

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

Методические указания

по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «**Теоретические основы электротехники**»
для студентов направления
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
Направленность (Профиль)
Интеллектуальные программируемые системы и устройства

Ставрополь, 2026

УДК 621.372 (075)

Никулин В.И. Теоретические основы электротехники: методические указания по выполнению лабораторных работ. – Ставрополь: СКФУ, 2026.

Методические указания к лабораторным работам дисциплине «Теоретические основы электротехники» соответствуют ГОС ВО. Методические указания по выполнению лабораторных работ содержат рекомендации по подготовке к лабораторным работам, программы исследований, описание установок (схем) исследований, порядок исследований, требования к содержанию отчета по лабораторной работе, контрольные вопросы для защиты лабораторной работы. Методические указания служат логическим дополнением к основным теоретическим положениям, изложенным в учебном пособии Никулин В.И. Теоретические основы электротехники. - Ставрополь.: СКФУ, 2026. Указания предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.03.04 Электроника и нанoeлектроника.

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 временных характеристик апериодических цепей.....	42
Лабораторная работа №8 Исследование четырехполюсников.....	47
Лабораторная работа №9 Исследование длинных линий	51
Лабораторная работа №10 Исследование частотных характеристик LC-фильтров	55
Лабораторная работа №11 Исследование частотных характеристик ARC-фильтров	59
Литература.....	66

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»

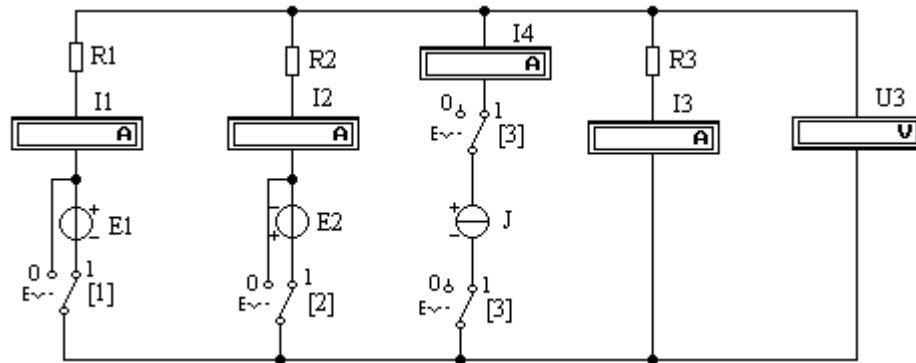


Рисунок 1

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 $E_0 = U^{xx}$ в схеме (рисунок 2) установить **режим холостого хода**: переключатель «K» перевести в положение 0 (нажать на клавиатуре клавишу K).

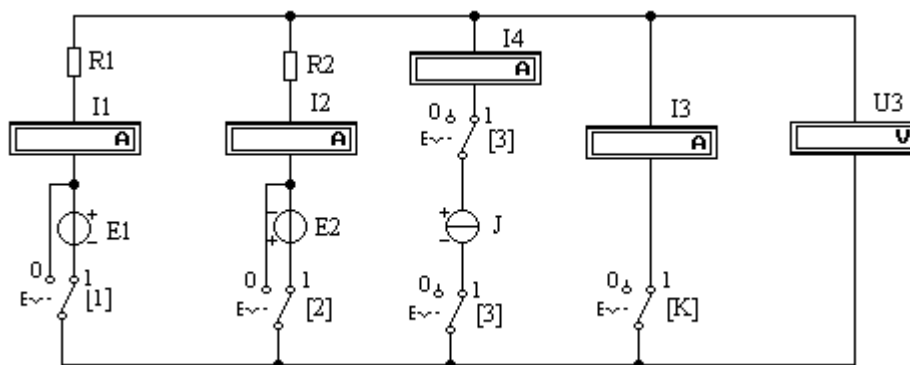


Рисунок 2

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 $U_3 = E_э$ занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

Таблица 3- Расчетные и экспериментальные данные

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

4. Для определения величины $J_э$ (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 $I_3 = I_{кз} = J_э$ занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных.

5. Для определения величины $R_э$ (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 $R_э$, занести в таблицу 3 расчетных и экспериментальных данных.

Сопротивление $R_э$ определить, используя результаты опыта холостого хода и короткого замыкания $R_э = \frac{U_3^{xx}}{I_3^{кз}}$. Результаты измерений $R_э$ 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

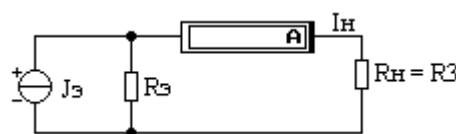


Рисунок 4

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).

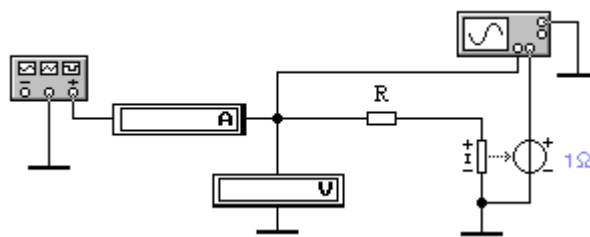


Рисунок 1- Схема исследования цепи с идеальным резистором

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).

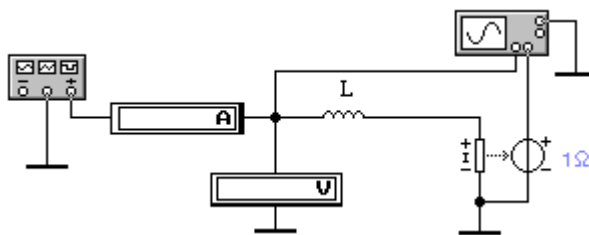


Рисунок 2 - Схема исследования цепи с идеальной индуктивной катушкой

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).

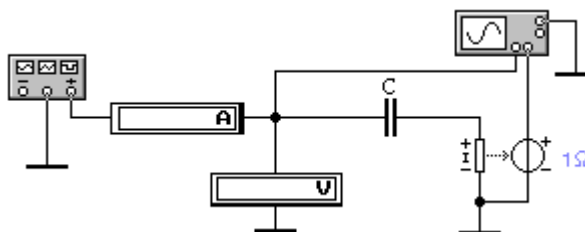


Рисунок 3- Схема исследования цепи с идеальным конденсатором

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?

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)

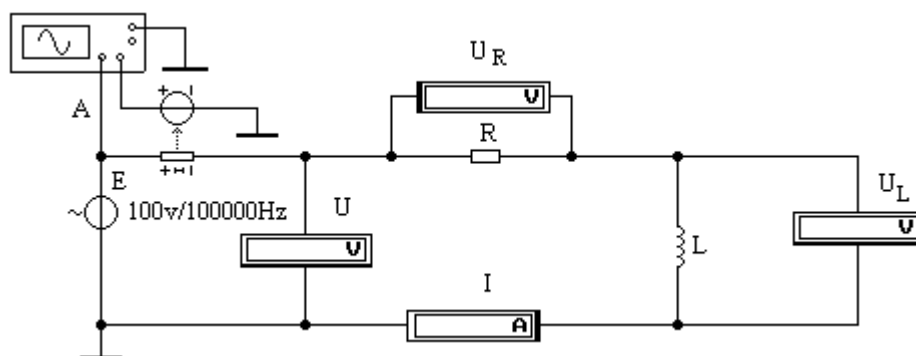


Рисунок 1 - Схема исследования RL - цепи.

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).

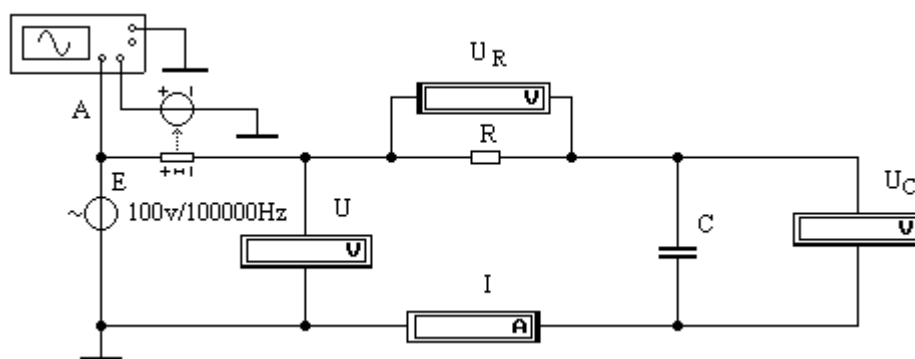


Рисунок 2- Схема исследования RC - цепи.

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).

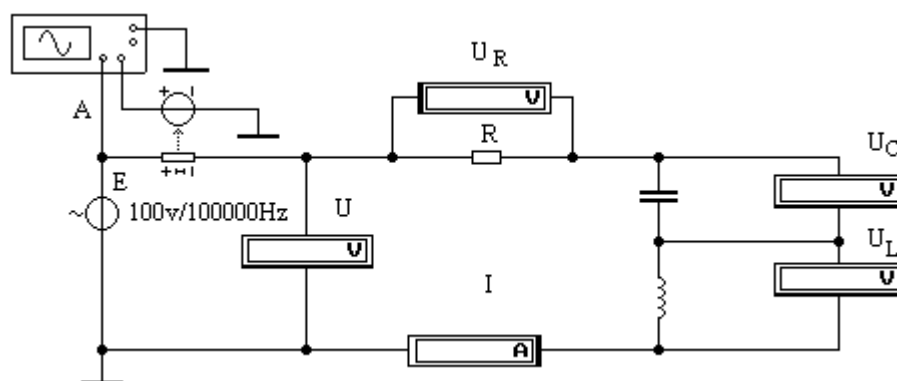


Рисунок 3- Схема исследования RLC - цепи.

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 $i(t) = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ 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 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).

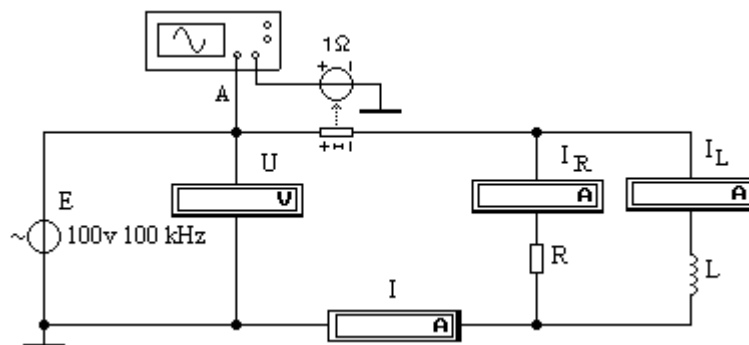


Рисунок 1- Схема исследования RL - цепи.

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.

Таблица 2 - Результаты исследований разветвленных цепей синусоидального тока

Вид цепи	параметры	U, В	I, А	I_R , А	I_L , А	I_C , А	$T_2 - T_1$, с	φ , градус
RL - цепь	$0.5L =$					-		
	$L =$					-		

	$2L=$					-		
RC - цепь	$0.5C=$					-		
	$C=$					-		
	$2C=$					-		
RLC-цепь	$C < C_{рез}$							
	$C_{рез}=$							
	$C > C_{рез}$							

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

б) Исследование RC - цепи.

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

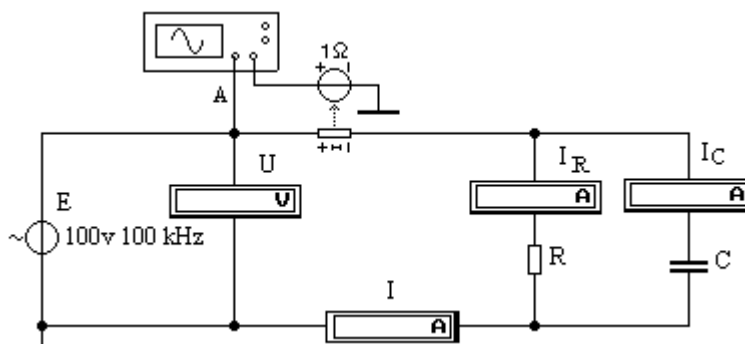


Рисунок 2- Схема исследования RC - цепи.

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R и емкости конденсатора C , значение ЭДС источника $E = 150V$ 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 амперметров и вольтметра 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 токов и напряжений
 8. Результаты исследований сравнить с результатами предварительного расчета.
- Сделать выводы.

в) Исследование RLC - цепи.

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 3).

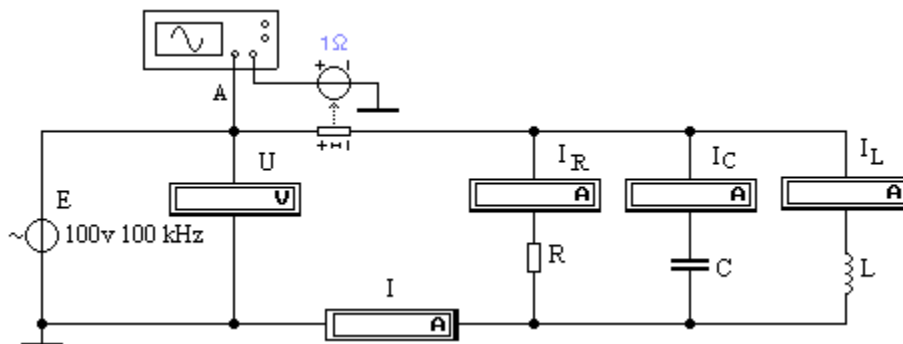


Рисунок 3 - Схема исследования RLC – цепи

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 $i(t) = 2\sin(\omega t - 145^\circ)$ 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.

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 №	Uл, В	Ra, Ом	Rв, Ом	Rс, 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).

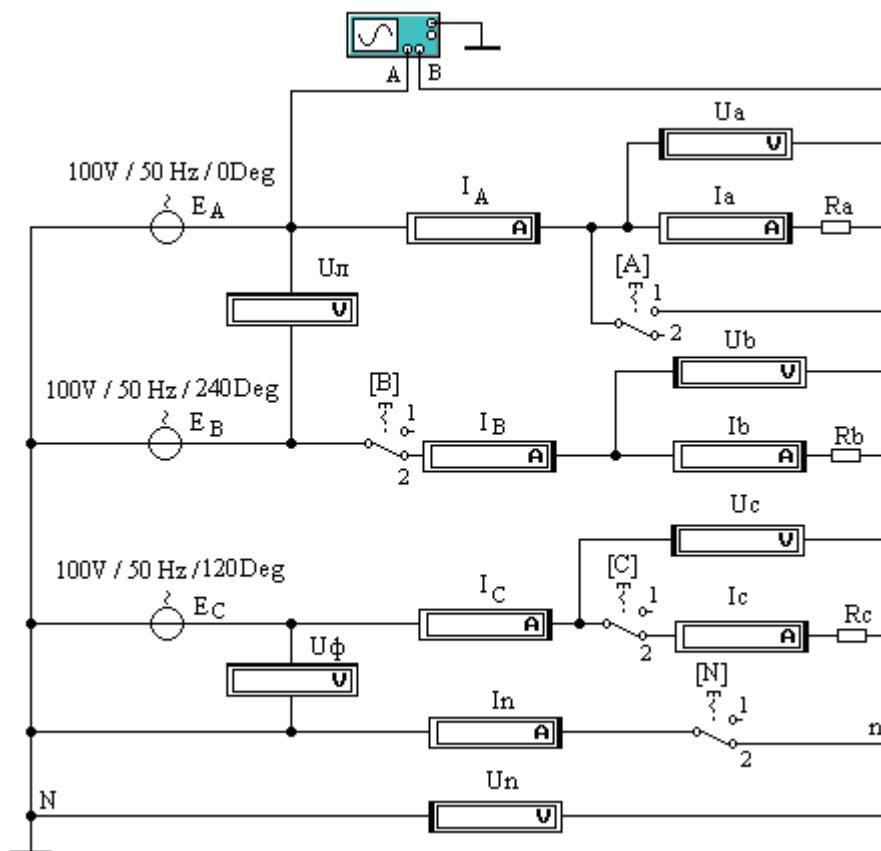


Рисунок 1 - Схема трехфазной цепи соединение по схеме «звезда»

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_B 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 соединения 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 соединения 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).

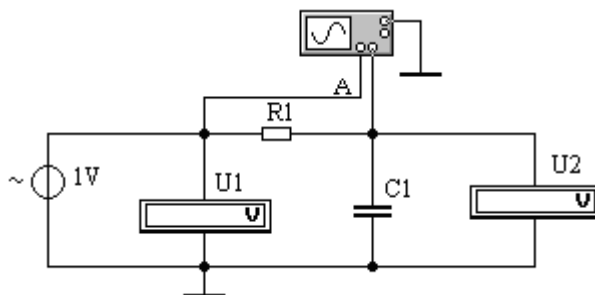


Рисунок 1-Схема исследования частотных характеристик НЧ-1

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).

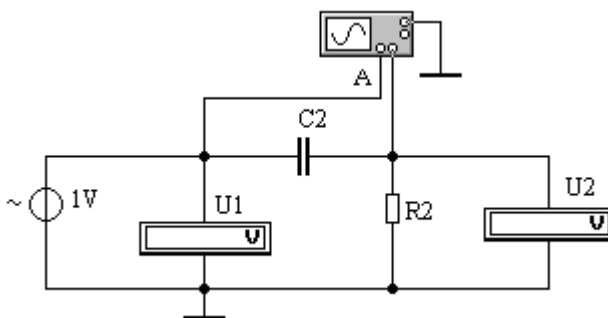


Рисунок 2 - Схема исследования частотных характеристик ВЧ-1

2. Рассчитать $f_{гр} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_2 \cdot C_2}$. 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 $f = 0.01f_{гр}$.

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).

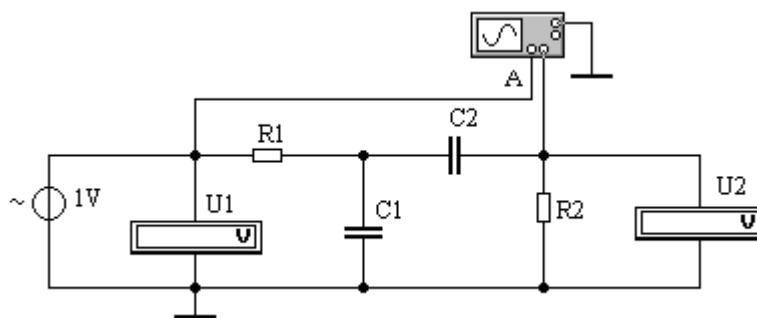


Рисунок 3 - Схема исследования частотных характеристик полосового звена

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 R1, R2 и емкостей конденсаторов C1, C2, значение ЭДС источника E = 1В 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 T2-T1. Рассчитать фазовый сдвиг между напряжениями U₂ и U₁ 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 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).

