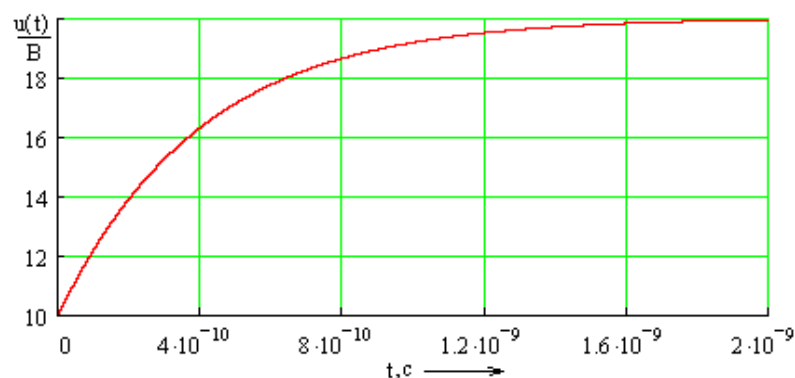


Рисунок 3.3

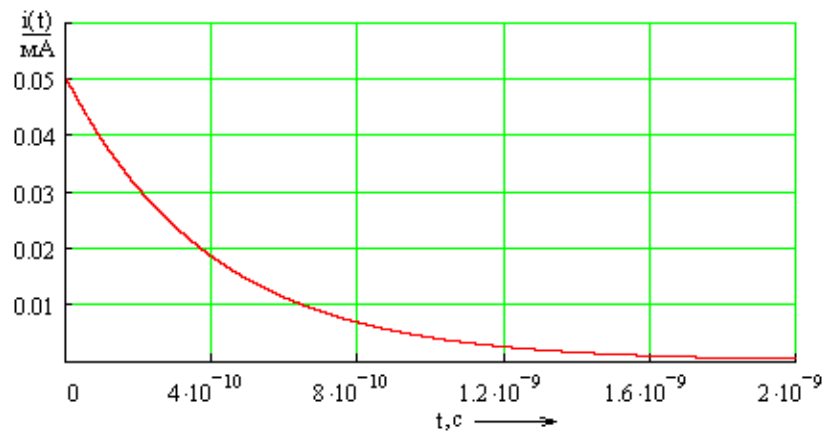


Рисунок 3.4

2.3.2 Анализ переходных процессов операторным методом

Решение

1. В заданной электрической цепи (рисунок 3.1) определяем начальные условия по второму закону коммутации $u_c(0) = \frac{ER_1}{R_1 + R_2} = 10 \text{ В}$.

2. Составляем операторную схему замещения (рисунок 3.5) при условии что ключ "к" в электрической цепи (рисунок 3.1) разомкнут

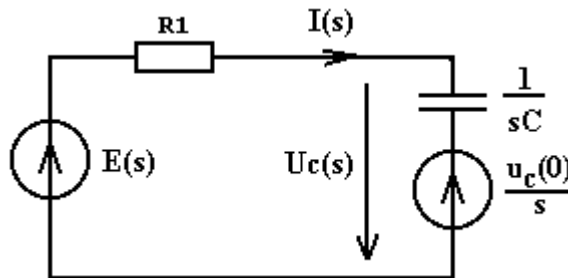


Рисунок 3.5

3. По закону Ома в операторной форме находим $I(s) = \frac{E(s) - \frac{u_c(0)}{s}}{Z(s)} = \frac{\frac{E}{s} - \frac{u_c(0)}{s}}{\left(R_1 + \frac{1}{sC}\right)}$

4. Преобразуем выражение для операторного тока $I(s)$ в форму, удобную для табличного преобразования по Лапласу (см. табл.2 п.4).

$$I(s) = \frac{\frac{E}{s} - \frac{u_c(0)}{s}}{\left(R_1 + \frac{1}{sC}\right)} = \frac{E - u_c(0)}{\frac{sRC + 1}{C}} = \frac{E - u_c(0)}{R\left(s + \frac{1}{RC}\right)} = \frac{1}{200} \cdot \frac{10}{s + 25 \cdot 10^8}$$

5. По таблице преобразования Лапласа (см. табл.2 п.4), используя при этом также свойство линейности преобразования Лапласа, находим переходный ток $i(t) = 0.05e^{-25 \cdot 10^8 t}$ А.

6. Переходное напряжение определим, используя второй закон Кирхгофа для цепи (рисунок 3.6)

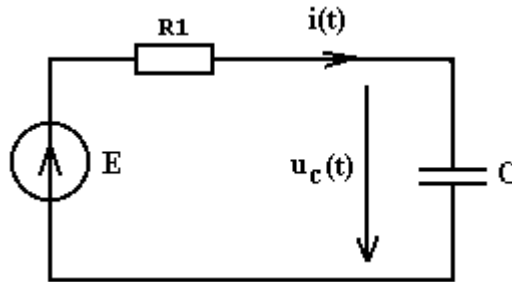


Рисунок 3.6

$$u_c(t) = u(t) = E - R_1 i(t) = 20 - 200 \cdot 0.05 \left(e^{-25 \cdot 10^8 t} \right) = 20 - 10e^{-25 \cdot 10^8 t} \text{ В.}$$

7. Для построения графиков $i(t)$ и $u(t)$ выполним расчеты, и результаты представим в таблице 3

I. Таблица 2-Таблица преобразований Лапласа

№ п/п	$F(s)$	$f(t), (t > 0)$
1	1	$\delta(t)$
2	$\frac{1}{s}$	1
3	$\frac{A}{s}$	A
4	$\frac{1}{s + a}$	e^{-at}
5	$\frac{s}{s + a}$	$\delta(t) - ae^{-at}$
6	$\frac{1}{s(s + a)}$	$\frac{1}{a}(1 - e^{-at})$
7	$\frac{1}{(s + a)(s + b)}$	$\frac{1}{b - a}(e^{-at} - e^{-bt})$

8	$\frac{s}{(s+a)(s+b)}$	$\frac{1}{a-b}(ae^{-at} - be^{-bt})$
9	$\frac{1}{(s+a)^2}$	te^{-at}
10	$\frac{s}{(s+a)^2}$	$e^{-at}(1-at)$
11	$\frac{1}{s(s+a)^2}$	$\frac{1}{a^2}(1 - e^{-at} - ate^{-at})$
12	$\frac{1}{s(s+a)(s+b)}$	$\frac{1}{ab(a-b)}[(a-b) + be^{-at} - ae^{-bt}]$
13	$\frac{1}{s^2 + a^2}$	$\frac{1}{a} \sin at$
14	$\frac{s}{s^2 + a^2}$	$\cos at$
15	$\frac{1}{s(s^2 + a^2)}$	$\frac{1}{a^2}(1 - \cos at)$
16	$\frac{1}{(s+b)^2 + a^2}$	$\frac{1}{a} e^{-bt} \sin at$
17	$\frac{s}{(s+b)^2 + a^2}$	$e^{-bt}(\cos at - \frac{b}{a} \sin at)$
18	$\frac{1}{s((s+b)^2 + a^2)}$	$\frac{1}{a^2 + b^2} \left[1 - e^{-bt} \left(\cos at + \frac{b}{a} \sin at \right) \right]$

Таблица 3- Результаты расчета переходного тока и переходного напряжения

$t \times 10^{-10}, \text{с}$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
t/τ	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$e^{-t/\tau}$	1	0.61	0.37	0.22	0.14	0.08	0.05	0.03	0.018	0.011	0.007
$i(t), \text{мА}$	0.05	0.03	0.018	0.011	0.007	0.004	0.0025	0.002	0.001	0.0005	0.0003
$u(t), \text{В}$	10	14	16	17.8	18.6	19.2	19.5	19.7	19.8	19.89	19.9

8. Строим графики $u(t)$ и $i(t)$

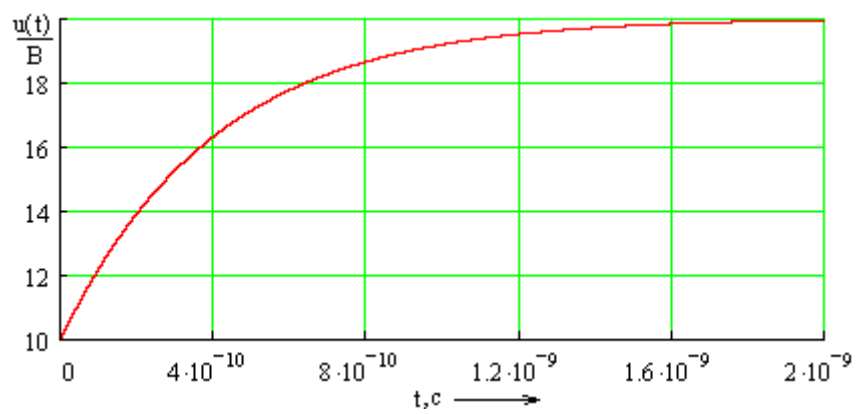


Рисунок 3.7

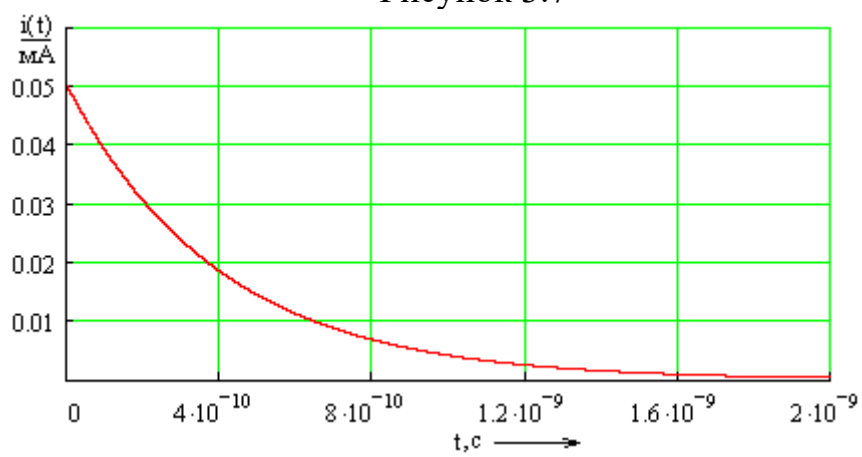


Рисунок 3.8

3 Требования к оформлению курсовой работы

Пояснительная записка оформляется на листах формата А4 в рукописном варианте.

При оформлении соблюдать требования, предъявляемые к пояснительным запискам квалификационных работ.

Таблицы, схемы, графики выполняются в соответствии с требованиями ГОСТ.

Запись формул выполнять по требованиям ГОСТ.

Буквенные обозначения физических величин должны соответствовать требованиям ГОСТ.

Пояснительная записка представляется на проверку за 3-4 дня до даты защиты курсовой работы.

4 Вопросы для защиты курсовой работы

4.1 Основные понятия и определения

1. Ток, напряжение, ЭДС, мощность.
2. Электрическая цепь, схема электрической цепи, схема замещения цепи.
3. Участок электрической цепи, ветвь, узел, контур.
4. Последовательное, параллельное, смешанное соединение элементов (ветвей) электрической цепи.
5. Закон Ома: для однородного и неоднородного участка электрической цепи, обобщенный закон Ома.
6. Законы Кирхгофа.
7. Мгновенный ток, действующий ток, комплексный ток, комплексная амплитуда тока.
8. Формы представления комплексных чисел: алгебраическая, тригонометрическая, показательная и их взаимосвязь.