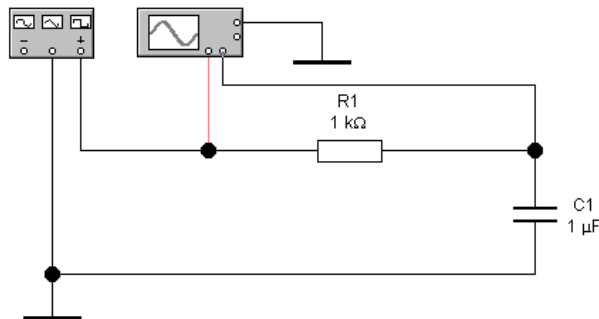
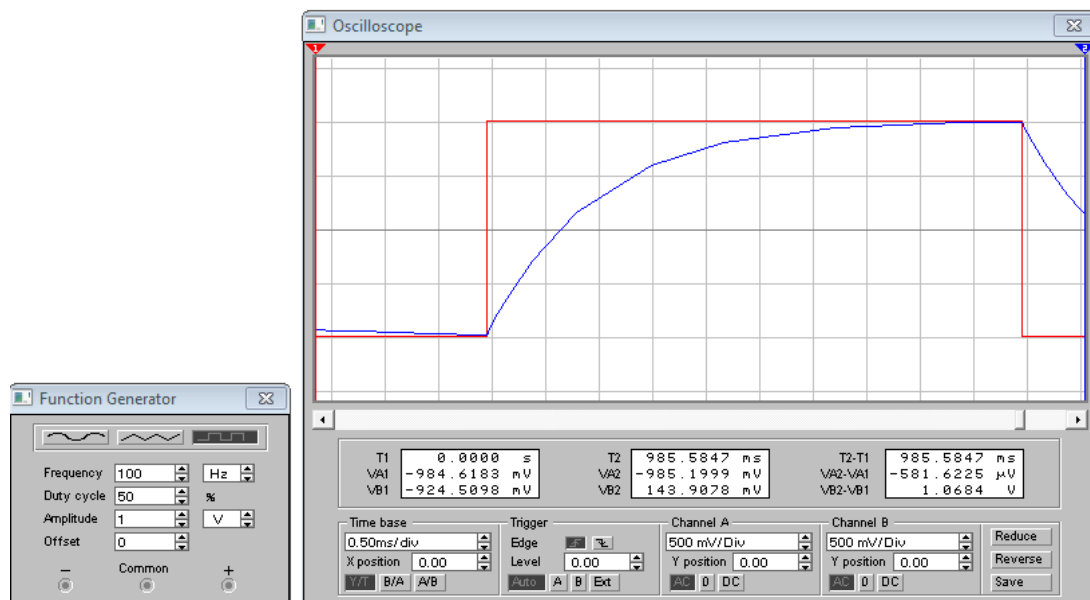


Рисунок 1-Схема исследования временных характеристик НЧ-1

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).

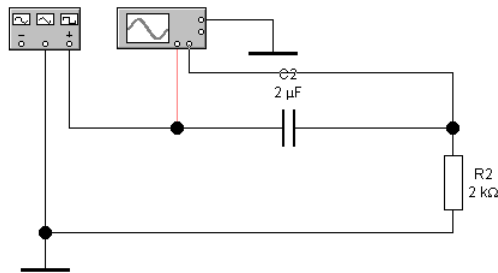


Рисунок 2 - Схема исследования временных характеристик ВЧ-1

2. Повторить п. 3-9

в) Исследование временных характеристик полосового звена

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 3).

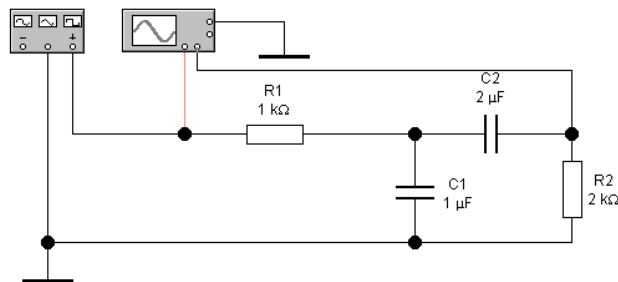


Рисунок 3 - Схема исследования временных характеристик полосового звена

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 № 8

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_r , В	f , кГц	R_1 , Ом	C_2 , мкФ	R_3 , Ом	R_r , 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 A- параметров заданных четырехполюсников

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 1).

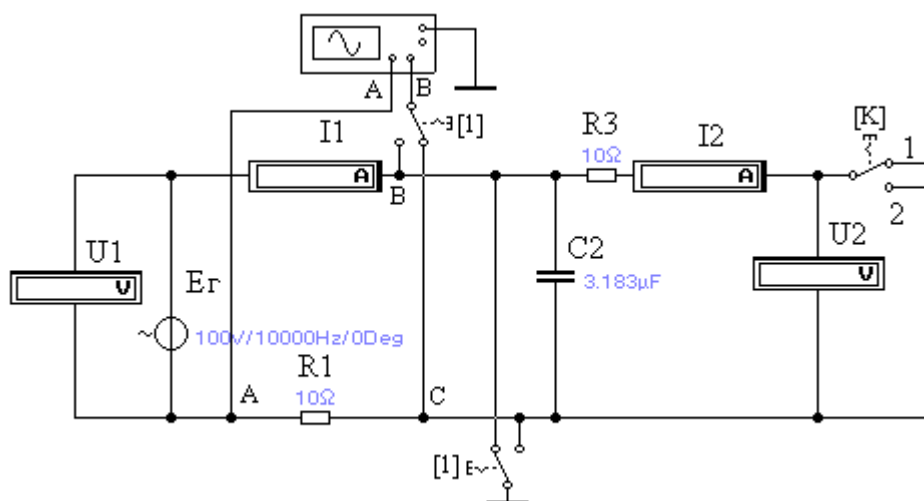


Рисунок 1

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 «Асепт». 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	ψ_{12} , град	T ₂ -T ₁ ,с	φ_{ui} , градус	А- параметры			
									$\underline{A}_{11}$		$\underline{A}_{21}$	
									эксп	расч	эксп	расч
режим Короткое замыкание	U ₁ , В	I ₁ , А	I ₂ , А	U ₂ , В	T ₂ - T ₁ ,с	ψ_{12} , град	T ₂ -T ₁ ,с	φ_{ui} , градус	А- параметры			
									$\underline{A}_{12}$		$\underline{A}_{22}$	
									эксп	расч	эксп	расч

Нажатию 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 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 $\varphi_{12} = 180 + 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$.

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 $\underline{A}_{21} = \frac{I_1^{xx}}{U_2^{xx}} e^{j\varphi_{12}}$.

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 $\psi_{12} = 180 + 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$

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 $\varphi_{12} = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$

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 $\underline{A}_{12} = \frac{U_1^{k3}}{I_2^{k3}} e^{j\varphi_{12}}$ и $\underline{A}_{22} = \frac{I_1^{k3}}{I_2^{k3}} e^{j\psi_{12}}$. 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).

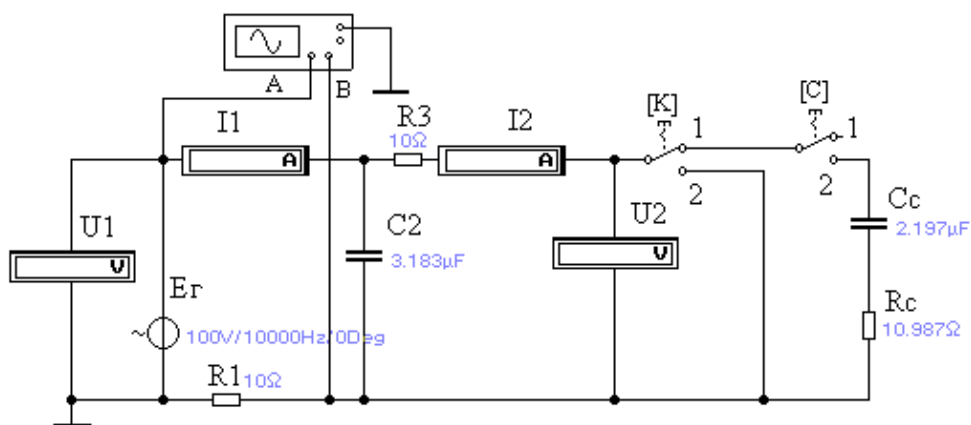


Рисунок 2

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 T2-T1 занести в таблицу расчетных и экспериментальных данных. Фазовый сдвиг между напряжением U_1^{xx} и током I_1^{xx} в градусах рассчитать по формуле $\varphi_{ui} = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$

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 T2-T1. Сдвиг фаз между напряжением U_1^{k3} и током I_1^{k3} рассчитать по формуле $\varphi_{ui} = 360^\circ \cdot (T2 - T1) \cdot f$

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 четырехполюсника (рисунок 2) (сопротивление резистора R_c , емкость конденсатора C_c).

13. В схеме (рис.2) установить **режим согласованной нагрузки**: к выходу четырехполюсника 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 четырехполюсника 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 четырехполюсника с результатами исследований. Сделать выводы.

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

1. Собрать схему электрической цепи (рисунок 3).

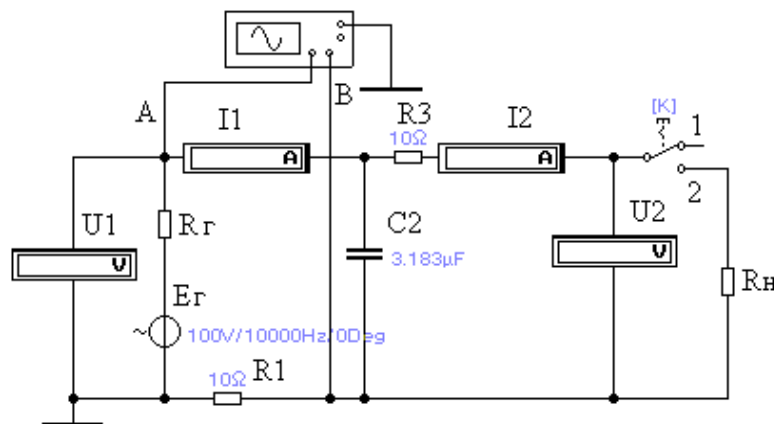


Рисунок 3

2. Установить заданные согласно варианту значения ЭДС, частоты источника, величины элементов схемы четырехполюсника, сопротивлений R_r и R_n .

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 $S_n = U_2 I_2$

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

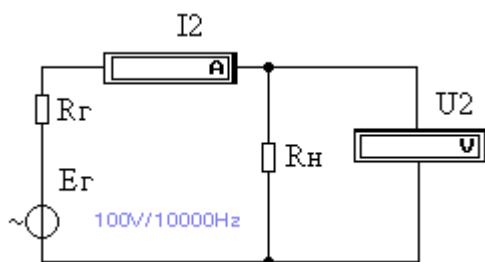


Рисунок 4

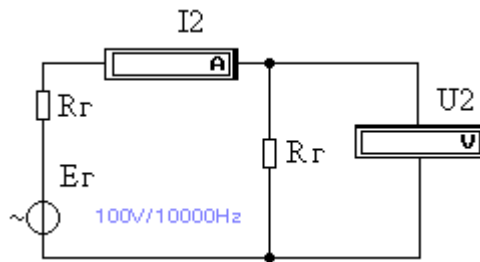


Рисунок 5

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 $U_{2н}$, тока $I_{2н}$ рассчитать полную мощность в нагрузке, несогласованной с источником $S_{2н} = U_{2н} I_{2н}$

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

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

8. Собрать схему электрической цепи (рис.5). Для этого достаточно в схеме (рис.4) установить $R_n = R_r$ (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).

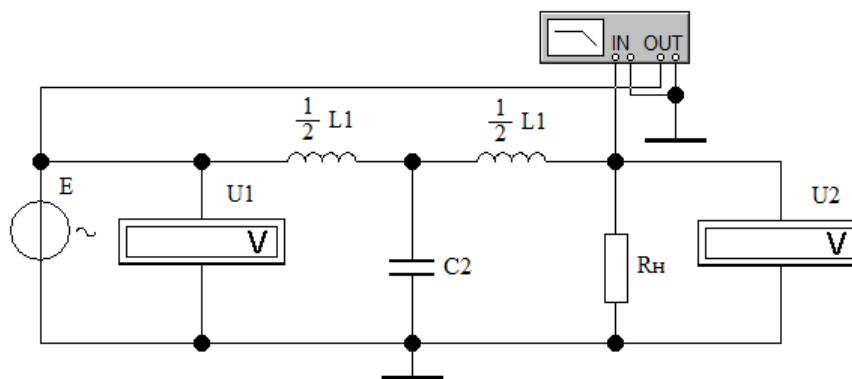


Рисунок 1-Схема исследования частотных характеристик ФНЧ

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).

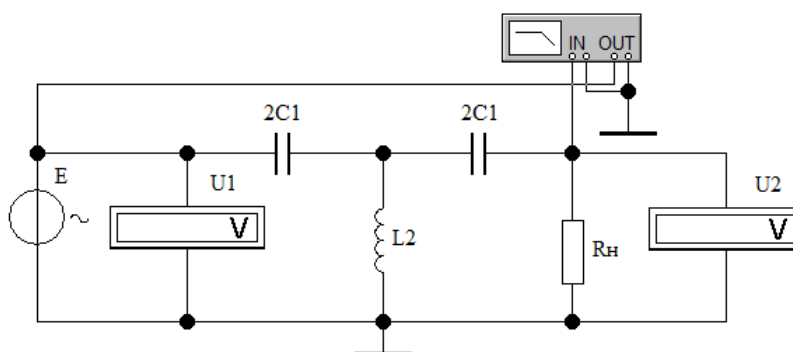


Рисунок 2 - Схема исследования частотных характеристик ФВЧ

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 $E = 1В$, 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.

Лабораторная работа №11

Исследование частотных характеристик активных фильтров

Цель работы:

1. Экспериментальное исследование частотных характеристик ARC-фильтров первого порядка
2. Экспериментальное исследование амплитудно-частотных характеристик ARC-фильтров второго порядка.

Задание на подготовку к лабораторной работе:

- ознакомиться с руководством к лабораторной работе;

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

а) амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) ARC-фильтра первого порядка и построить их графики.

б) амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик (АЧХ и ФЧХ) ARC-фильтров нижних частот второго порядка и построить их графики.

в) амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик полосового ARC-фильтра и построить графики.

Таблица 1-Варианты заданий для предварительного расчета и исследований

Вариант №	R1, кОм	C1, мкФ	R2, кОм	C2, мкФ	R3, кОм	R4, кОм	R5, кОм
1	100	0.1	100	0.1	100	20	20
2	120	0.2	120	0.2	120	20	20
3	150	0.1	150	0.1	150	30	30
4	180	0.2	180	0.2	180	16	16
5	250	0.8	250	0.8	250	10	10
6	300	0.1	300	0.1	300	30	30
7	100	0.2	100	0.2	100	8.0	8.0
8	110	0.3	110	0.3	110	5.0	5.0
9	120	0.1	120	0.1	120	5.0	5.0
10	220	0.1	220	0.1	220	1.5	1.5
11	360	0.2	360	0.2	360	4.0	4.0
12	120	0.3	120	0.3	120	5.0	5.0
13	150	0.1	150	0.1	150	8.0	8.0
14	170	0.2	170	0.2	170	2.0	2.0
15	250	0.1	250	0.1	250	2.5	2.5
16	100	0.1	100	0.1	100	30	30
17	120	0.2	120	0.2	120	8.0	8.0
18	150	0.1	150	0.1	150	5.0	5.0
19	180	0.2	180	0.2	180	5.0	5.0
20	250	0.8	250	0.8	250	1.5	1.5
21	300	0.1	300	0.1	300	4.0	4.0
22	100	0.2	100	0.2	100	5.0	5.0
23	110	0.3	110	0.3	110	8.0	8.0
24	120	0.1	120	0.1	120	2.0	2.0

25	220	0.1	220	0.1	220	2.5	2.5
26	360	0.2	360	0.2	360	20	20
27	120	0.3	120	0.3	120	20	20
28	15	0.1	15	0.1	15	30	30
29	170	0.2	170	0.2	170	16	16
30	250	0.1	250	0.1	250	30	30

Описание схемы исследований

Исследования проводятся на ПЭВМ в среде Electronics Workbench. Схемы исследований содержат источник переменного напряжения, резисторы, конденсаторы, операционный усилитель, бode-плоттер, вольтметры. Бode-плоттер используется для определения амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик.

Задание на исследование:

1. Исследовать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ARC-фильтра нижних частот первого порядка и построить их графики.
2. Исследовать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ARC-фильтра нижних частот второго порядка и построить их графики.
3. Исследовать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) ARC-фильтра верхних частот второго порядка и построить их графики.
4. Исследовать амплитудно-частотные характеристики полосового ARC-фильтра и построить графики.

Порядок проведения исследований.

а) Исследование частотных характеристик ARC- фильтра нижних частот первого порядка

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

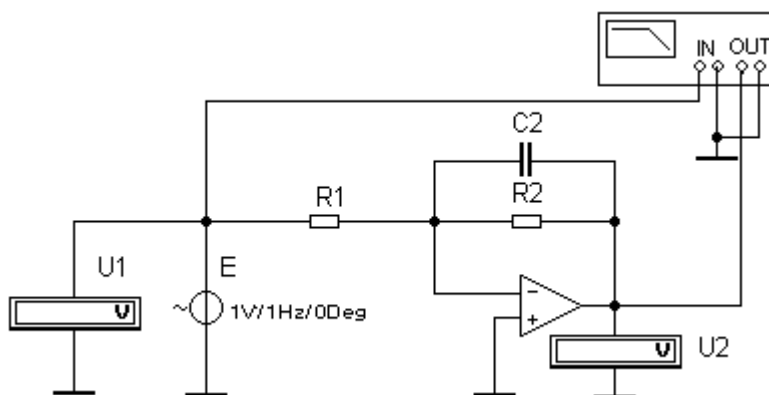


Рисунок 1-Схема исследования частотных характеристик ARC- фильтра нижних частот первого порядка

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резистора R1 и емкости конденсатора C1, значение ЭДС источника E = 1В и частоты f = 1 Гц. 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».

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 ARC- фильтра нижних частот первого порядка

f/frp	0	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)														

4. Рассчитать значение граничной частоты $f_{cp} = \frac{1}{R2 \cdot C2}$

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

6. По результатам исследований построить график АЧХ фильтра.