9. Действия с комплексными числами: сложение, вычитание, умножение, деление, возведение в степень.
10. Алгоритм расчета электрической цепи методом контурных токов
11. Алгоритм расчета электрической цепи методом узловых потенциалов.
12. Алгоритм расчета электрической цепи методом наложения.
13. Алгоритм расчета электрической цепи методом эквивалентного генератора тока.
14. Алгоритм расчета электрической цепи методом эквивалентного генератора напряжения.

4.2 Метод контурных токов

1. Для заданной схемы (рисунки 01- 64) составить систему уравнений для расчета контурных токов.
2. Определить ток в указанной ветви по известным контурным токам.
3. По заданному комплексному току записать мгновенный ток.
4. Для заданной схемы (рисунки 01- 64) составить уравнение баланса мощностей.
5. Для заданных мгновенных токов построить векторную диаграмму.

4.3 Метод узловых потенциалов

1. Для заданной схемы (рисунки 01- 64) составить систему уравнений для расчета узловых потенциалов.
2. Записать закон Ома для указанного участка цепи.
3. Определить ток в указанной ветви.

4.4 Метод наложения

1. Для заданной схемы определить эквивалентное сопротивление.
2. Изобразить вспомогательные схемы (рисунки 01- 64) для расчета тока в указанной ветви.
3. Определить ток в указанной ветви.

4.5 Метод эквивалентного генератора тока

1. Для заданной схемы (рисунки 01- 64) определить ток $I_{кз}$.

2. Для заданной схемы (рисунки 01- 64) определить эквивалентное сопротивление генератора.
3. Определить ток в указанной ветви.

4.6 Метод эквивалентного генератора напряжения

1. Для заданной схемы (01- 64 указания по ДКЗ) определить напряжение U_{xx} .
2. Для заданной схемы (рисунки 01- 64) определить эквивалентное сопротивление генератора.
3. Определить ток в указанной ветви.

4.7 Трехфазные цепи

1. Запишите выражение для мгновенных ЭДС трехфазной цепи.
2. Запишите выражение для комплексных амплитуд и действующих ЭДС трехфазной цепи.
3. Построить векторную диаграмму для комплексных амплитуд и действующих ЭДС трехфазной цепи.
4. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями в симметричной трехфазной цепи?
5. Каким образом определить ток в нейтральном проводе в трехфазной цепи при соединении фаз приемника по схеме «звезда»?
6. Каким образом определить напряжение смещения нейтрали трехфазной цепи при соединении фаз приемника по схеме «звезда»?
7. Каковы соотношения между линейными и фазными токами в симметричной трехфазной цепи при соединении фаз приемника по схеме «треугольник»?

4.8 Переходные процессы

1. Сформулируйте 1-й и 2-й законы коммутации.
2. Запишите линейное дифференциальное уравнение первого порядка.
3. Какое линейное дифференциальное уравнение называют неоднородным? Приведите примеры. Поясните алгоритм решения этого

уравнения. Что такое общее и частное решение линейного дифференциального уравнения?

4. Назовите этапы алгоритма классического метода расчета переходных токов и напряжений в электрической цепи.

5. Изобразите в операторной форме схемы замещения идеального индуктивного и емкостного элементов при нулевых и ненулевых начальных условиях.

6. Перечислите основные свойства преобразований Лапласа.

7. Запишите выражение для закона Ома в операторной форме при нулевых и ненулевых начальных условиях для цепи, содержащей последовательно соединенные R, L, C элементы.

8. Назовите этапы алгоритма операторного метода расчета переходных процессов в электрической цепи.

Литература

1. Никулин В. И. Основы теории цепей. – М.: РИОР, 2016.
2. Иванов, М. Т. Радиотехнические цепи и сигналы : учебник / М. Иванов, А. Сергиенко, В. Ушаков. - СПб. : Питер, 2014. - 334 с. ; 24. - (Учебник для вузов. Стандарт третьего поколения). - Гриф: Рек. УМО. - Библиогр.: с. 320. - Алф. указ.: с. 321-334. - ISBN 978-5-496-00503-6
3. Каганов, В. И. Радиотехнические цепи и сигналы : компьютеризированный курс : учеб. пособие для вузов / В. И. Каганов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва : ФОРУМ : ИНФРА-М, 2013. - 431 с. : ил. ; 25. - (Высшее образование. Бакалавриат). - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 423-426. - ISBN 978-5-91134-719-2. - ISBN 978-5-16-006471-0
4. Яковлев, А. Н. Основы теории сигналов в примерах, упражнениях и заданиях Электронный ресурс : Учебное пособие / А. Н. Яковлев. - Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2012. - 470 с. - Книга

находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-7782-1995-3

5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники.- М.: Гардарики, 2012.
6. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов : в 3 т. / К. С. Демирчян [и др.], Т. 3. - 4-е изд., доп. для самостоят. изуч. курса. - М. [и др.] : Питер, 2009. - 376 с.
7. Демирчян, К. С. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов : в 2 т. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, Т. 2. - 5-е изд. - СПб.[и др.] : Питер, 2009. - 432 с. :
8. Теоретические основы электротехники : методические указания и контрольные задания для студентов технических специальностей высших учебных заведений / [Л. А. Бессонов, И. Г. Демидова, М. Е. Заруди и др.]. – Изд. 2-е, перераб. – М : Высш. шк., 2001. – 159
9. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. - СПб.: Лань, 2006.
10. Попов В.П. Основы теории цепей. - М.: Высшая школа, 2005.
11. Прянишников В.А. Теоретические основы электротехники. - СПб.: Корона принт, 2000.
12. Бакалов В.П., Воробиевко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей.- М.: Радио и связь, 1998.
13. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника - М.: Энергоатомиздат, 1987
14. Электротехнический справочник / Под ред. Герасимова В.Г.- М.: Энергоатомиздат, 1987, т1.

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

Методические указания

по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «Теория электрических и радиотехнических цепей»
для студентов направления подготовки /специальности
11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы связи
Направленность (профиль)
«Интеллектуальная обработка данных в инфокоммуникационных
системах и сетях»

Ставрополь 2026

Оглавление

Введение.....	3
1. Общая характеристика самостоятельной работы студента при изучении дисциплины	4
2. План-график выполнения СРС по дисциплине	4
3. Контрольные точки и виды отчетности по ним.....	4
4. Методические рекомендации по изучению теоретического материала.....	5
5. Методические указания по выполнению лабораторных работ.....	7
6. Методические указания по подготовке к экзамену.....	10
7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	23

Введение

Целью самостоятельной работы студентов при изучении дисциплины «Теория электрических и радиотехнических цепей» является получение знаний по теории различных электрических цепей для решения проблем передачи, обработки и распределения электрических сигналов в системах связи. Задача самостоятельной работы студентов по дисциплине «Теория электрических и радиотехнических цепей»:

-усвоение современных методов анализа, синтеза и расчёта электрических и радиотехнических цепей, а также, методов моделирования и исследования различных режимов электрических цепей на персональных ЭВМ.

В результате освоения дисциплины студенты должны:

Знать:

- основы теории, методы и средства теоретического и экспериментального исследования линейных и нелинейных электрических и радиотехнических цепей при гармонических и негармонических воздействиях;
- основы теории четырехполюсников;
- основы теории устойчивости электрических цепей с обратной связью;
- основы теории электрических аналоговых, дискретных и цифровых фильтров.

Уметь:

- рассчитывать параметры и характеристики линейных и нелинейных электрических цепей;
- рассчитывать и анализировать параметры электрических цепей и фильтров на персональных компьютерах;
- осуществлять компьютерное моделирование электрических цепей и процессов в них с использованием универсальных пакетов прикладных компьютерных программ.

Владеть:

- навыками экспериментального исследования электрических цепей в рамках физического и математического моделирования;
- основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации при исследовании электрических цепей.

1. Общая характеристика самостоятельной работы студента при изучении дисциплины «Теория электрических и радиотехнических цепей»

Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)	Вид деятельности студентов	Итоговый продукт самостоятельно й работы	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
				СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
6 семестр						
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Компьютерное моделирование с использованием графических редакторов	Отчеты по лабораторным работам	Зачетное задание (контрольная точка), выполнение индивидуальных (групповых) заданий из лабораторных работ	22.65	1.35	24.00
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Самостоятельное изучение литературы	Конспект	Собеседование, оценка ответов по вопросам заданных тем	10	2	12.00
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Самотестирование, подготовка к тестированию	Результаты контрольного компьютерного тестирования	Тестирование с помощью компьютерных тестовых заданий	10	2	12.00
Итого за семестр				42.65	5.35	48.00
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-3 _{ОПК-2} ИД-4 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2}	Подготовка к экзамену	Экзамен	Оценка ответов по экзаменационным билетам	25.50	1.50	27.00
Всего				67.15	7.35	75.00

2. План-график выполнения самостоятельной работы

Название контрольной точки Семестр 4	Срок сдачи	Номер недели учебного семестра	Вес в баллах
Линейные электрические цепи при гармонических воздействиях		4	15
Частотные и временные характеристики электрических цепей		8	15
Характеристики электрических сигналов		12	15
Электрические фильтры		15	10

4. Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Рекомендации по организации работы при самостоятельном изучении тем лекционных занятий и подготовке к лабораторным работам

Студентам рекомендуется:

- в день проведения занятий проработать, изученный на занятии учебный материал по конспекту. При этом необходимо выделить вопросы, на которые следует обратить большее внимание при дальнейшем изучении текущей темы. После проработки учебного материала необходимо ответить на, рекомендуемые контрольные вопросы;

- с целью качественного закрепления изученного материала в последующем следует более детально проработать учебный материал с использованием рекомендованной литературы. Студентам рекомендуется выделить вопросы, требующие более детальной проработки с помощью преподавателя;

- накануне проведения лабораторного занятия студенту рекомендуется закрепить теоретический материал, который вынесен на учебное занятие и уяснить, его роль для достижения поставленных целей, подготовить вопросы, требующие уточнения у преподавателя.

Рекомендации по организации работы с литературой

Для овладения, закрепления и систематизации знаний студентам рекомендуется самостоятельная работа с рекомендованной литературой и конспектом лекций. При самостоятельной работе с рекомендованной литературой студентам рекомендуется проводить конспектирование учебного материала, изложенного в рекомендованных источниках.

Конспектирование источников проводится при детальном изучении темы, при этом студентам рекомендуется:

- дополнять конспект лекционного занятия путем его расширения по наиболее важным вопросам, рассмотренным на занятии. Конспектирование источников заключается в дополнении конспекта следующими положениями:

- основные определения и их физический смысл;
- основные физические принципы формирования и обработки сигналов в системах связи с графическими иллюстрациями;
- основные математические соотношения с раскрытием их физического смысла;
- выводы по учебным вопросам, изучаемой темы занятий.

Контроль этого вида самостоятельной работы осуществляется на учебных занятиях путем проверки преподавателем конспекта лекций и собеседования.

При конспектировании источников студенты должны исходить из рационального объема, конспектируемого материала. Конспект должен быть кратким и понятным при его использовании после изучения текущей темы.