7. К бode – плоттеру подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» активизировать его. Переключатели на панели «VERTICAL» перевести в положение «LIN», в окне F установить значение 1, в окне I установить значение 0. Переключатели на панели «HORIZONTAL» перевести в положение «LIN», в окне F установить значение 1 kHz, в окне I установить значение 1 Hz.

8. Полученную АЧХ на экране бode – плоттера сравнить с расчетной. Сделать вывод. Перемещая курсором визир по экрану, с помощью бode – плоттера определить граничную частоту и сравнить с расчетной. Сделать вывод.

б) Исследование частотных характеристик ARC- фильтра нижних частот второго порядка

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

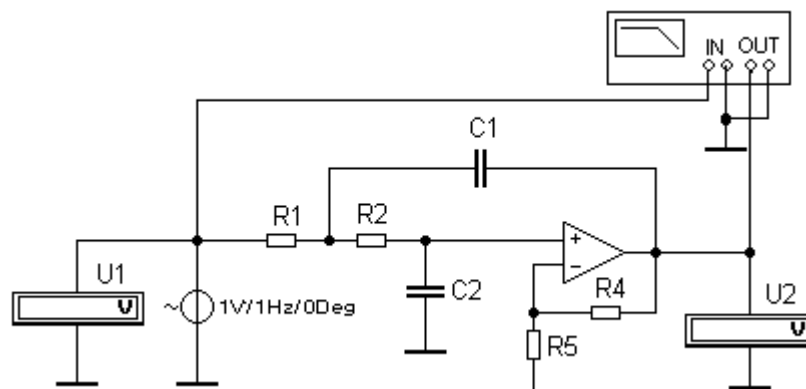


Рисунок 2- Схема исследования частотных характеристик ARC- фильтра нижних частот второго порядка

2. Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резисторов R1, R2 и емкости конденсаторов C1, C2, значение ЭДС источника $E = 1\text{В}$ и частоты $f = 1\text{ Гц}$.

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 расчетных и экспериментальных данных (таблица 3).

Таблица 3-Результаты исследований ARC- фильтра нижних частот второго порядка

f/f_0	0	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
$f, \text{Гц}$														
$U_2, \text{В}$														
$U_1, \text{В}$														
$H(f)$														

4. Рассчитать значение частоты
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1 \cdot C1 \cdot R2 \cdot C2}}$$

5. Изменяя частоту f источника согласно таблице 3 выполнить п. 3.

6. По результатам исследований построить график АЧХ фильтра

7. К бode – плоттеру подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» активизировать его. Переключатели на панели «VERTICAL» перевести в положение «LIN», в окне F установить значение 5, в окне I установить значение 0. Переключатели на панели «HORIZONTAL» перевести в положение «LIN», в окне F установить значение 1 kHz, в окне I установить значение 1 Hz.

8. Полученную АЧХ на экране бode – плоттера сравнить с расчетной. Сделать вывод. Перемещая курсором визир по экрану, с помощью бode – плоттера определить частоту ω_m , при которой АЧХ достигает максимального значения H_m и сравнить с расчетной. Сделать вывод.

б) Исследование частотных характеристик ARC- фильтра верхних частот второго порядка

1.Собрать схему электрической цепи (рис.3).

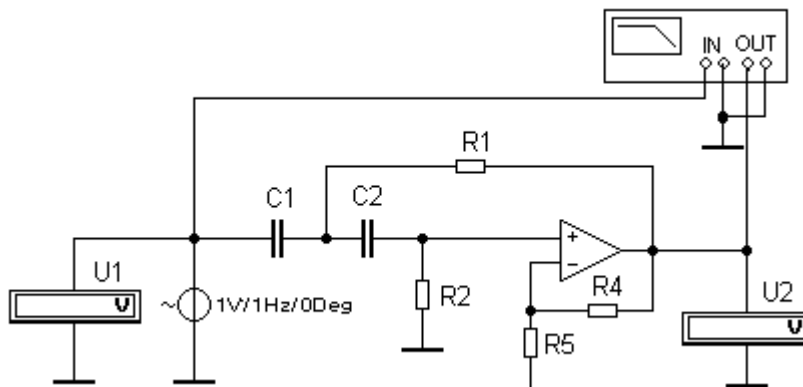


Рисунок 3- Схема исследования частотных характеристик ARC- фильтра верхних частот второго порядка

2.Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резисторов R1, R2 и емкости конденсаторов C1, C2, значение ЭДС источника E =1В и частоты f = 1 Гц.

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 расчетных и экспериментальных данных (таблица 4).

Таблица 4- Результаты исследований ARC- фильтра верхних частот второго порядка

f/f ₀	0	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)														

4. Рассчитать значение частоты $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{R1 \cdot C1 \cdot R2 \cdot C2}}$

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

6. По результатам исследований построить график АЧХ фильтра

7. К бode – плоттеру подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» активизировать его. Переключатели на панели «VERTICAL» перевести в положение «LIN», в окне F установить значение 5, в окне I установить значение 0. Переключатели на панели «HORIZONTAL» перевести в положение «LIN», в окне F установить значение 1 kHz, в окне I установить значение 1 Hz.

8. Полученную АЧХ на экране бode – плоттера сравнить с расчетной. Сделать вывод. Перемещая курсором визир по экрану, с помощью бode – плоттера определить частоту ω_m , при которой АЧХ достигает максимального значения H_m и сравнить с расчетной. Сделать вывод.

г) Исследование частотных характеристик полосового фильтра

1.Собрать схему электрической цепи (рис. 4).

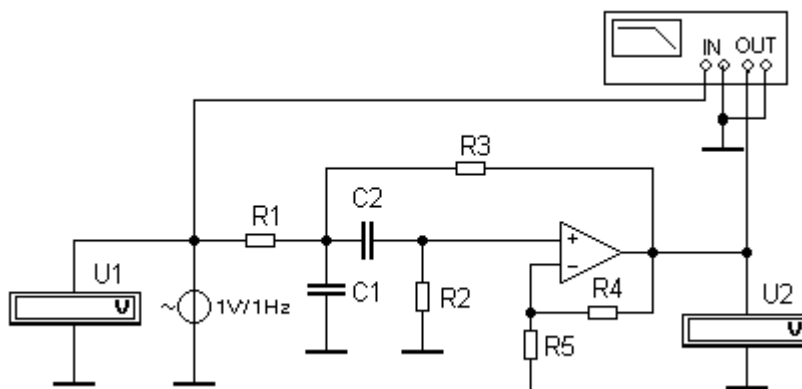


Рисунок 4- Схема исследования частотных характеристик полосового звена

2.Установить заданные согласно варианту величины сопротивления резисторов R1, R2 и емкости конденсаторов C1, C2, значение ЭДС источника $E = 1V$ и частоты $f = 1 Гц$.

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 расчетных и экспериментальных данных (таблица 5).

Таблица 5- Результаты исследований полосового ARC- фильтра

f/f_0	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.5	3.0
$f, Гц$														
$U_2, В$														
$U_1, В$														
$H(f)$														

4. Рассчитать значение частоты $f_0 = \frac{\sqrt{R1 + R3}}{2\pi \sqrt{R1 \cdot C1 \cdot R2 \cdot C2 \cdot R3}}$

5. Изменяя частоту f источника согласно таблице 3 выполнить п. 3.

6. По результатам исследований построить график АЧХ фильтра

7. К бode – плоттеру подвести курсор и двойным нажатием левой кнопки «мыши» активизировать его. Переключатели на панели «VERTICAL» перевести в положение «LIN», в окне F установить значение 5, в окне I установить значение 0. Переключатели на

панели «HORIZONTAL» перевести в положение «LIN», в окне F установить значение 1 kHz, в окне I установить значение 1 Hz.

8. Полученную АЧХ на экране бode – плоттера сравнить с расчетной. Сделать вывод. Перемещая курсором визир по экрану, с помощью бode – плоттера определить частоту ω_m , при которой АЧХ достигает максимального значения H_m и сравнить с расчетной. Сделать вывод.

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

Литература

1. Крутов А.В. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 376 с. — 978-985-503-580-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67742.html>
2. Черевко, А.И. Теоретические основы электротехники : учебно-методическое пособие / А.И. Черевко, М.Л. Ивлев ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова. - Архангельск : САФУ, 2015. - Ч. 2. - 94 с. : ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-261-01024-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436290>
3. Рекус, Г.Г. Основы электротехники и электроники в задачах с решениями : учебное пособие / Г.Г. Рекус. - Москва : Директ-Медиа, 2014. - 344 с. - ISBN 978-5-4458-5752-5 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233698>
4. Копылов, А.Ф. Основы теории электрических цепей: Основные понятия и определения. Методы расчета электрических цепей постоянного и переменного тока. Частотные характеристики R – L и R – C цепей : учебное пособие / А.Ф. Копылов, Ю.П. Саломатов, Г.К. Былкова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский Федеральный университет. - Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2013. - Ч. 1. - 666 с. : схем., граф. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-7638-2507-7 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364029>
5. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник для вузов / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М. : Гардарики, 1996. – 638 с. – ISBN 5-06-002160-2
6. Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники : учебник для техникумов / Ф. Е. Евдокимов. – 8-е изд., стер. – М. : Высшая школа : Академия, 2001. – 496 с. : ил. – Гриф: Доп. МО. – Библиогр.: с. 492. – ISBN 5-06-003658-8
7. 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
8. Киреев, К. В. Теоретические основы электротехники : учеб. пособие / К. В. Киреев, В. М. Мякишев ; Самар. гос. техн. ун-т. – Самара : СГТУ, 2008. – 200 с. : ил. – Библиогр.: с. 198. – ISBN 978-5-7964-1081-3

9. Прянишников, В. А. Теоретические основы электротехники.: Курс лекций / В. А. Прянишников. – 4-е изд. – СПб. : КОРОНА принт, 2004. – 368с. – Библиогр.: с. 366. – ISBN 5-7931-0104-7
10. Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники: Учебник. Рек. МО РФ. – 9-е изд., стереотип. – М.:Изд. центр Академия,2004. – 560с. – (Среднее профессиональное образование). – с556.

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

Методические указания

по выполнению практических занятий

по дисциплине «**Теоретические основы электротехники**»
для студентов направления подготовки /специальности

11.03.04 Электроника и нанoeлектроника

шифр и наименование направления подготовки/ специальности

(ЭЛЕКТРОННЫЙ ДОКУМЕНТ)

Никулин В.И. Теоретические основы электротехники: методические указания по выполнению практических занятий. – Ставрополь: СКФУ, 2026.

Методические указания по выполнению практических занятий по дисциплине «Теоретические основы электротехники» соответствуют ГОС ВО. Методические указания к практическим занятиям содержат рекомендации по подготовке к практическим занятиям, индивидуальные задания для расчетов, методику выполнения расчетов, контрольные вопросы для оценки уровня знаний. Методические указания служат логическим дополнением к основным теоретическим положениям, изложенным в учебном пособии: Никулин В.И. Теоретические основы электротехники. - Ставрополь.: СКФУ, 2026.

СОДЕРЖАНИЕ

с

Введение.....	
1. Расчет электрических цепей методом преобразований	
2. Расчет электрических цепей методом наложения и эквивалентного генератора	
3. Расчет электрических цепей методом контурных токов	
4. Расчет электрических цепей методом узловых потенциалов	
5. Расчет цепей синусоидального тока	
6. Расчет трехфазных цепей	
7. Расчет переходных токов и напряжений классическим методом	
8. Расчет переходных токов и напряжений операторным методом	
9. Расчет нелинейных цепей постоянного тока	
10. Расчет первичных параметров четырехполюсников	
11. Расчет характеристических и рабочих параметров четырехполюсников	
12. Анализ длинных линий в режимах бегущих и стоячих волн	
13. Анализ длинных линий в режиме смешанных волн	
14. Расчет согласующих устройств в длинных линиях	
15. Анализ частотных характеристик LC-фильтров типа «к»	
16. Анализ частотных характеристик LC-фильтров типа «т»	
Литература	

Введение

Практические занятия по дисциплине «Теоретические основы электротехники» 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 выставит 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 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 (таблица1.2)

задание №3 Рассчитать параметры эквивалентных источников тока ($J_{\text{э}}$ и $R_{\text{э}}$) для заданных согласно варианту активных электрических цепей (таблица1.3)

Таблица 1.1

Вариант №	Схема, Рисунок №	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R ₄ , Ом	R ₅ , Ом	R ₆ , Ом	R ₇ , Ом	R ₈ , Ом	Определить
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

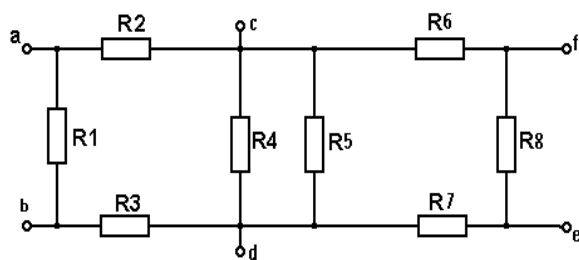


Рисунок 1.1

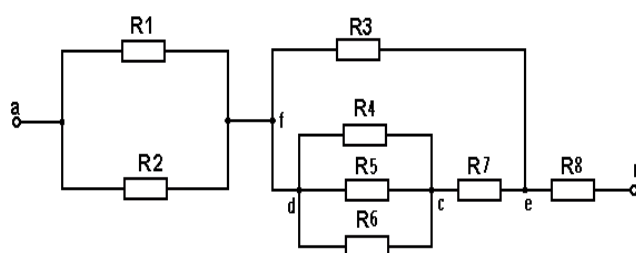


Рисунок 1.2

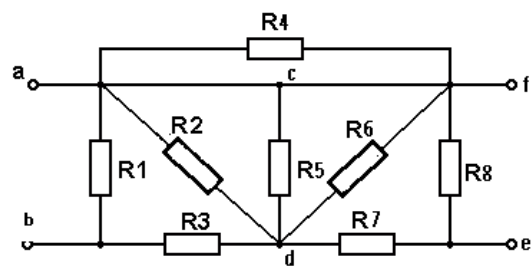


Рисунок 1.3

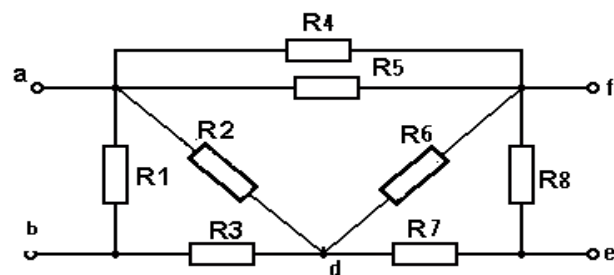


Рисунок 1.4

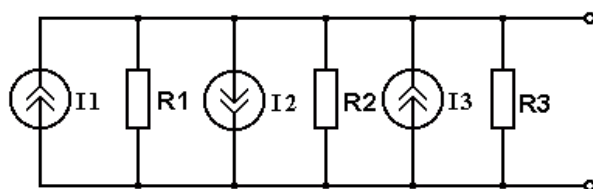


Рисунок 1.5

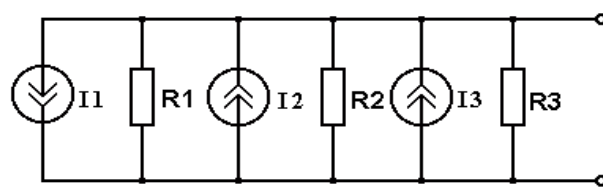


Рисунок 1.6

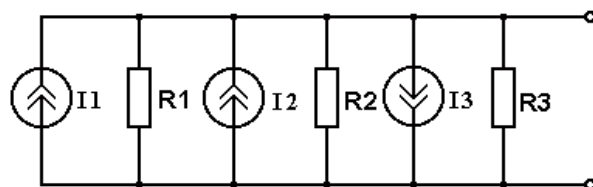


Рисунок 1.7

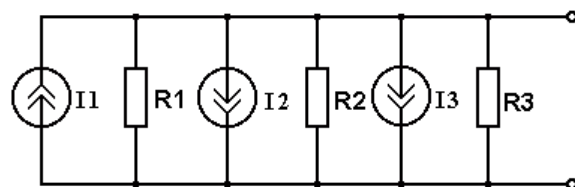


Рисунок 1.8

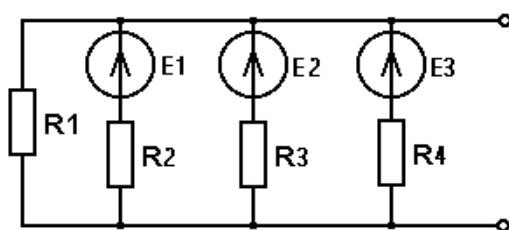


Рисунок 1.9

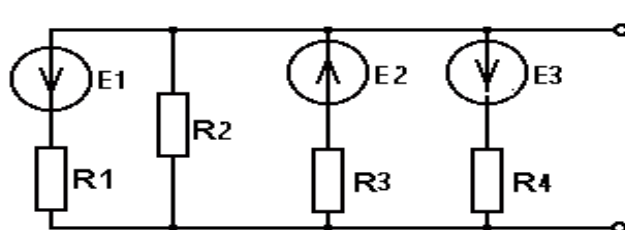


Рисунок 1.10

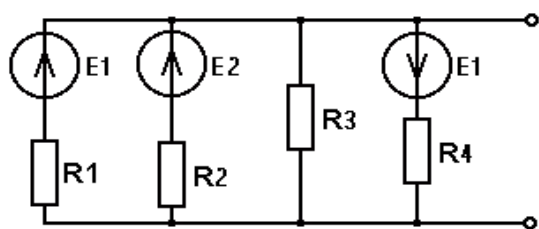


Рисунок 1.11

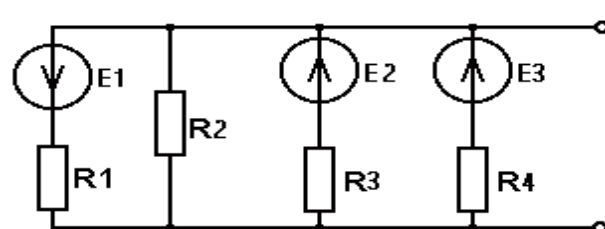


Рисунок 1.12

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

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

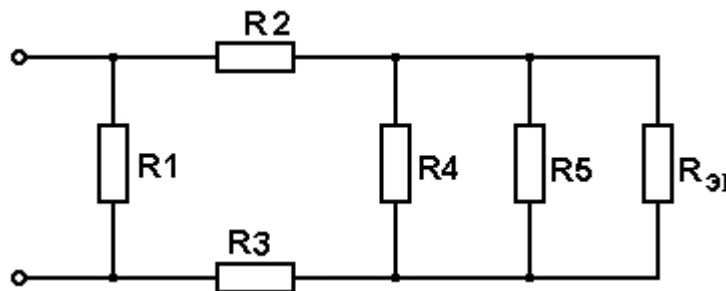


Рисунок 1.13

3. Эквивалентное сопротивление второго участка цепи будет определяться как величина обратная эквивалентной проводимости $G_{\Sigma 2}$

$$R_{\Sigma 2} = \frac{1}{G_{\Sigma 2}} = \frac{1}{0.007} = 142.86 \text{ Ом.}$$

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

$$R_{\Sigma 3} = R_2 + R_{\Sigma 2} + R_3 = 200 + 142.86 + 400 = 742.86 \text{ Ом.}$$