При конспектировании источников рекомендуется отдельные рисунки, наиболее важные их фрагменты, наиболее важные формулы выделять цветом. При ведении конспекта на занятии рекомендуется заполнять две трети страницы листа тетради по вертикали, а свободную часть использовать при дополнении конспекта, по изучаемому вопросу.

Для успешного освоения дисциплины, необходимо самостоятельно детально изучить представленные темы по рекомендуемым источникам информации:

№ п/п	Темы для самостоятельного изучения	Рекомендуемые источники информации (№ источника)			
		Основная	Дополни- тельная	Методи- ческая	Интернет- ресурсы
1	Основы теории и методы анализа линейных электрических цепей	1-2	1- 5	1-3	1, 4
2	Линейные электрические цепи при гармонических воздействиях	1-2	1- 5	1-3	4
3	Частотные характеристики электрических цепей	1-2	1- 5	1-3	2, 3
4	Линейные электрические цепи при негармонических воздействиях	1-2	1- 5	1-3	3
5	Четырехполюсники и цепи с распределенными параметрами	1-2	1- 5	1-3	4
6	Электрические цепи с обратной связью	1-2	1- 5	1-3	1, 4
7	Электрические фильтры	1-2	1- 5	1-3	3

8	Нелинейные электрические цепи	1-2	1-5	1-3	1
---	-------------------------------	-----	-----	-----	---

Конспектирование источников оценивается удовлетворительно и неудовлетворительно. Работа по конспектированию источников оценивается удовлетворительно если:

- конспект имеет достаточный объем детализации по, изучаемой теме, обеспечивающий заданный уровень освоения теоретического материала дисциплины;
- конспект оформлен аккуратно, изучаемый материал изложен последовательно в соответствии с порядком изучения дисциплины, содержит обобщающие выводы по каждой теме.

Работа по конспектированию источников оценивается неудовлетворительно, если не выполнены требования на оценку удовлетворительно.

5. Методические указания по выполнению лабораторных работ

При выполнении практикума по дисциплине (лабораторные работы) для достижения базового уровня сформированности компетенций студент должен уметь применять полученные знания на практике через решение задач по оценке и расчету характеристик и параметров аналоговых и цифровых устройств.

Владеть приемами и навыками решения задач по оценке и расчету характеристик аналоговых и цифровых устройств.

При выполнении практикума по дисциплине (лабораторные работы) для достижения продвинутого уровня сформированности компетенций студент должен показать высокое умение уверенно применять полученные знания на практике через решение задач по оценке и расчету характеристик и параметров аналоговых и цифровых устройств.

5.1. Методические указания при подготовке к лабораторной работе

Подготовку к лабораторной работе рекомендуется проводить в следующей последовательности:

- уяснить тему и цель, предстоящей лабораторной работы;
- изучить теоретический материал в соответствии с темой лабораторной работы (рекомендуется использовать рекомендованную литературу, конспект лекций, учебное пособие (практикум по лабораторным работам);
- ознакомиться с оборудованием и материалами, используемыми на лабораторной работе (при использовании специализированного оборудования необходимо изучить порядок и правила его использования).

5.2. Методические указания при выполнении лабораторной работы

При выполнении лабораторной работы студенты должны строго соблюдать, установленные правила охраны труда.

При выполнении лабораторной работы студентам рекомендуется:

- уяснить цель, выполняемых заданий и способы их решения;
- задания, указанные в лабораторной работе выполнять в той последовательности, в которой они указаны в лабораторном практикуме;
- оформить отчет по лабораторной работе;
- ответить на контрольные вопросы.

5.3. Методические указания при подготовке к защите лабораторной работы

При подготовке к защите лабораторной работы студентам рекомендуется:

- подготовить отчет по лабораторной работе;
- подготовить обоснование, сделанных выводов;
- закрепить знания теоретического материала по теме лабораторной работы (рекомендуется использовать контрольные вопросы);
- знать порядок проведения расчетов (проводимых исследований);
- уметь показать и пояснить порядок исследований при использовании специализированного оборудования.

Защита лабораторной работы осуществляется путем собеседования студента с преподавателем. При собеседовании студент представляет на проверку отчет по лабораторной работе. Собеседование со студентом, претендующим на оценку «отлично» проводится по вопросам продвинутого уровня обучения. Собеседование со студентом, не претендующим на оценку «отлично» проводится по вопросам базового уровня обучения.

6. Вопросы для экзамена

Базовый уровень

Вопросы для проверки уровня обученности:

1. Закон Ома для неоднородного участка электрической цепи.
2. Эквивалентные преобразования пассивных цепей.
3. Законы Кирхгофа. Метод уравнений Кирхгофа.
4. Метод наложения при анализе электрических цепей постоянного тока.
5. Метод эквивалентного генератора напряжения при анализе электрических цепей постоянного тока.
6. Метод эквивалентного генератора тока при анализе электрических цепей постоянного тока.

7. Метод контурных токов.
8. Метод узловых потенциалов для расчета токов в ветвях электрической цепи постоянного тока.
9. Метод двух узлов при анализе электрической цепи.
10. Баланс мощностей в электрической цепи постоянного тока.
11. Условия передачи максимальной мощности в нагрузку.
12. Графическая форма представления гармонического (синусоидального) тока.
13. Величины, характеризующие синусоидальный ток.
14. Векторная форма представления гармонического (синусоидального) тока.
15. Символическая (комплексная) форма представления гармонического (синусоидального) тока.
16. Идеальный резистивный элемент в цепи гармонического тока.
17. Идеальный емкостный элемент в цепи гармонического тока.
18. Идеальный индуктивный элемент в цепи гармонического тока
19. Баланс мощностей в электрической цепи синусоидального тока.
20. Комплексные сопротивления. Треугольник сопротивлений.
21. Резонанс токов в электрической цепи. Треугольник токов.
22. Резонанс напряжений в электрической цепи.
23. Виды мощностей в электрических цепях и их баланс. Треугольник мощностей.
24. Согласование источника электрической энергии гармонического тока с нагрузкой.
25. Трехфазная цепь. Соединение по схеме звезда
26. Трехфазная цепь. Соединение по схеме треугольник
27. Комплексная передаточная функция электрической цепи
28. Частотные характеристики НЧ-1.
29. Частотные характеристики ВЧ-1.
30. Частотные характеристики полосового звена.
31. Параметры и частотные характеристики последовательного колебательного контура
32. Параметры и частотные характеристики параллельного колебательного контура
33. Законы коммутации в электрических цепях.
34. Анализ переходных процессов в RC- цепи классическим методом.
35. Анализ переходных процессов в RL- цепи классическим методом.
36. Преобразование Лапласа и его основные свойства.
37. Операторная схема замещения элементов электрической цепи при нулевых начальных условиях.
38. Закон Ома в операторной форме.

39. Анализ переходных процессов в RC- цепи операторным методом.
40. Анализ переходных процессов в RL- цепи операторным методом.
41. Операторные передаточные функции НЧ-1.
42. Операторные передаточные функции ВЧ-1.
43. Операторные передаточные функции полосового звена.
44. Временные характеристики электрических цепей.
45. Спектральное представление периодических сигналов.
46. Спектры периодической последовательности прямоугольных импульсов.
47. Спектральное представление аperiodических сигналов.
48. Первичные параметры четырехполюсников. Системы уравнений четырехполюсников.
49. Первичные параметры четырехполюсников. Физический смысл A-параметров.
50. Первичные параметры составных четырехполюсников.
51. Вторичные (характеристические) параметры четырехполюсников. Характеристические сопротивления четырехполюсника.
52. Вторичные (характеристические) параметры четырехполюсников. Постоянная передачи четырехполюсника.
53. Первичные параметры однородной длинной линии.
54. Вторичные (характеристические) параметры однородной длинной линии при гармоническом воздействии.
55. Волновые режимы в однородной длинной линии при гармоническом воздействии. Режим бегущих волн.
56. Волновые режимы в однородной длинной линии при гармоническом воздействии. Режим стоячих волн.
57. Виды обратных связей и их влияние на параметры активных четырехполюсников.
58. Критерий устойчивости Михайлова.
59. Критерий устойчивости Гурвица.
60. Виды электрических фильтров и условия их физической реализуемости.
61. Задачи и методы аппроксимации частотных характеристик электрических фильтров.
62. Условия фильтрации лестничных фильтров.
63. Частотные характеристики ФНЧ типа «к».
64. Частотные характеристики ФВЧ типа «к».
65. Проблемы синтеза электрических фильтров.
66. Аппроксимация частотных характеристик ФНЧ-прототипа.
67. Синтез электрических пассивных фильтров табличным методом.

68. Синтез электрических пассивных фильтров аналитическим методом.
69. Синтез активных фильтров методом подстановки.
70. Схема и частотные характеристики активного RC- фильтра нижних частот первого порядка.
71. Схема и частотные характеристики активного RC- фильтра верхних частот первого порядка.
72. Принципы цифровой фильтрации.
73. Формы представления дискретных сигналов.
74. Дискретное преобразование Фурье.
75. Системная функция цифровых фильтров.
76. Разностные уравнения дискретных цепей.
77. Дискретные фильтры с конечной импульсной характеристикой.
78. Нелинейные элементы электрических цепей и их характеристики.
79. Методы анализа нелинейных электрических цепей постоянного тока.

Задания для проверки умений и навыков

1. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи постоянного тока методом преобразований.
2. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи постоянного тока методом уравнений Кирхгофа.
3. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи постоянного тока методом наложения.
4. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи постоянного тока методом эквивалентного генератора тока.
5. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи постоянного тока методом эквивалентного генератора напряжения.
6. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи постоянного тока методом контурных токов.
7. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи постоянного тока методом узловых потенциалов
8. Рассчитать и построить графики частотных характеристик звеньев первого порядка.

9. Рассчитать и построить графики частотных характеристики последовательного колебательного контура.
10. Рассчитать и построить графики частотных характеристики параллельного колебательного контура.
11. Рассчитать и построить графики временных характеристик звеньев первого порядка
12. Анализ переходных процессов в RC- цепи классическим методом.
13. Анализ переходных процессов в RL- цепи классическим методом.
14. Анализ переходных процессов в RC- цепи операторным методом.
15. Анализ переходных процессов в RL- цепи операторным методом.
16. Определить спектральные характеристики апериодического сигнала.
17. Рассчитать первичные параметры заданного четырехполюсника.
18. Рассчитать и построить графики частотных характеристики LC-фильтра.
19. Рассчитать и построить графики частотных характеристики ARC-фильтра.
20. Рассчитать и построить графики частотных характеристики дискретного фильтра с КИХ.

Повышенный уровень

Вопросы для проверки уровня обученности:

1. Обобщенный закон Ома.
2. Эквивалентные преобразования активных цепей.
3. Метод наложения при анализе электрических цепей синусоидального тока.
4. Метод эквивалентного генератора напряжения при анализе электрических цепей синусоидального тока.
5. Метод эквивалентного генератора тока при анализе электрических цепей синусоидального тока.
6. Метод контурных токов.
7. Метод узловых потенциалов для расчета токов в ветвях электрической цепи синусоидального тока.
8. Метод двух узлов при анализе электрической цепи синусоидального тока.
9. Величины, характеризующие синусоидальный ток.
10. Символическая (комплексная) форма представления гармонического (синусоидального) тока.