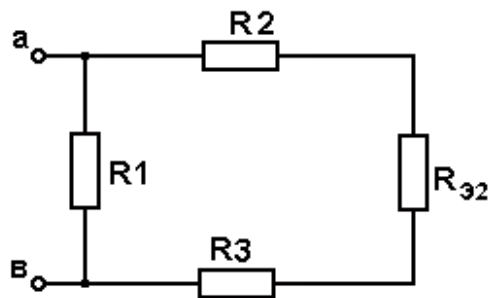


Рисунок 1.14

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

$$G_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_{33}} + \frac{1}{200} + \frac{1}{742.86} = 6.35 \cdot 10^{-3} \text{ См.}$$

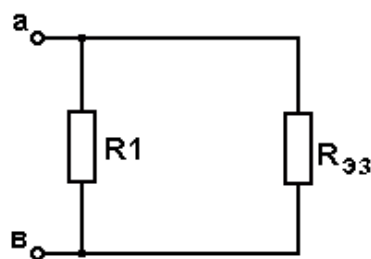


Рисунок 1.15

6. Эквивалентное сопротивление цепи $R_{ав} = \frac{1}{G_3} = \frac{1}{6.35 \cdot 10^{-3}} = 157.58 \text{ Ом.}$

Задание №2. Определить параметры эквивалентного источника тока (I_3 , R_3) 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)

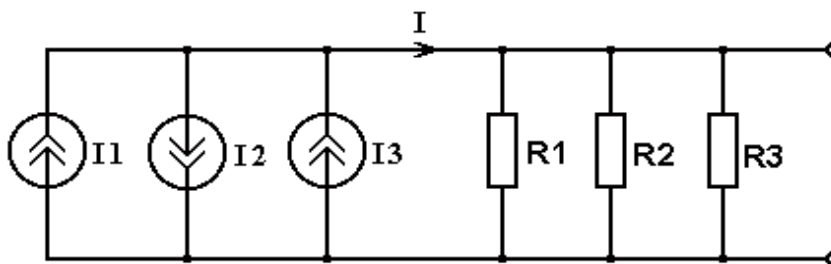


Рисунок 1.16

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 $I_3 = I = 5 \text{ мА.}$

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

$$G_3 = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{100} + \frac{1}{100} + \frac{1}{50} = 0,04 \text{ См.}$$

5. Эквивалентное сопротивление участка цепи с элементами R_1 , R_2 , R_3 будет определяться выражением $R_3 = \frac{1}{G_3} = \frac{1}{0,04} = 25 \text{ Ом.}$

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

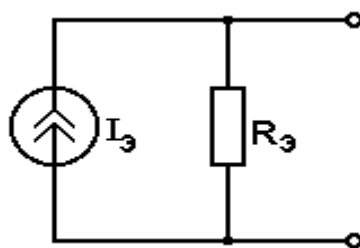


Рисунок 1.17

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)

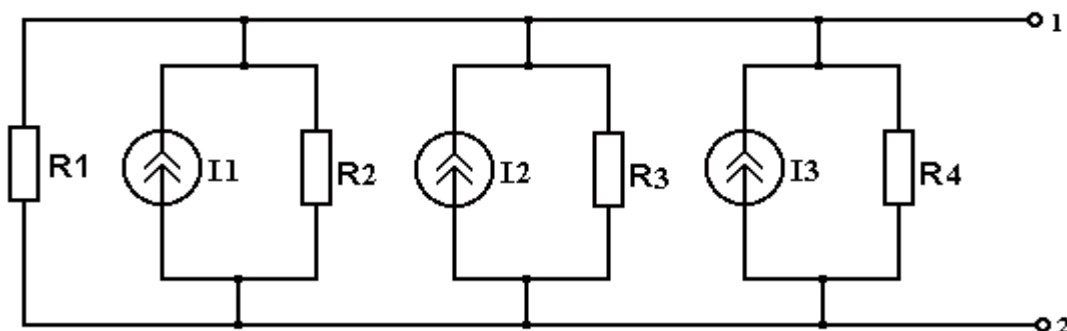


Рисунок 1.18

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)

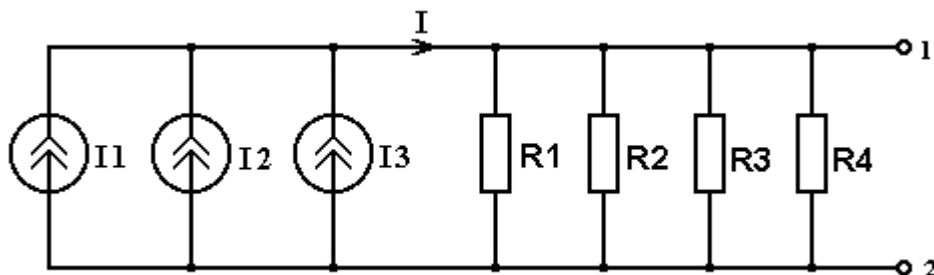


Рисунок 1.19

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

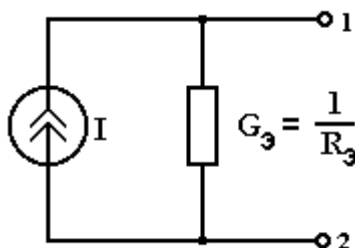


Рисунок 1.20

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

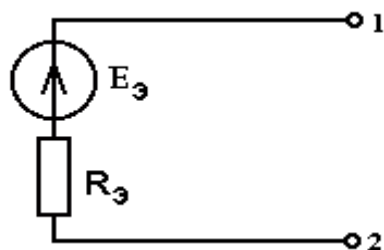


Рисунок 1.21

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 наложения и методом эквивалентного генератора

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.24-29.
2. Бакалов В.П., Воробиенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 31-40.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с.8-9, 11-13.

2. Ответить на вопросы:

1. Сформулируйте принцип суперпозиции.
2. Поясните алгоритм расчета электрической цепи методом наложения.
3. Что такое ветвь электрической цепи?
4. Каким образом определяется эквивалентное сопротивление при последовательном соединении резистивных элементов?
5. Каким образом определяется эквивалентное сопротивление при параллельном соединении резистивных элементов?
6. Каким образом определяется эквивалентная ЭДС при последовательном соединении источников ЭДС?
7. Каким образом определяется эквивалентный ток при параллельном соединении источников тока?
8. Что понимают под схемой замещения электрической цепи?
9. Сформулируйте закон Ома для замкнутой одноконтурной цепи.

10. Сформулируйте закон Ома для ветви из резистивных элементов, не содержащей источники ЭДС.
11. Сформулируйте обобщенный закон Ома.
12. Поясните алгоритм расчета электрической цепи методом эквивалентного генератора.

3. Проанализировать решение задач:

№1.50, №1.43 (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 наложения токи в ветвях для заданной согласно варианту электрической цепи с источниками ЭДС (таблица 1.4)

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

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

задание №4. Рассчитать методом эквивалентного генератора ток в ветви с указанным резистивным элементом 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