11. Виды мощностей в электрических цепях и их баланс. Треугольник мощностей.
12. Согласование источника электрической энергии гармонического тока с нагрузкой.
13. Трехфазная цепь. Соединение по схеме звезда
14. Трехфазная цепь. Соединение по схеме треугольник
15. Комплексная передаточная функция электрической цепи
16. Частотные характеристики НЧ-2.
17. Частотные характеристики ВЧ-2.
18. Частотные характеристики полосового звена.
19. Связанные колебательные контуры. Схемы замещения.
20. Частотные характеристики связанного колебательного контура
21. Анализ переходных процессов в RLC- цепи классическим методом.
22. Операторные схема замещения элементов электрической цепи ненулевых начальных условиях.
23. Анализ переходных процессов в RLC- цепи операторным методом.
24. Операторные передаточные функции НЧ-2.
25. Операторные передаточные функции ВЧ-2
26. Операторные передаточные функции полосового звена.
27. Временные характеристики электрических цепей.
28. *Импульсная характеристика НЧ-2.*
29. *Переходная характеристика НЧ-2.*
30. *Импульсная характеристика полосового звена.*
31. *Переходная характеристика полосового звена.*
32. *Временной метод анализа переходных процессов.*
33. *Спектральное представление периодических сигналов.*
34. *Спектры периодической последовательности прямоугольных импульсов.*
35. *Теоремы о спектрах.*
36. Первичные параметры четырехполюсников. Физический смысл Н-параметров.
37. Первичные параметры четырехполюсников. Физический смысл У-параметров.
38. Рабочие параметры четырехполюсников. Вносимое ослабление четырехполюсника.
39. Рабочие параметры четырехполюсников. Рабочее ослабление четырехполюсника.
40. Взаимосвязь первичных и вторичных параметров симметричных четырехполюсников.
41. Волновые режимы в однородной длинной линии при гармоническом воздействии. Режим смешанных волн.
42. Проблемы согласования однородной длинной линии с нагрузкой.

43. Согласование однородной длинной линии с нагрузкой при помощи четвертьволнового трансформатора.
44. Согласование однородной длинной линии с нагрузкой при помощи шлейфа Татаринова
45. Критерий устойчивости Найквиста.
46. Последовательно-производные звенья фильтров типа «m».
47. Параллельно-производные звенья фильтров типа «m».
48. Частотные характеристики ФНЧ типа «m».
49. Частотные характеристики ФВЧ типа «m».
50. Условия фильтрации мостовых фильтров.
51. Амплитудные и фазовые корректоры.
52. Схема и частотные характеристики активного RC- фильтра нижних частот второго порядка.
53. Схема и частотные характеристики активного RC- фильтра верхних частот второго порядка.
54. Схема и частотные характеристики полосового активного RC- фильтра.
55. Схема и частотные характеристики режекторного активного RC- фильтра.
56. Дискретное преобразование Лапласа.
57. Z- преобразование и его основные свойства.
58. Дискретные фильтры с бесконечной импульсной характеристикой.
59. Методы анализа нелинейных электрических цепей переменного тока.

Задания для проверки умений и навыков

1. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи синусоидального тока методом преобразований.
2. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи синусоидального тока методом уравнений Кирхгофа.
3. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи синусоидального тока методом наложения.
4. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи синусоидального тока методом эквивалентного генератора тока.
5. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи синусоидального тока методом эквивалентного генератора напряжения.
6. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи синусоидального тока методом контурных токов.

7. Рассчитать токи и напряжения в заданной цепи синусоидального тока методом узловых потенциалов
8. Рассчитать и построить графики частотных характеристик звеньев второго порядка.
9. Рассчитать и построить графики частотных характеристики связанного колебательного контура.
10. Рассчитать и построить графики временных характеристик звеньев второго порядка
11. Анализ переходных процессов в RC- цепи временным методом.
12. Анализ переходных процессов в RLC- цепи классическим методом.
13. Анализ переходных процессов в RC- цепи частотным методом.
14. Анализ переходных процессов в RLC- цепи операторным методом.
15. Определить спектральные характеристики периодического сигнала.
16. Рассчитать первичные параметры заданного четырехполюсника.
17. Рассчитать и построить графики частотных характеристики LC-фильтра типа «m».
18. Рассчитать и построить графики частотных характеристики ARC-фильтра второго порядка.
19. Рассчитать и построить графики частотных характеристики дискретного фильтра с КИХ.
20. Рассчитать и построить графики частотных характеристики дискретного фильтра с БИХ.

Критерии оценки собеседования:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если студент дал полный, развернутый ответ на поставленный вопрос, при этом показана совокупность осознанных знаний по теме дисциплины, доказательно раскрыты основные положения вопроса; в ответе прослеживается четкая структура, логическая последовательность, отражающая сущность раскрываемых понятий. Ответ изложен литературным языком с использованием технической терминологии. Могут быть допущены недочеты в определении понятий, исправленные студентом самостоятельно в процессе ответа. Ситуационная задача по теме решена правильно.

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если студент дал полный, развернутый ответ на поставленный вопрос, при этом показано умение выделить существенные и несущественные признаки, причинно-следственные связи. Ответ четко структурирован, логичен, изложен литературным языком с использованием

технической терминологии. Могут быть допущены 2-3 неточности или незначительные ошибки, исправленные студентом с помощью преподавателя. Ситуационная задача по теме решена правильно, но при ее решении допущено не более одной ошибки.