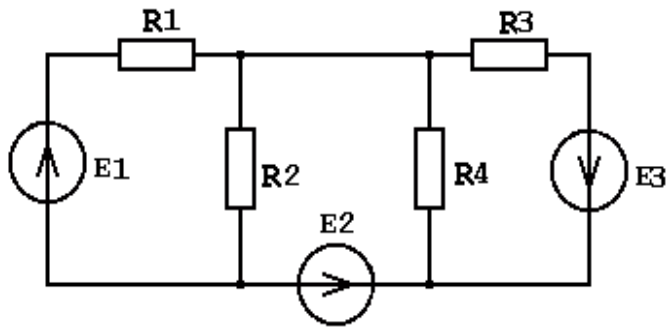


Рисунок 1.22

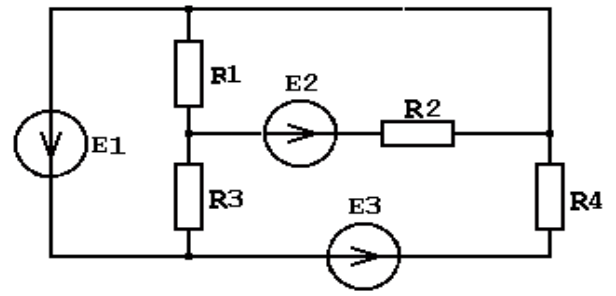


Рисунок 1.23

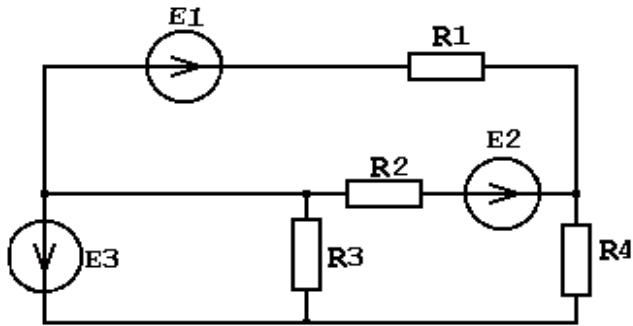


Рисунок 1.24

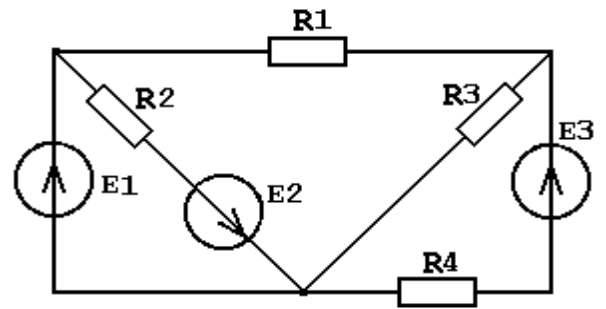


Рисунок 1.25

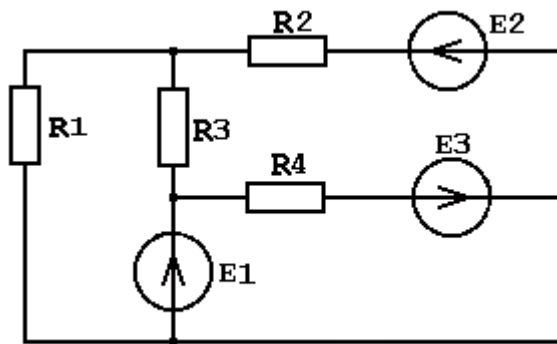


Рисунок 1.26

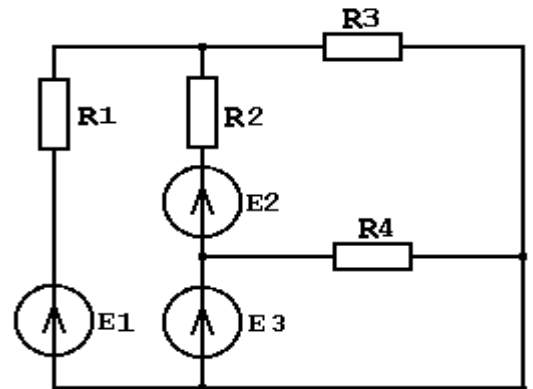


Рисунок 1.27

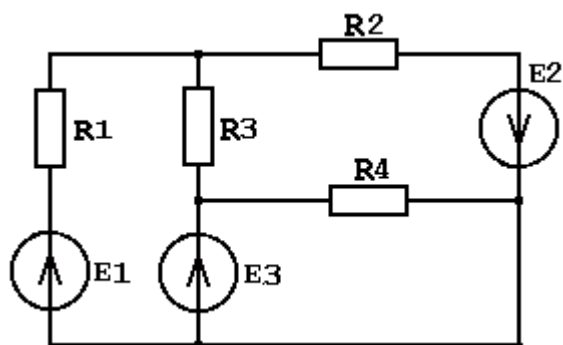


Рисунок 1.28

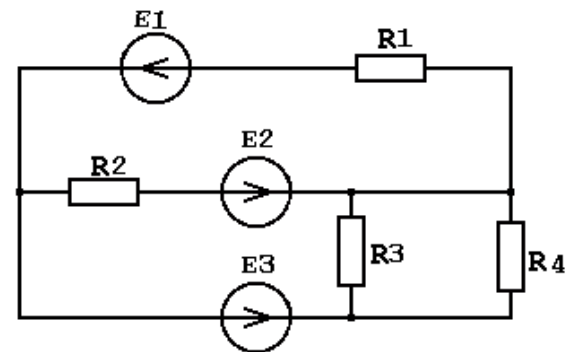


Рисунок 1.29

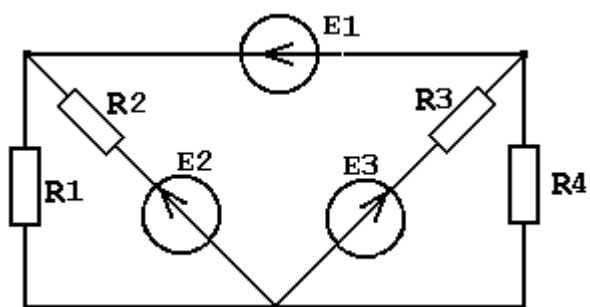


Рисунок 1.30

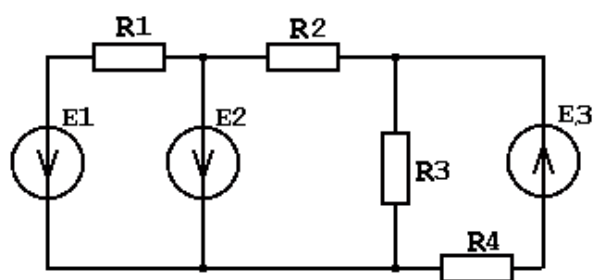


Рисунок 1.31

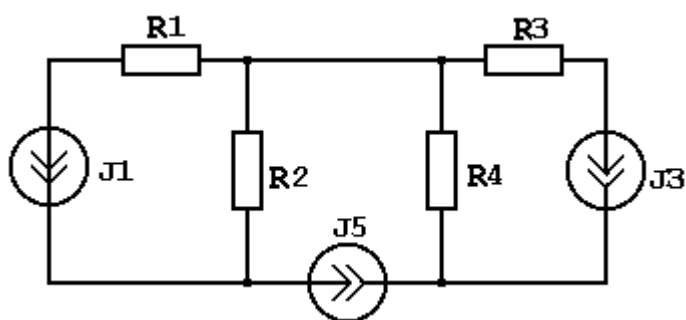


Рисунок 1.32

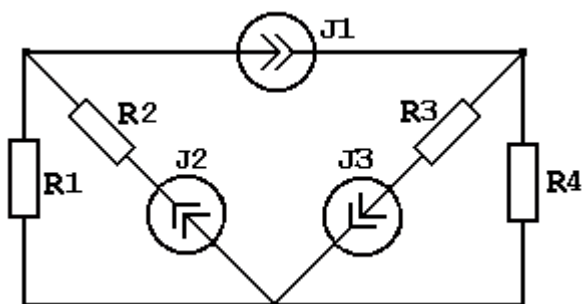


Рисунок 1.33

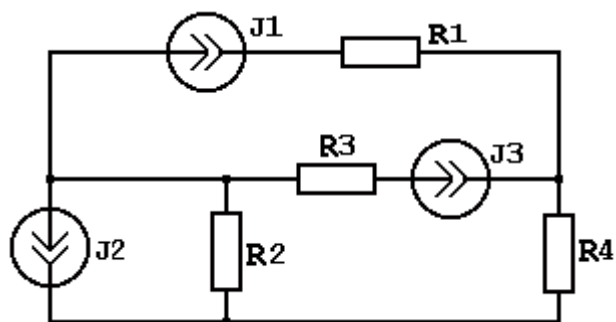


Рисунок 1.34

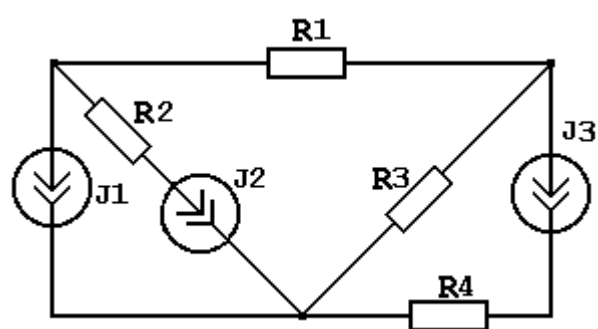


Рисунок 1.35

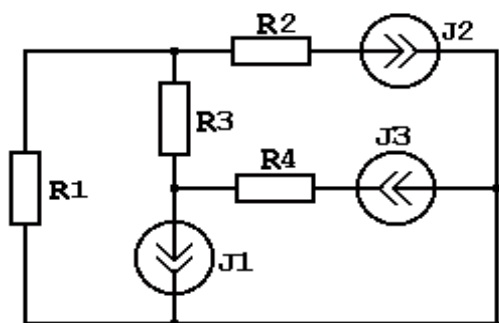


Рисунок 1.36

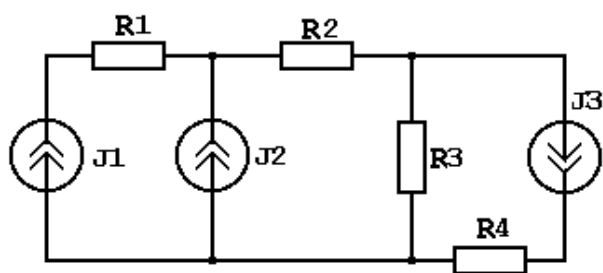


Рисунок 1.37

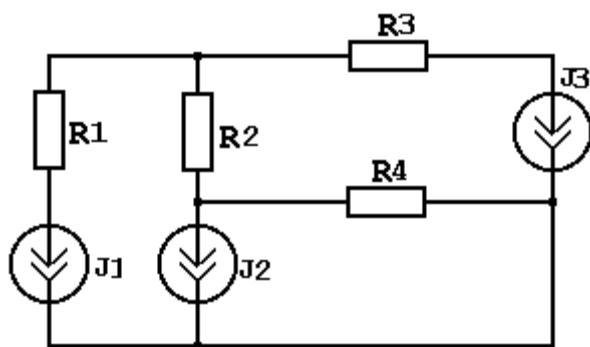


Рисунок 1.38

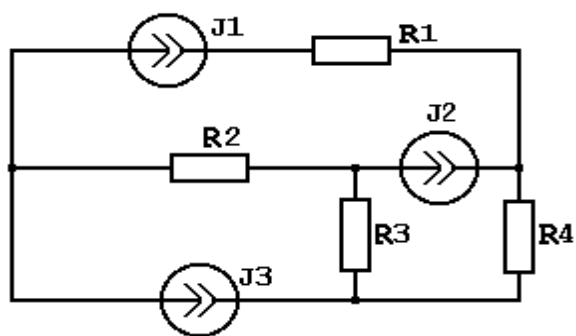


Рисунок 1.39

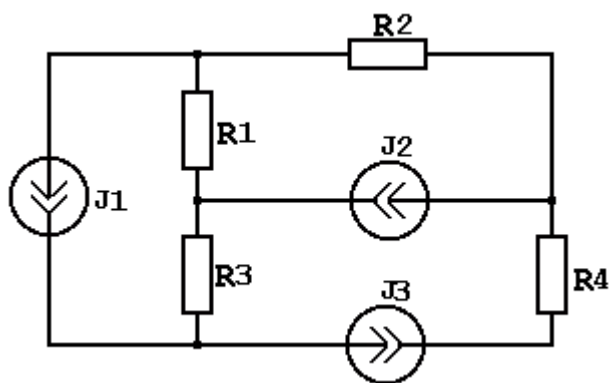


Рисунок 1.40

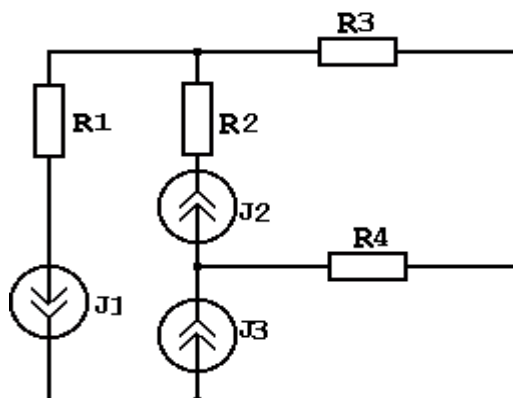


Рисунок 1.41

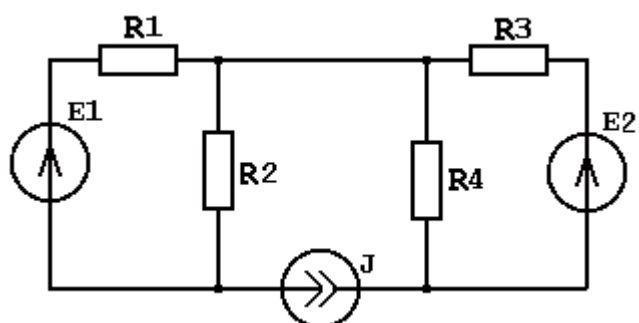


Рисунок 1.42

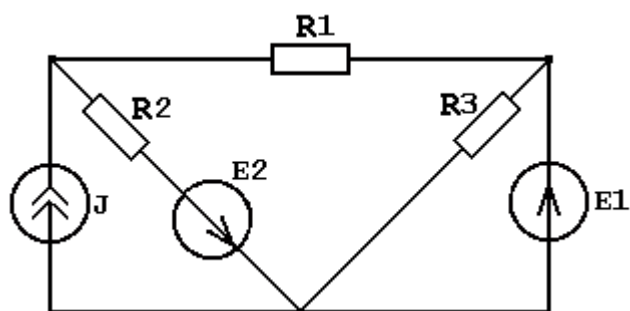


Рисунок 1.43

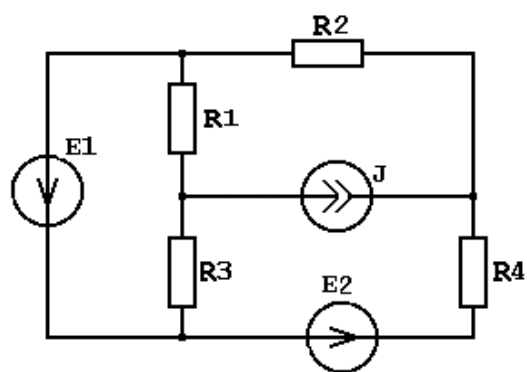


Рисунок 1.44

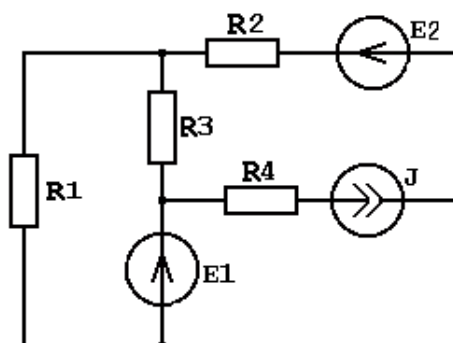


Рисунок 1.45

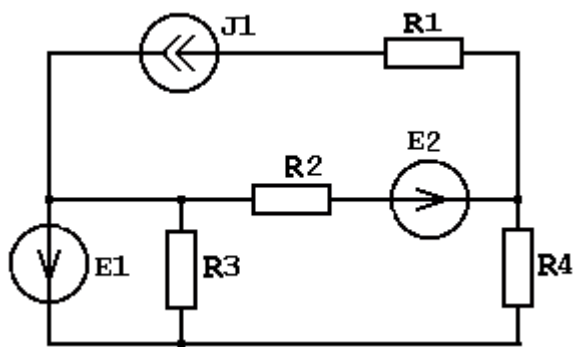


Рисунок 1.46

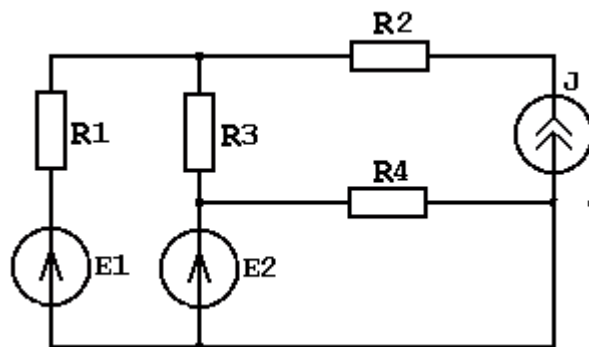


Рисунок 1.47

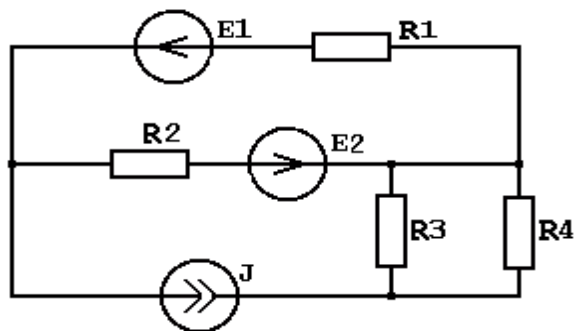


Рисунок 1.48

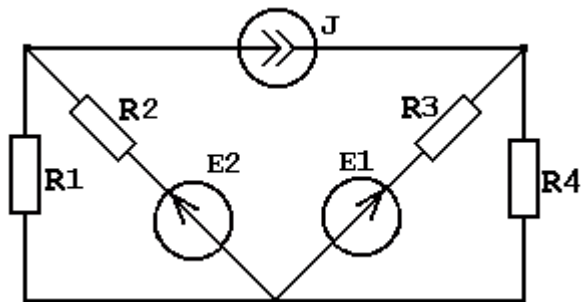


Рисунок 1.49

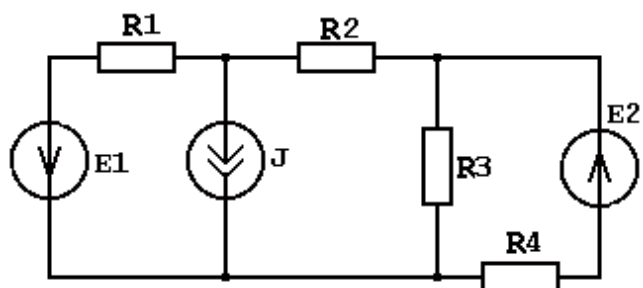


Рисунок 1.50

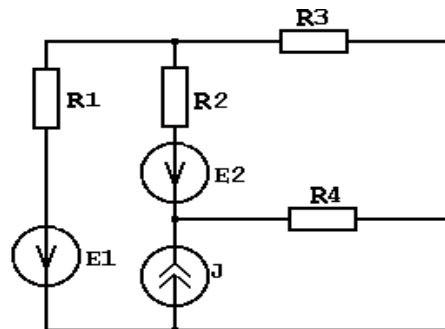


Рисунок 1.51

Пример выполнения заданий (вариант №0)

Задание №1. Рассчитать методом наложения токи в ветвях заданной электрической цепи (рисунок 1.22) с параметрами: $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 300 \text{ Ом}$, $R_3 = 150 \text{ Ом}$, $R_4 = 250 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $E_2 = 20 \text{ В}$, $E_3 = 15 \text{ В}$ (таблица 1.4).

Решение

1. В заданной схеме указываем условно-положительные направления токов в ветвях (рисунок 1.52)

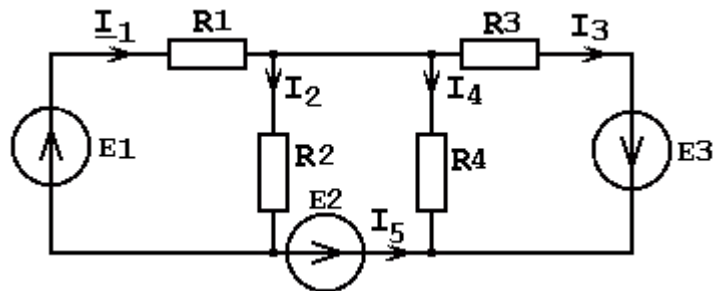


Рисунок 1.52

2. Из схемы (рисунок 1.52) исключаем идеализированные источники ЭДС E_3 и E_2 , рассчитываем токи в ветвях полученной схемы под действием только одного источника E_1 (рисунок 1.53).

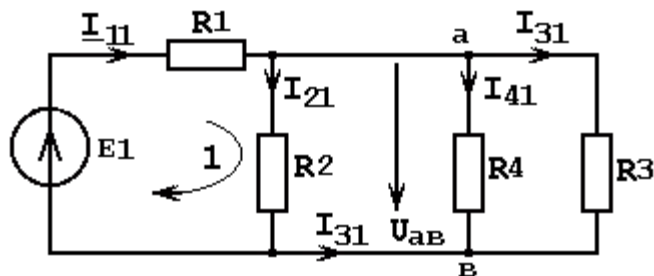


Рисунок 1.53

2.1. Указываем условно положительные направления токов в ветвях (рисунок 1.53).

2.2. Определим напряжение на участке "а-в". Используя второй закон Кирхгофа для контура 1, получим

$$U_{ав} = E_1 - I_{11} \cdot R_1 = 10 - 0.058 \cdot 100 = 4.17 \text{ В}$$

2.3. Ток I_{11} может быть определен на основании закона Ома

$$I_{11} = \frac{E_1}{R_2 + R_{ав}} = \frac{10}{100 + 71.429} = 0.0583 \text{ А}$$

Здесь $R_{ав}$ - эквивалентное сопротивление участка цепи "а-в", проводимость которого определяется выражением

$$G_{ав} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_3} = \frac{1}{300} + \frac{1}{250} + \frac{1}{150} = 0.014 \text{ См.}$$

Отсюда $R_{ав} = \frac{1}{G_{ав}} = 71.429 \text{ Ом.}$

2.4. Пользуясь законом Ома для участка цепи, определим токи

$$I_{21} = \frac{U_{ав}}{R_2} = \frac{4.17}{300} = 0.014 \text{ А,} \quad I_{31} = \frac{U_{ав}}{R_3} = \frac{4.17}{150} = 0.028 \text{ А,} \quad I_{41} = \frac{U_{ав}}{R_4} = \frac{4.17}{250} = 0.017 \text{ А.}$$

2.5. Ток I_{51} определим, используя первый закон Кирхгофа

$$I_{51} + I_{41} + I_{31} = 0, \quad I_{51} = -I_{41} - I_{31} = -0.017 - 0.028 = -0.045 \text{ А.}$$

3. Из схемы (рисунок 1.52) исключим источники ЭДС E_3 и E_1 , выполним расчет токов в ветвях полученной схемы под действием только одного источника E_2 (рисунок 1.54)

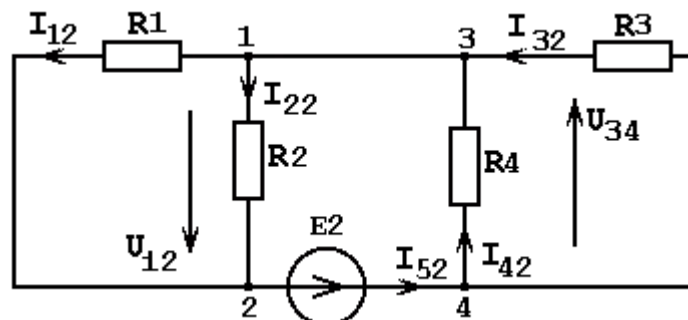


Рисунок 1.54

3.1. Указываем условно-положительные токи в ветвях (рисунок 1.54).

3.2. Определим, пользуясь законом Ома, напряжения на участках 1-2 и 3-4

$$U_{12} = I_{52} \cdot R_{12} = 0.119 \cdot 75 = 8.889 \text{ В,} \quad U_{34} = I_{52} \cdot R_{34} = 0.119 \cdot 93.75 = 11.111 \text{ В.}$$

Здесь R_{12} - эквивалентное сопротивление участка цепи 1-2,

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100 \cdot 300}{100 + 300} = 75 \text{ Ом.}$$

R_{34} - эквивалентное сопротивление участка цепи 3-4

$$R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{150 \cdot 250}{150 + 250} = 93.75 \text{ Ом.}$$

3.3. Ток I_{52} может быть определен по закону Ома

$$I_{52} = \frac{E_2}{R_{12} + R_{34}} = \frac{20}{75 + 93.75} = 0.119 \text{ A.}$$

3.4. Токи в ветвях определяются по закону Ома

$$I_{12} = \frac{U_{12}}{R_1} = \frac{8.889}{100} = 0.089 \text{ A}, \quad I_{22} = \frac{U_{12}}{R_2} = \frac{8.889}{300} = 0.03 \text{ A},$$

$$I_{32} = \frac{U_{34}}{R_3} = \frac{11.111}{150} = 0.074 \text{ A}, \quad I_{42} = \frac{U_{34}}{R_4} = \frac{11.111}{250} = 0.044 \text{ A}.$$

4. Из схемы (рисунок 1.52) исключаем источники E_1 и E_2 и выполним расчет токов в ветвях полученной схемы под действием только источника E_3 (рисунок 1.55).

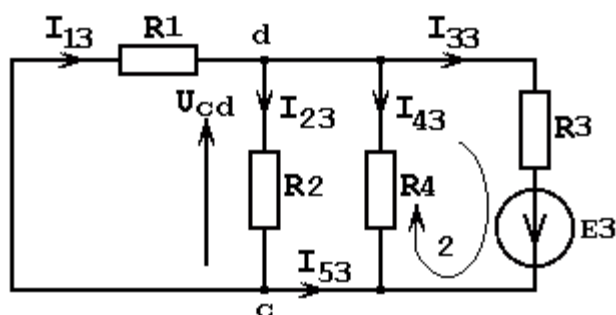


Рисунок 1.55

4.1. Выбираем условно положительные направления токов в ветвях (рисунок 1.55) и напряжения на участке "с-d" электрической цепи.

4.2. Для контура 2 составим уравнение на основании второго закона Кирхгофа $U_{cd} + I_{33}R_3 = E_3$. Отсюда

$$U_{cd} = E_3 - I_{33}R_3 = 15 - 0.072 \cdot 150 = 4.17 \text{ В.}$$

4.3. Ток I_{33} определяем по закону Ома

$$I_{33} = \frac{E_3}{R_3 + R_{cd}} = \frac{15}{150 + 57.69} = 0.072 \text{ A.}$$

Здесь R_{cd} - эквивалентное сопротивление участка цепи "с-d", проводимость которого определяется выражением

$G_{cd} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} = 0.017 \text{ См.}$ Тогда эквивалентное сопротивление

$$R_{cd} = \frac{1}{G_{cd}} = \frac{1}{0.017} = 57.69 \text{ Ом.}$$

4.4. Пользуясь законом Ома для участка цепи, определим токи

$$I_{13} = \frac{U_{cd}}{R_1} = \frac{4.17}{100} = 0.042 \text{ А, } I_{23} = -\frac{U_{cd}}{R_2} = -\frac{4.17}{300} = -0.014 \text{ А, } I_{43} = \frac{U_{cd}}{R_4} = \frac{4.17}{250} = 0.017 \text{ А.}$$

4.5. Ток I_{53} определим по первому закону Кирхгофа:

$$I_{53} + I_{13} - I_{23} = 0$$

$$I_{53} = I_{23} - I_{13} = -0.014 - 0.042 = -0.056 \text{ А.}$$

5. Токи в каждой ветви исходной схемы определяем, как алгебраическую сумму токов в этой ветви от действия каждого источника в отдельности. Со знаком "+" берем токи, совпадающие с направлением тока в исходной схеме:

$$I_1 = I_{11} + I_{13} - I_{12} = 0.058 + 0.042 - 0.089 = 0.011 \text{ А,}$$

$$I_2 = I_{21} + I_{23} + I_{22} = 0.014 - 0.014 + 0.03 = 0.03 \text{ А,}$$

$$I_3 = I_{31} + I_{33} - I_{32} = 0.028 + 0.072 - 0.074 = 0.026 \text{ А,}$$

$$I_4 = I_{41} - I_{43} - I_{42} = 0.017 - 0.017 - 0.044 = -0.044 \text{ А,}$$

$$I_5 = I_{51} + I_{53} + I_{52} = -0.044 - 0.056 + 0.119 = 0.019 \text{ А.}$$

Задание №2. Рассчитать методом наложения токи в заданной электрической цепи с источниками тока (рисунок 1.32), если $J_1 = 10 \text{ А}$, $J_3 = 20 \text{ А}$, $J_2 = 25 \text{ А}$, $R_1 = 10 \text{ Ом}$, $R_2 = 20 \text{ Ом}$, $R_3 = 15 \text{ Ом}$, $R_4 = 35 \text{ Ом}$.

Решение

1. В заданной схеме указываем условно-положительные направления токов (рисунок 1.56).

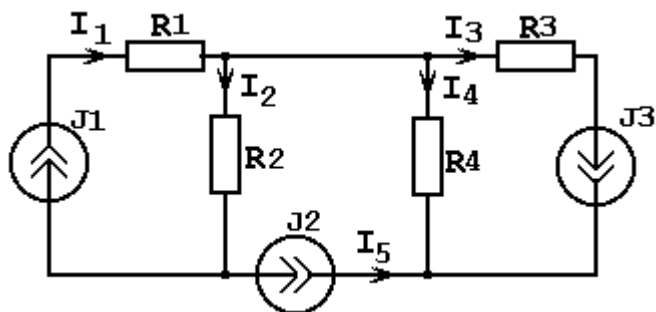


Рисунок 1.56

2. Из схемы (рисунок 1.56) исключим источники тока J_3 и J_2 и рассчитаем токи в ветвях от действия источника J_1 .

2.1. Указываем условно-положительные направления токов в ветвях (рисунок 1.57).

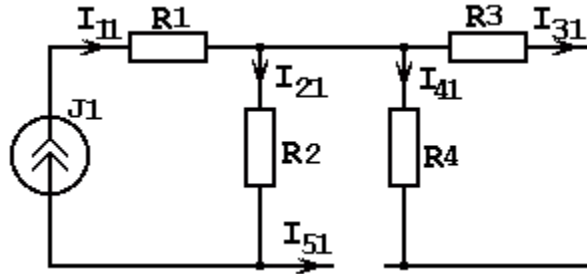


Рисунок 1.57

2.2. Токи $I_{31} = 0$, $I_{41} = 0$, $I_{51} = 0$, т.к. при исключении источника тока, внутреннее сопротивление которого равно ∞ , сопротивление всей ветви становится бесконечно большим, т.е. в ветви появляется "разрыв".

2.3. Токи $I_{11} = I_{21} = I_1 = 10$ А, так как источник тока J_1 является идеальным и величина тока, генерируемого этим источником, не зависит от величины сопротивления, присоединенного к зажимам этого источника.

3. Из схемы (рисунок 1.56) исключим источники тока J_1 и J_2 и рассчитаем токи в ветвях от действия источника J_3 .

3.1. Указываем условно-положительные направления токов в ветвях (рисунок 1.58).

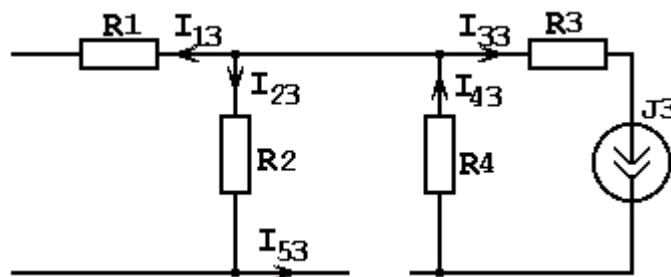


Рисунок 1.58

3.2. Токи $I_{13} = 0$, $I_{23} = 0$, так как из-за разрыва цепи на участке исключения источника J_2 из схемы (рисунок 1.58), воздействие источника тока J_3 на элементы R_1 и R_2 исключено.

3.3. Токи в элементах R_3 и R_4 определяются величиной тока идеализированного источника J_3 : $I_{33} = I_{43} = J_3 = 20 \text{ A}$.

4. Из схемы (рисунок 1.56) исключаем источники J_1 и J_3 и рассчитываем токи в ветвях от действия источника J_2

4.1. Указываем условно-положительные направления токов в ветвях (рисунок 1.59).

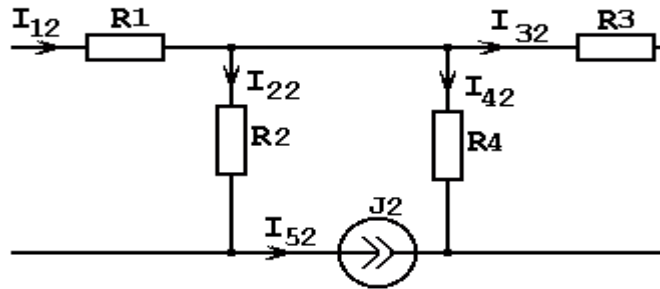


Рисунок 1.59

4.2. Токи $I_{12} = 0$, $I_{32} = 0$, т.к. сопротивление ветвей бесконечно велико.

4.3. Ток $I_{42} = -J_2 = -25 \text{ A}$, так как направление тока источника тока J_2 противоположно условно-положительному направлению тока I_{42} ,

ток $I_{22} = J_2 = 25 \text{ A}$, ток $I_{52} = J_2 = 25 \text{ A}$.

5. Токи в исходной ветви исходной схемы определяем как алгебраическую сумму токов в этой ветви от действия каждого источника тока в отдельности

$$I_1 = I_{11} - I_{13} + I_{12} = 10 - 0 + 0 = 10 \text{ A},$$

$$I_2 = I_{21} + I_{23} + I_{22} = 10 + 0 + 25 = 35 \text{ A},$$

$$I_3 = I_{31} + I_{33} + I_{32} = 0 + 20 + 0 = 20 \text{ A},$$

$$I_4 = I_{41} - I_{43} + I_{42} = 0 - 20 - 25 = -45 \text{ A},$$

$$I_5 = I_{51} + I_{53} + I_{52} = 0 + 0 + 25 = 25 \text{ A}.$$

Задание №3. Рассчитать токи в заданной электрической цепи с источниками ЭДС и тока (рисунок 1.42) методом наложения, если $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 300 \text{ Ом}$, $R_3 = 150 \text{ Ом}$, $R_4 = 250 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $E_3 = 15 \text{ В}$, $J_2 = 0,10 \text{ А}$

Решение

1. В заданной схеме (рисунок 1.42) указываем условно-положительные направления токов (рисунок 1.60).

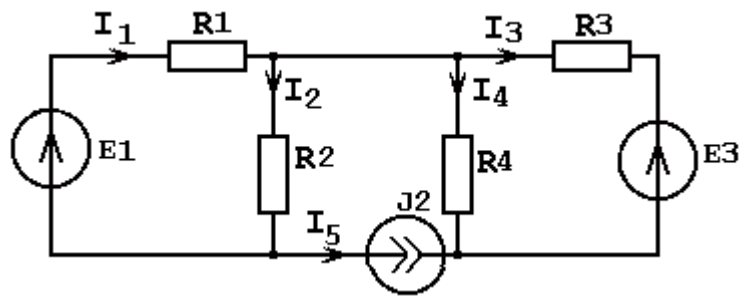


Рисунок 1.60

2. Из схемы (рисунок 1.60) исключаем источники J_2 и E_3 и рассчитываем токи в ветвях полученной схемы (рисунок 1.61)

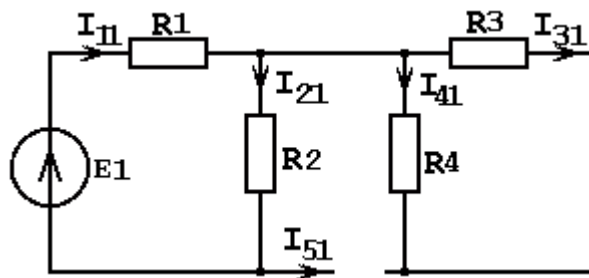


Рисунок 1.61

2.1. Указываем условно-положительные направления токов в ветвях схемы (рисунок 1.61).

2.2. Токи $I_{31} = 0$, $I_{41} = 0$, $I_{51} = 0$, т.к. при исключении источника тока J_2 в ветви, содержащей источник J_2 , сопротивление становится бесконечно большим.

2.3. Так как сопротивления R_1 и R_2 соединены с источником ЭДС E_1 последовательно, то
$$I_{11} = I_{21} = \frac{E_1}{R_1 + R_2} = \frac{10}{100 + 300} = 0.025 \text{ A}.$$

3. Из схемы (рисунок 1.60) исключаем источники J_2 и E_1 (рисунок 1.62).

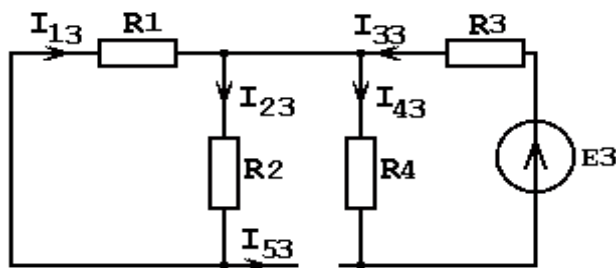


Рисунок 1.62

3.1. Указываем условно-положительные направления токов в ветвях схемы (рисунок 1.62).

3.2. Токи $I_{13} = I_{23} = I_{53} = 0$, так как в ветви, содержащей источники тока J_2 , образуется разрыв.

3.3. Поскольку сопротивление R_3 и R_4 соединены последовательно, то

$$I_{33} = I_{43} = \frac{E_3}{R_3 + R_4} = \frac{15}{150 + 250} = 0.037 \text{ A.}$$

4. Из схемы (рисунок 1.60) исключаем источники ЭДС E_1 и E_3 .
Рассчитываем токи в ветвях схемы

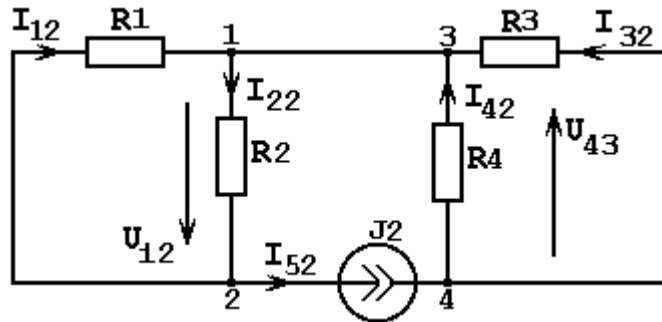


Рисунок 1.63

4.1. Указываем условно-положительные направления напряжений и токов в схеме (рисунок 1.63)

4.2. Элементы R_4 и R_3 , R_1 и R_2 соединены параллельно. Эквивалентные сопротивления участков цепи (1-2) и (3-4):

$$R_{12} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = \frac{100 \cdot 300}{100 + 300} = 75 \text{ Ом}, \quad R_{34} = \frac{R_3 \cdot R_4}{R_3 + R_4} = \frac{150 \cdot 250}{150 + 250} = 93.75 \text{ Ом}.$$

4.3. Напряжения на участках цепи определяются в соответствии с законом Ома: $U_{12} = I_2 \cdot R_{12} = 0.1 \cdot 75 = 7.5 \text{ В}$, $U_{34} = I_2 \cdot R_{34} = 0.1 \cdot 93.75 = 9.375 \text{ В}$.

4.4. Токи в ветвях цепи определяем по закону Ома:

$$I_{12} = \frac{-U_{12}}{R_1} = \frac{-7.5}{100} = -0.075 \text{ A}, \quad I_{22} = \frac{U_{12}}{R_2} = \frac{7.5}{300} = 0.025 \text{ A},$$

$$I_{32} = \frac{U_{43}}{R_3} = \frac{9.375}{150} = 0.062 \text{ A}, \quad I_{42} = \frac{U_{43}}{R_4} = \frac{9.375}{250} = 0.037 \text{ A}, \quad I_{52} = I_2 = 0.1 \text{ A}.$$

5. Токи в каждой ветви исходной схемы определяем как алгебраическую сумму токов в этой ветви от действия каждого источника в отдельности

$$\begin{aligned}
I_1 &= I_{11} + I_{12} + I_{13} = 0.025 - 0.075 + 0 = -0.05 \text{ A}, \\
I_2 &= I_{21} + I_{22} + I_{23} = 0.025 + 0.025 + 0 = 0.05 \text{ A}, \\
I_3 &= I_{31} - I_{32} - I_{33} = 0 - 0.062 - 0.037 = -0.099 \text{ A}, \\
I_4 &= I_{41} - I_{42} + I_{43} = 0 - 0.037 + 0.037 = 0 \text{ A}, \\
I_5 &= I_{51} + I_{52} + I_{53} = 0 + 0.1 + 0 = 0.1 \text{ A}.
\end{aligned}$$

6. Для проверки правильности выполнения расчетов определим баланс мощностей.

6.1. 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

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

6.2. Мощность, потребляемая пассивными элементами схемы

$$\begin{aligned}
P_{\text{пэ}} &= I_1^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2 + I_3^2 \cdot R_3 + I_4^2 \cdot R_4 = \\
&= (-0.05)^2 \cdot 100 + (0.05)^2 \cdot 300 + (-0.099)^2 \cdot 150 + 0^2 \cdot 250 = 2.5 \text{ Вт}.
\end{aligned}$$

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

Задание №4. Рассчитать методом эквивалентного генератора ток в элементе R_4 схемы (Рисунок1.42), если $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 300 \text{ Ом}$, $R_3 = 150 \text{ Ом}$, $R_4 = 250 \text{ Ом}$, $E_1 = 10 \text{ В}$, $E_3 = 15 \text{ В}$, $J_2 = 0.10 \text{ А}$.

Решение

1. Расчет тока I_4 методом эквивалентного генератора напряжения.

1. Эквивалентная схема для расчета тока в элементе R_4 имеет вид (Рисунок1.64)

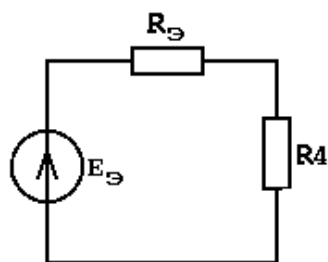


Рисунок1.64

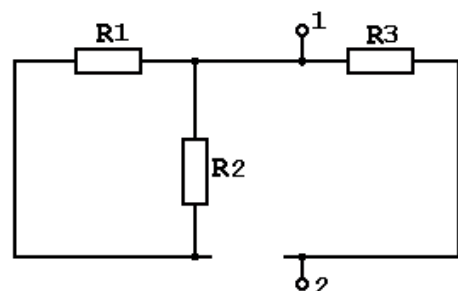


Рисунок1.65

2. Определим параметры эквивалентного генератора напряжения E_3 и R_3 .

2.1. Находим R_3 . Для этого из схемы (см. рисунок 1.42) исключаем все источники ЭДС (E_1 и E_3) и тока (J_2), элемент R_4 и определяем R_3 относительно узлов 1-2, к которым был подсоединен элемент R_4 (Рисунок 1.65). Элементы R_1 и R_2 на величину R_3 не влияют, так как из-за разрыва ветви, содержащей источник J_2 , не соединяются с узлом 2, следовательно, $R_3 = R_3 = 150 \text{ Ом}$.

2.2. Находим $E_3 = U_{12}^{xx}$. Схема для расчета E_3 представлена на (рисунок 1.66)

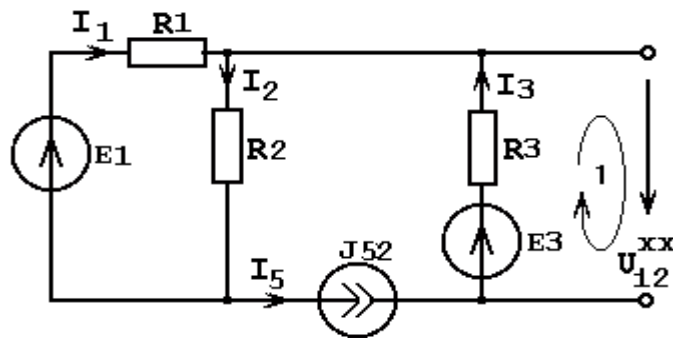


Рисунок 1.66

2.2.1. Указываем условно положительные направления токов и напряжений в схеме (рисунок 1.66).

2.2.2. Для контура 1 (Рисунок 1.66) в соответствии со вторым законом Кирхгофа можно записать $U_{12}^{xx} + I_3 R_3 = E_3$. Отсюда $U_{12}^{xx} = E_3 - I_3 R_3$.

2.2.3. Ток I_3 определим по методу наложения.

2.2.3.1. Из схемы (рисунок 1.66) исключаем E_3 и J_2 и находим ток в R_3 (рисунок 1.67)

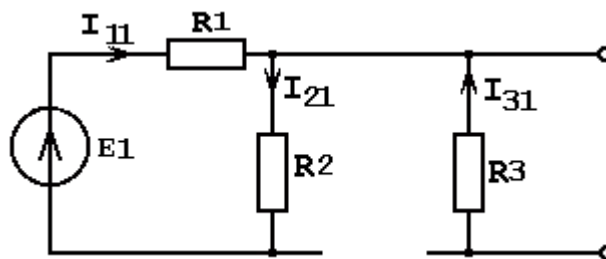


Рисунок 1.67

Ток $I_{31} = 0$. Так как источник E_1 не оказывает влияние на участок цепи с R_3 из-за разрыва цепи, содержавшей источник тока J_2 .

2.2.3.2. Из схемы (Рисунок 1.66) исключаем E_1 и J_2 и находим ток в R_3 (рисунок 1.68).

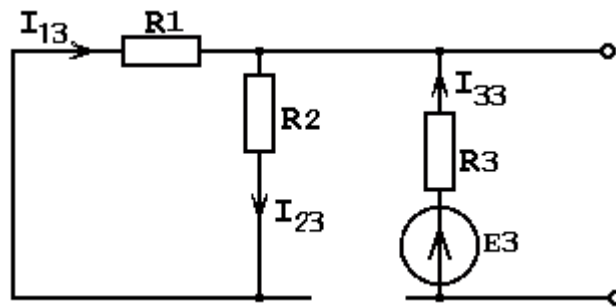


Рисунок 1.68

Ток $I_{33} = 0$. Так как для тока I_{33} нет замкнутого пути.

2.2.3.3. Из схемы (рисунок 1.66) исключаем E_1 и E_2 и находим ток в R_3 (рисунок 1.69).

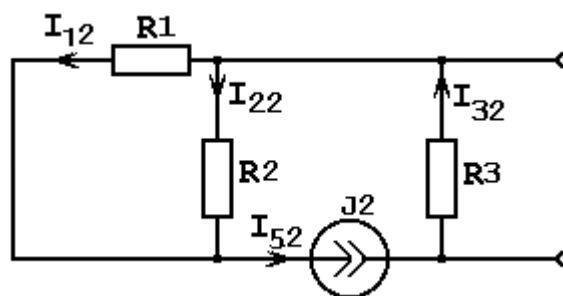


Рисунок 1.69

$I_{32} = I_2 = 0.1$ А, так как источник J_2 и элемент R_3 соединены последовательно.