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если студент дал недостаточно полный и недостаточно развернутый ответ. Логика и последовательность изложения имеют нарушения. Допущены ошибки в раскрытии понятий, употреблении терминов. Студент не способен самостоятельно выделить существенные и несущественные признаки и причинно-следственные связи. В ответе отсутствуют выводы. Умение раскрыть значение обобщенных знаний не показано. Речевое оформление требует поправок, коррекции. Ситуационная задача по теме решена правильно, но при ее решении допущено не более двух ошибок.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, если ответ представляет собой разрозненные знания с существенными ошибками по вопросу. Присутствуют фрагментарность, нелогичность изложения. Студент не осознает связь обсуждаемого вопроса с другими вопросами темы. Отсутствуют выводы, конкретизация и доказательность изложения. Речь неграмотная, терминология не используется. Дополнительные и уточняющие вопросы преподавателя не приводят к коррекции ответа студента, или ответ на вопрос полностью отсутствует или студент отказался от ответа. Ситуационная задача по теме решена неправильно.

7. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

7.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины (модуля)

7.1.1. Перечень основной литературы:

1. Иванов М.Т. Радиотехнические цепи и сигналы: учебник / М. Иванов, А. Сергиенко, В. Ушаков. - СПб.: Питер, 2014. - 334 с.; 24. - (Учебник для вузов. Стандарт третьего поколения). - Гриф: Рек. УМО. - Библиогр.: с. 320. - Алф. указ.: с. 321-334. - ISBN 978-5-496-00503-6 – 15 экземпляров.
2. Каганов В.И. Радиотехнические цепи и сигналы: компьютеризированный курс: учеб. пособие для вузов / В. И. Каганов. - 2-е изд., перераб. и доп. - Москва: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2013. - 431 с. : ил.; 25. - (Высшее образование. Бакалавриат). - Гриф: Доп. МО. - Библиогр.: с. 423-426. - ISBN 978-5-91134-719-2. - ISBN 978-5-16-006471-0 – 15 экземпляров.
3. Федосов В.П. Радиотехнические цепи и сигналы: учебное пособие / В.П. Федосов. -

Ростов-на-Дону|Таганрог: Издательство Южного федерального университета, 2017. - 283 с.: ил. - <http://biblioclub.ru/>. - Библиогр.: с. 274. - ISBN 978-5-9275-2481-5, экземпляров неограниченно.

4. Евдокимов А.О. Радиотехнические цепи и сигналы: сборник задач и упражнений: учебное пособие / А.О. Евдокимов, С.А. Охотников; Поволжский государственный технологический университет, 2. - Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. - 96 с.: граф., схем. - <http://biblioclub.ru/>. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-8158-1750-0. - ISBN 978-5-8158-1887-3 (ч. 2), экземпляров неограниченно.

5. Козлов В.А. Радиотехнические цепи и сигналы Электронный ресурс / Козлов В.А.: учебно-методическое пособие. - 2-е изд., перераб. и доп. - Казань: КНИТУ-КАИ, 2017. - 84 с. - Рекомендовано к изданию Учебно-методическим управлением КНИТУ-КАИ. - ISBN 978-5-7579-2290-4, экземпляров неограниченно.

7.1.2. Перечень дополнительной литературы:

1. Акулиничев Ю.П. Теория и техника передачи информации [Электронный ресурс]: учебное пособие / Ю. П. Акулиничев, А. С. Бернагдт. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Эль Контент, 2012. — 210 с. — 978-5-4332-0035-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/13984.html>, экземпляров неограниченно.

2. Радиотехнические цепи и сигналы. Лабораторный практикум [Электронный ресурс]: учебное пособие / В. Я. Баскей, В. М. Меренков, Д. О. Соколова, А. Н. Яковлев; под ред. А. Н. Яковлев. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2014. — 113 с. — 978-5-7782-2395-0. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45154.html>, экземпляров неограниченно.

3. Умняшкин С.В. Основы теории цифровой обработки сигналов [Электронный ресурс]: учебное пособие / С. В. Умняшкин. — Электрон. текстовые данные. — М.: Техносфера, 2016. — 528 с. — 978-5-94836-424-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/58892.html>, экземпляров неограниченно.

4. Яковлев, А. Н. Основы теории сигналов в примерах, упражнениях и заданиях [Электронный ресурс]: учебное пособие / А. Н. Яковлев. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск: Новосибирский государственный технический университет, 2012. — 470 с. — 978-5-7782-1995-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45128.html>, экземпляров неограниченно.

7.2. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины (модуля)

<http://www.ielectro.ru/products.html>: Новинки электротехники.

<http://www.labcenter.com/index.cfm>.

<http://www.vsy-a-elektrotehnika.ru>

www.eLibrary.ru - Научная электронная библиотека

www.iprbookshop.ru - Электронно-библиотечная система IPRbooks

7.3 Методическая литература:

1. Никулин В.И. Теория электрических и радиотехнических цепей: Анализ электрических цепей в установившихся и переходных режимах: Методические указания по выполнению курсовой работы. - Ставрополь: СКФУ, 2023.

2. Никулин В.И. Теория электрических и радиотехнических цепей: Методические указания по выполнению лабораторных работ. - Ставрополь: СКФУ, 2023.

3. Практическая электротехника: основы электротехники с использованием MATLAB/Simulink / В.М. Рябенский. - Архангельск: САФУ, 2014. - 414 с. - ISBN 978-5-261-00970-2

8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень программного обеспечения и информационных справочных систем

При чтении лекций используется компьютерная техника для демонстрации презентационных мультимедийных материалов.

В ходе лабораторных работ студенты выполняют исследования электрических и радиотехнических цепей с использованием программного обеспечения для компьютерного моделирования и промышленных лабораторных установок.

Информационные справочные системы:

Информационно-справочные и информационно-правовые системы, используемые при изучении дисциплины:

1.	http://www.vsy-a-elektrotehnika.ru
2.	http://www.ielectro.ru/products.html : Новинки электротехники.
3.	http://www.labcenter.com/index.cfm .

Программное обеспечение:

1.	NI LabView Teaching Only.
2.	NI Multisim Education или Electronics Workbench.
3.	PTC Mathcad
4.	Программа тестового контроля «Айрен»