2.2.3.4. Ток $I_3 = I_{31} + I_{33} + I_{32} = 0 + 0 + 0.1 = 0.1$ А.

3. Ток в элементе R_4 (см. рисунок 1.64) находим по закону Ома

$$I_4 = \frac{E_3}{R_3 + R_4} = \frac{E_3 - I_3 \cdot R_3}{R_3 + R_4} = \frac{15 - 0.1 \cdot 150}{150 + 250} = 0 \text{ А.}$$

2. Расчет тока I_4 методом эквивалентного генератора тока.

1. Эквивалентная схема для расчета тока I_4 имеет вид (рисунок 1.70)

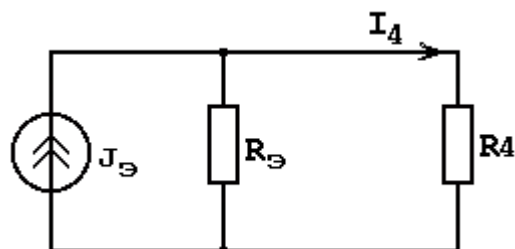


Рисунок 1.70

2. Определяем параметры эквивалентного генератора тока $J_э$, $R_э$.

2.1. Величина R_3 определяется по такому же алгоритму, как и в методе эквивалентного генератора напряжения. Таким образом, $R_3 = R_3 = 150 \text{ Ом}$.

2.2. Находим $J_3 = I_4^{K3}$ методом наложения.

2.2.1. Схема для расчета J_3 представлена на рисунке 1.71

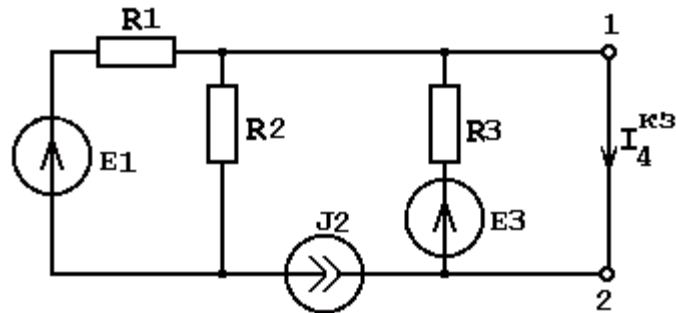


Рисунок 1.71

2.2.2. Указываем условно-положительные направления токов на схеме (рисунок 1.71).

2.2.3. Иключаем E_2 и E_3 из схемы (рисунок 1.71) и находим ток I_{41}^{K3} (рисунок 1.72)

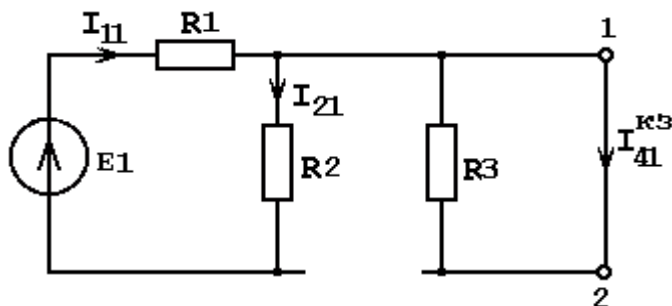


Рисунок 1.72

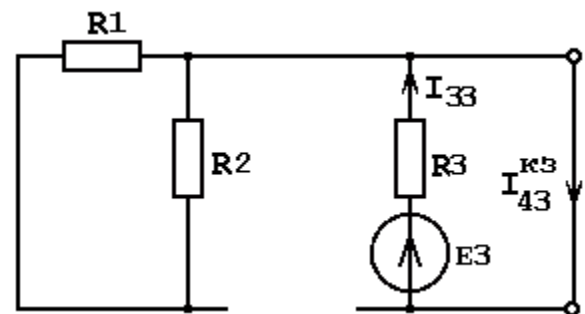


Рисунок 1.73

Ток $I_{41}^{K3} = 0$. Так как источник E_1 из-за разрыва цепи не влияет на ток I_{41}^{K3} .

2.2.4. Иключаем E_1 и J_2 из схемы рисунок 1.71 и определяем ток

$$I_{43}^{K3} = \frac{E_3}{R_3} = \frac{15}{150} = 0.1 \text{ А (рисунок 1.73).}$$

2.2.5. Иключаем из схемы (рисунок 1.71) E_1 и E_3 и определяем ток I_{42}^{K3} (рисунок 1.74)

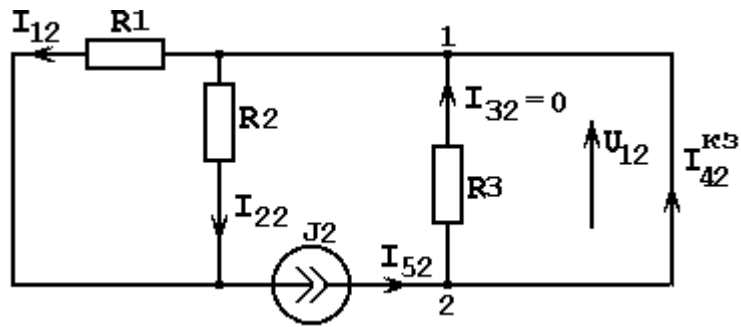


Рисунок 1.74

По первому закону Кирхгофа для узла 2 $I_{52} = I_{32} + I_{42}^{кз}$.

Из-за того, что элемент R_3 зашунтирован (параллельно R_3 включен проводник сопротивлением равным 0), напряжение на нем $U_{21} = 0$ и, следовательно,

$$I_{32} = \frac{U_{21}}{R_3} = 0.$$

Тогда $I_{42}^{кз} = I_{52} = J_2 = 0,1 \text{ А}$.

2.2.6. Ток $I_4^{кз} = I_{41}^{кз} + I_{43}^{кз} - I_{42}^{кз} = 0 + 0,1 - 0,1 = 0$

3. Ток в элементе R_4 (рисунок 1.70) находим, используя правило делителя тока

$$I_4 = I_9 \cdot \frac{R_9}{R_9 + R_4} = I_4^{кз} \cdot \frac{R_9}{R_9 + R_4} = 0 \cdot \frac{150}{150 + 250} = 0.$$

3. 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

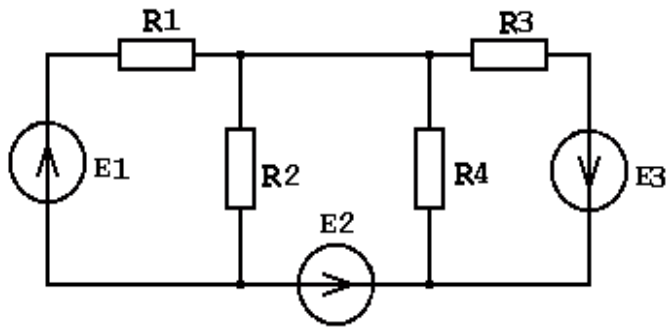


Рисунок 1.22

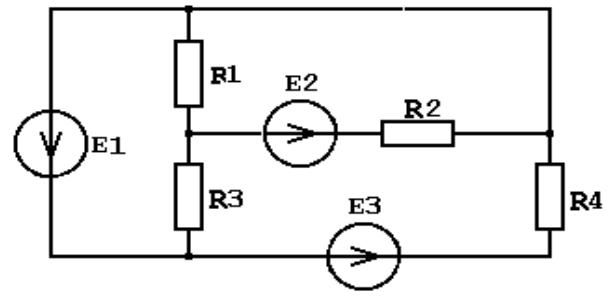


Рисунок 1.23

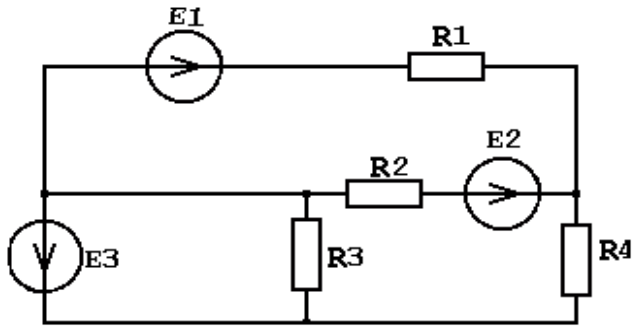


Рисунок 1.24

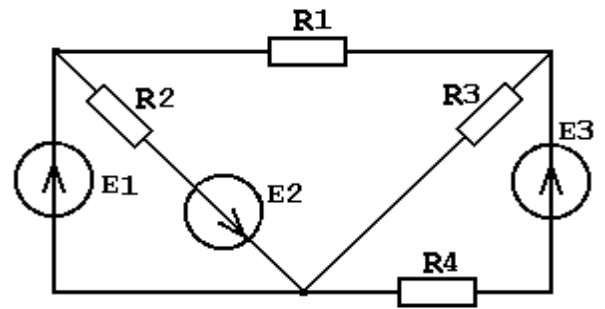


Рисунок 1.25

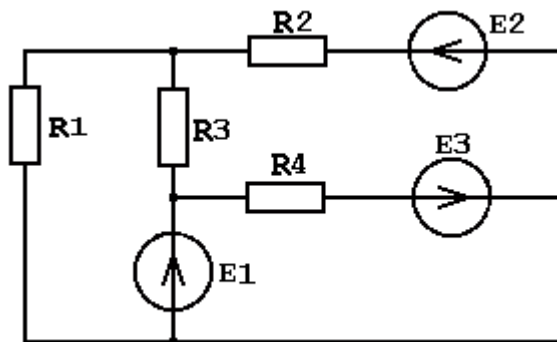


Рисунок 1.26

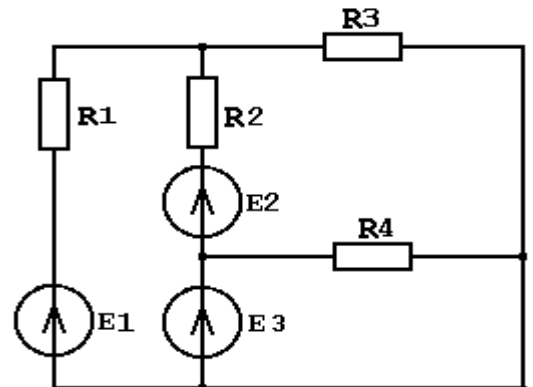


Рисунок 1.27

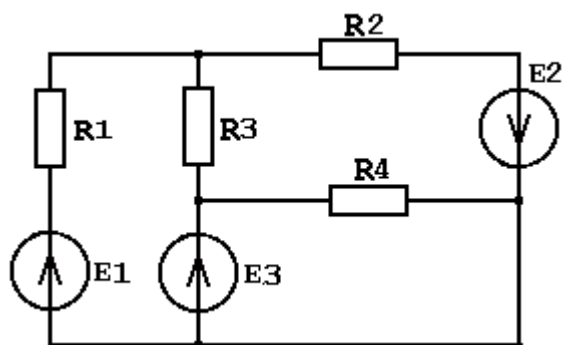


Рисунок 1.28

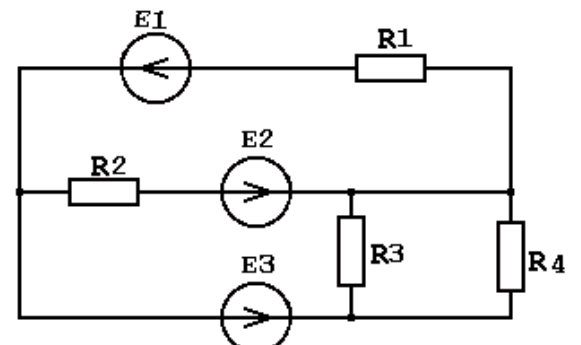


Рисунок 1.29

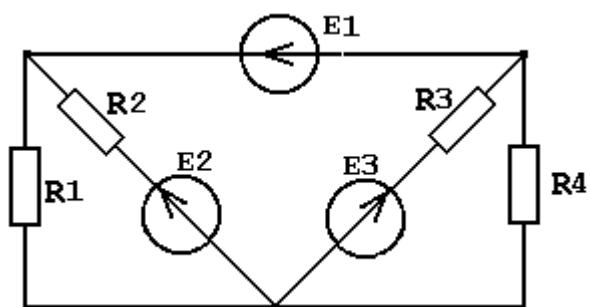


Рисунок 1.30

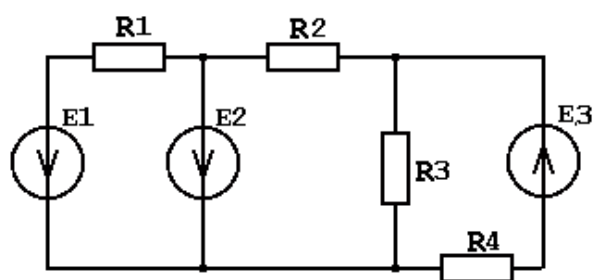


Рисунок 1.31

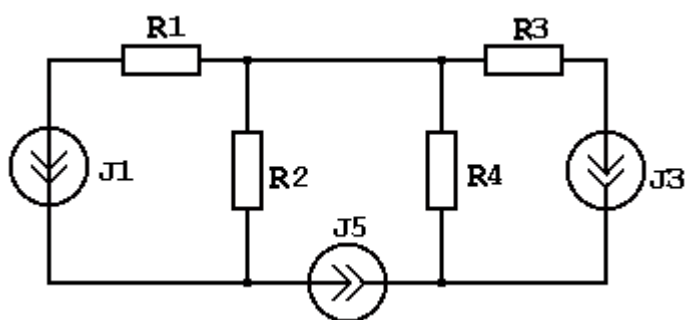


Рисунок 1.32

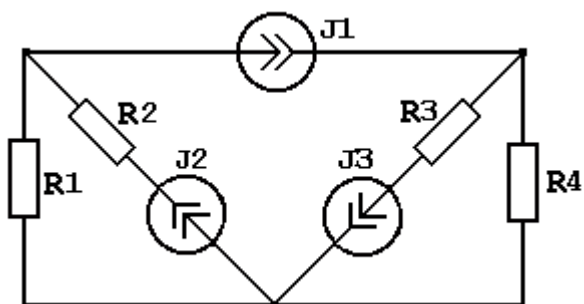


Рисунок 1.33

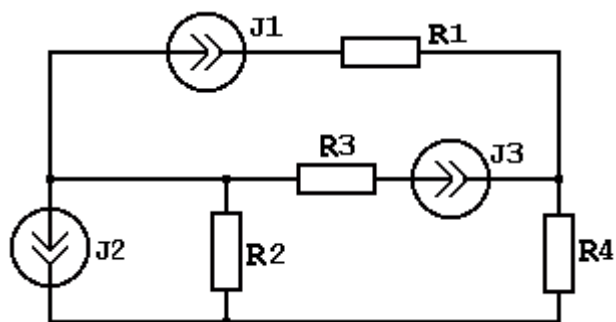


Рисунок 1.34

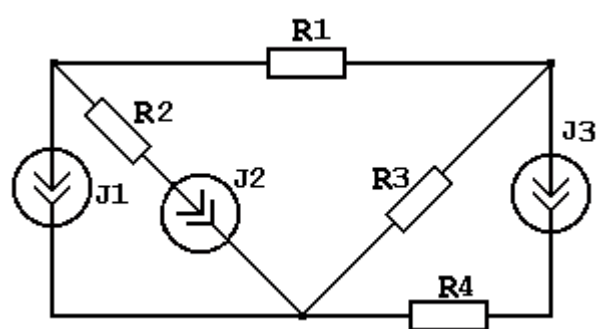


Рисунок 1.35

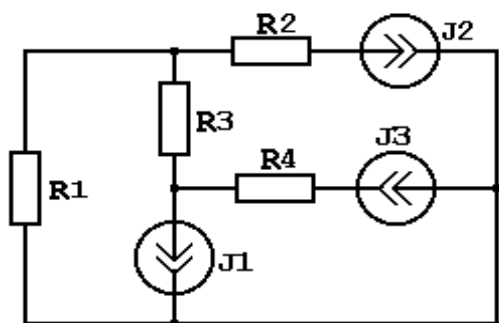


Рисунок 1.36

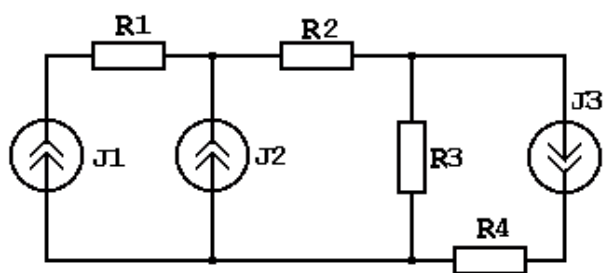


Рисунок 1.37

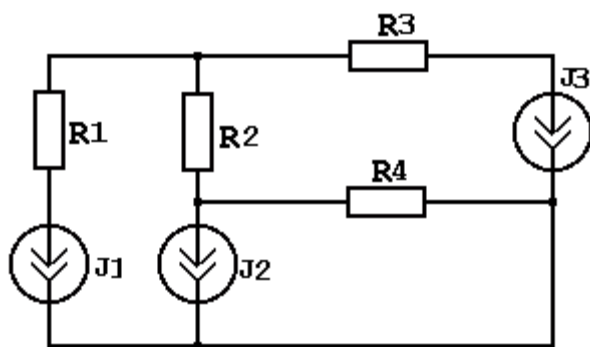


Рисунок 1.38

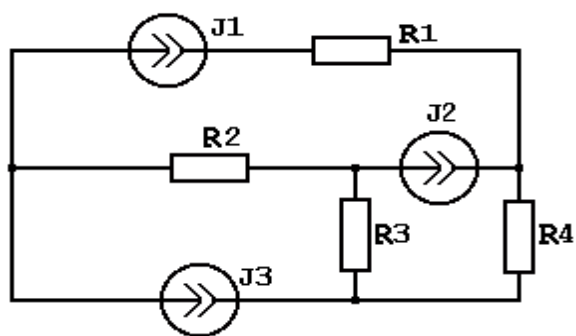


Рисунок 1.39

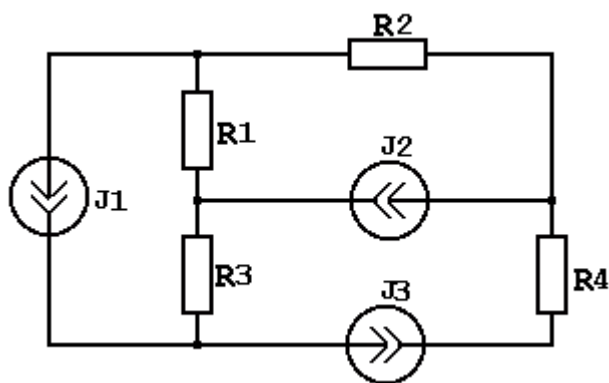


Рисунок 1.40

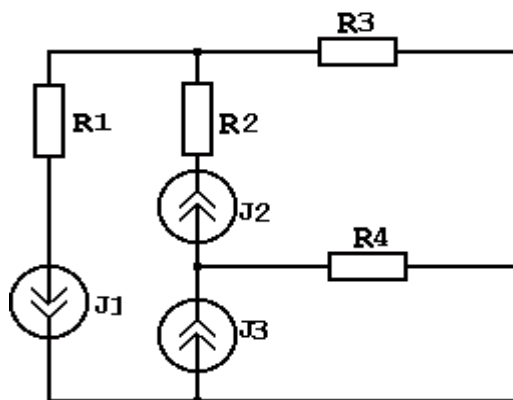


Рисунок 1.41

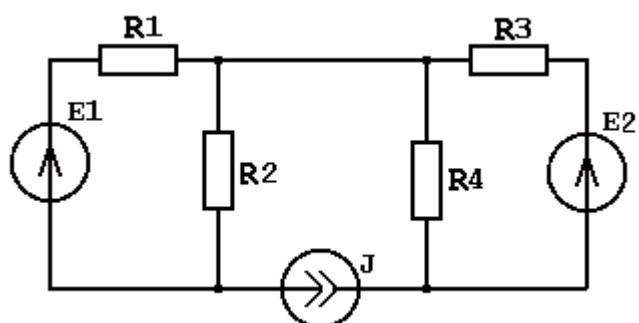


Рисунок 1.42

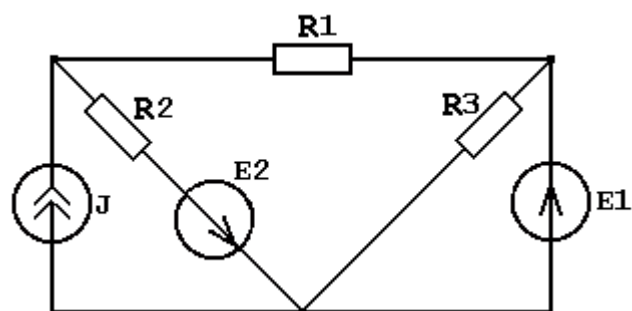


Рисунок 1.43

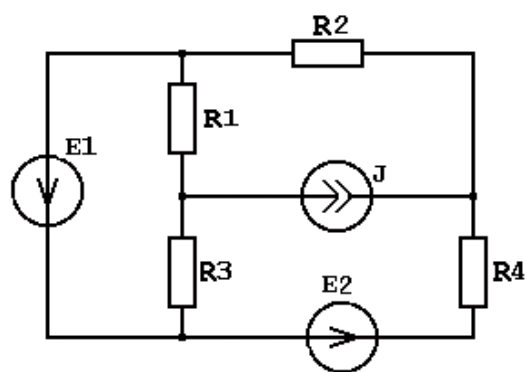


Рисунок 1.44

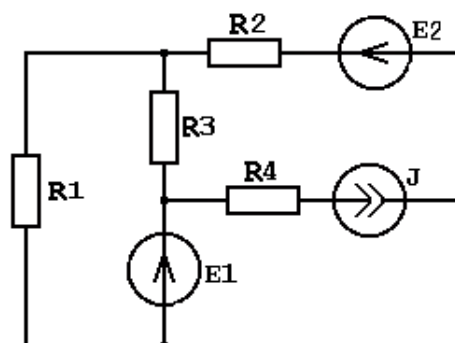


Рисунок 1.45

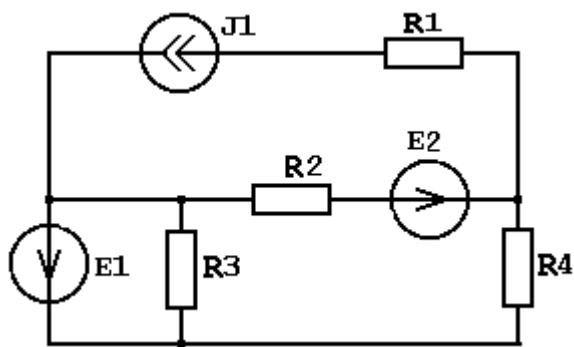


Рисунок 1.46

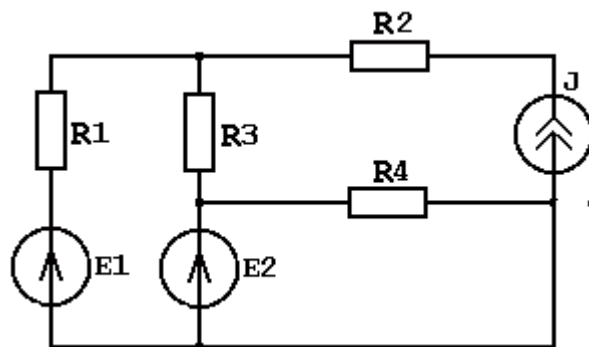


Рисунок 1.47

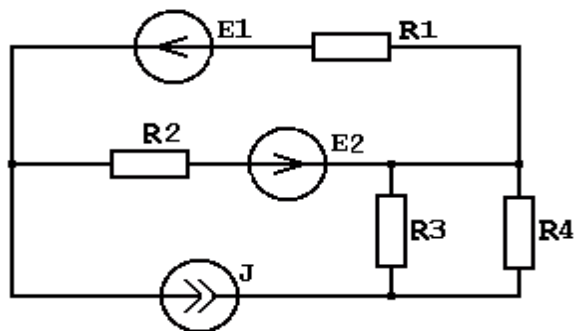


Рисунок 1.48

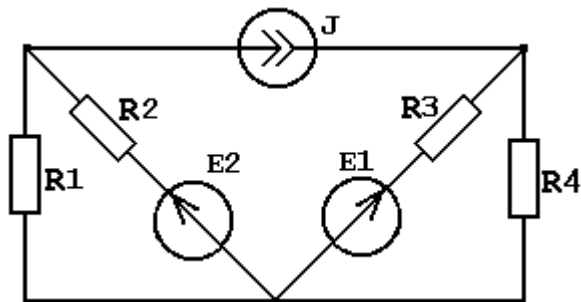


Рисунок 1.49

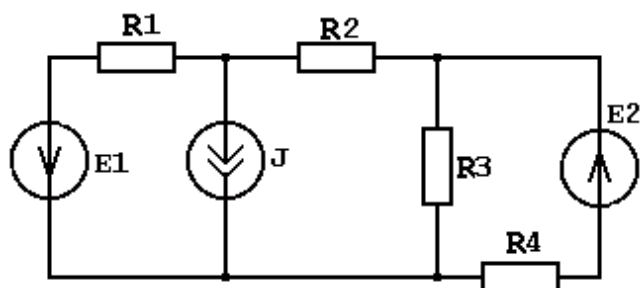


Рисунок 1.50

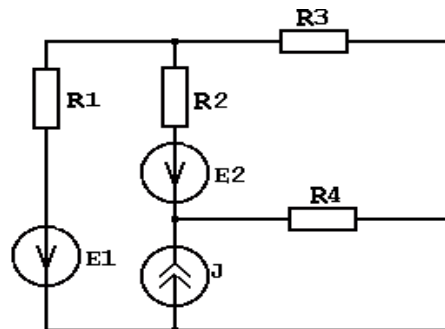


Рисунок 1.51

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)

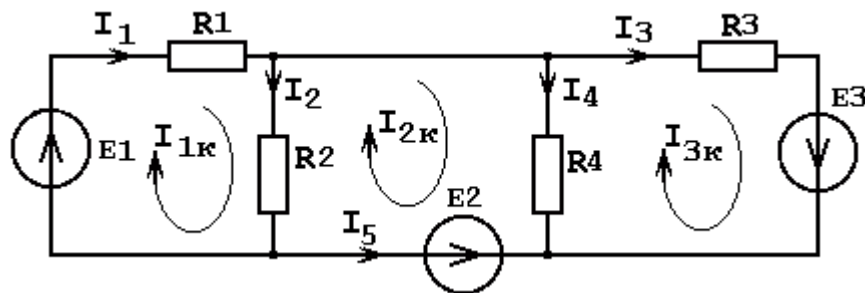


Рисунок 1.75

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

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

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.

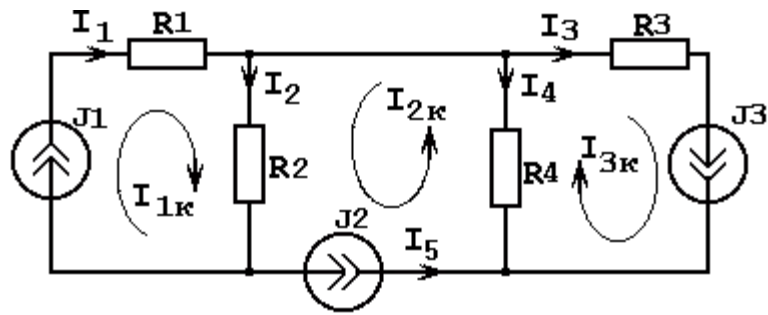


Рисунок 1.76

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.

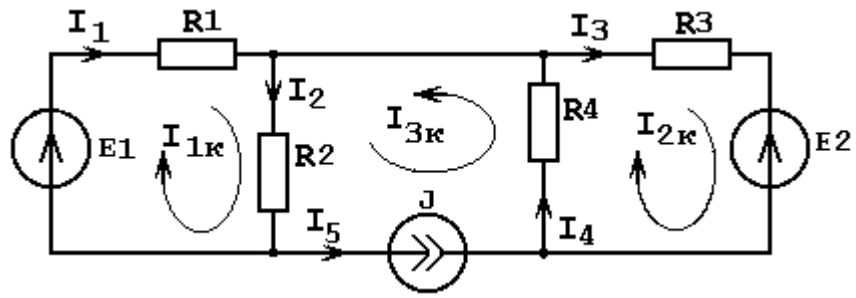


Рисунок 1.77

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 $I_{3к} = J_5$ получим

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

9. Решая систему уравнений

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

получим

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

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

10. Определяем токи в ветвях

$$I_1 = I_{1к} = -0.05 \text{ А},$$

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

$$I_3 = I_{2к} = -0.1 \text{ А},$$

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

$$I_5 = I_{3к} = 0.1 \text{ А}.$$

4. 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).

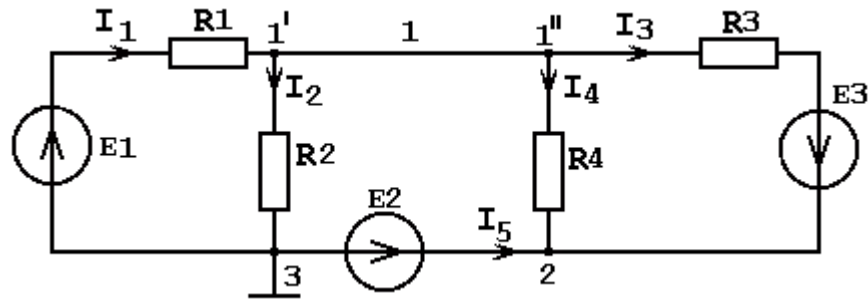


Рисунок 1.78

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 $\varphi_3 = 0$.

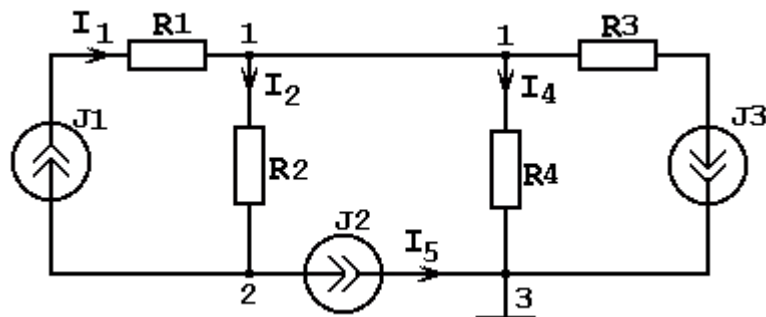


Рисунок 1.79

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

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 $\sum_1 J$ - 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

$$I_2 - I_1 - I_5 = 0$$

$$35 - 10 - 25 = 0$$

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).

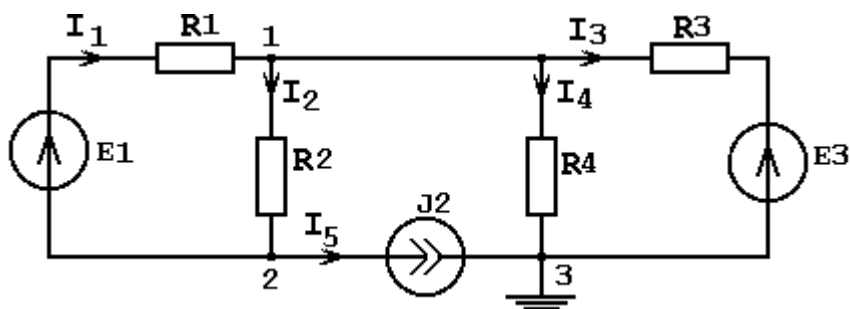


Рисунок 1.80

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

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

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

5. 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., Воробьенко 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 $L=0.1\text{Гн}$ (таблица 2.4), построить векторные и временные диаграммы тока и напряжения, если напряжение на индуктивном элементе $u = 20\sin(10^3 t - 30^\circ)\text{ В}$.

Решение

1. Определим комплексную амплитуду напряжения $\underline{U}_m = U_m e^{j\psi_u} = 20e^{-j30^\circ}\text{ В}$.
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
$$\underline{I}_m = \frac{\underline{U}_m}{\underline{Z}_1} = \frac{20e^{-j30^\circ}}{100e^{j90^\circ}} = 0.2e^{-j120^\circ}\text{ А}.$$

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

5. Строим векторную диаграмму.

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

- 5.2. Определяем длину векторов, соответствующих амплитудам напряжения и

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

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

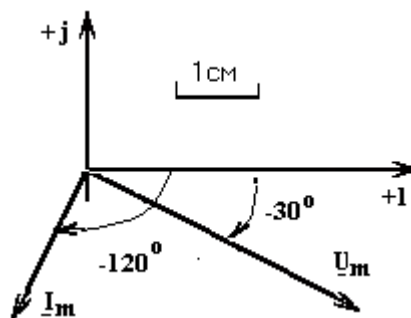


Рисунок 2.5

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

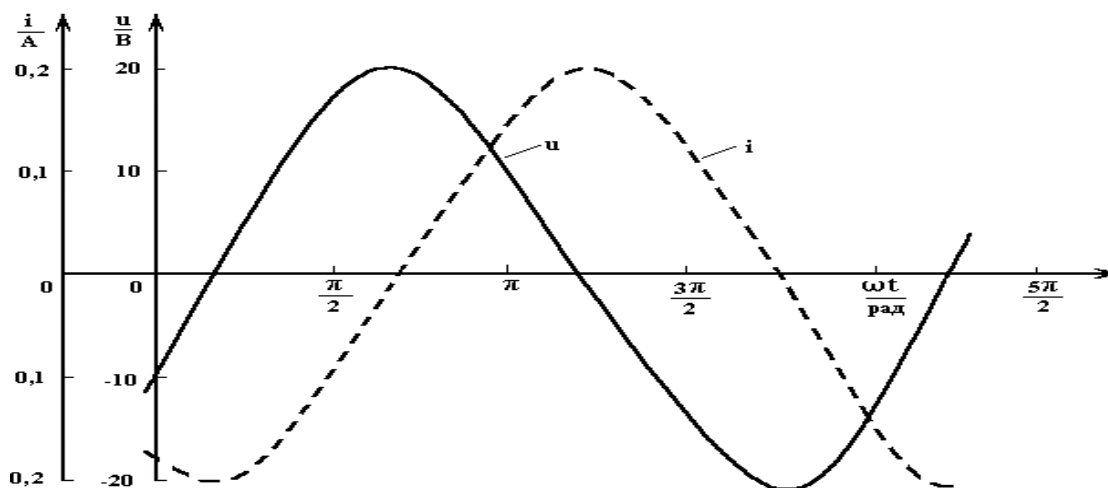


Рисунок 2.6

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

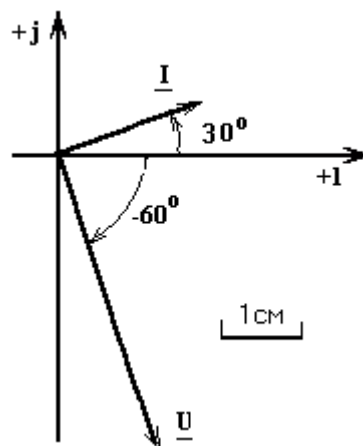


Рисунок 2.7

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

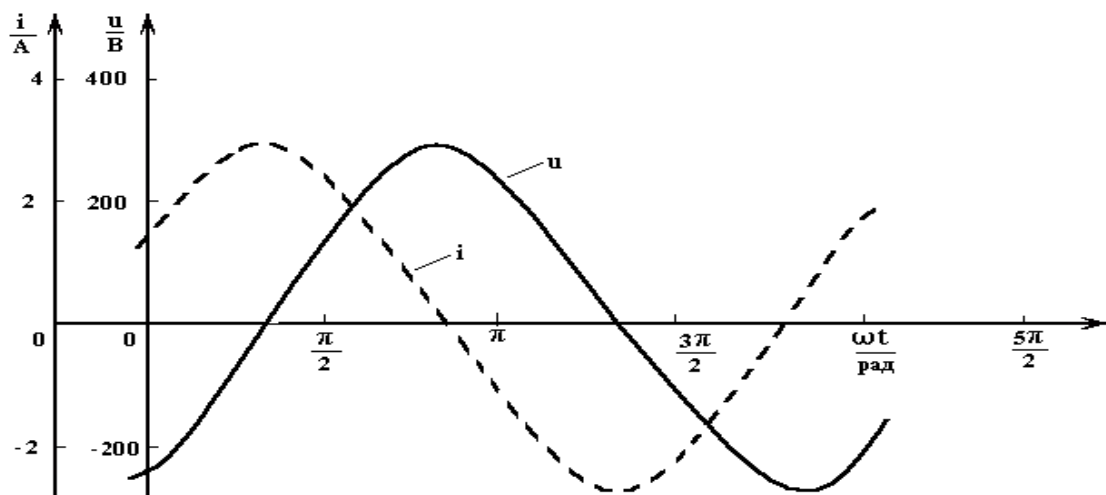


Рисунок 2.8

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)

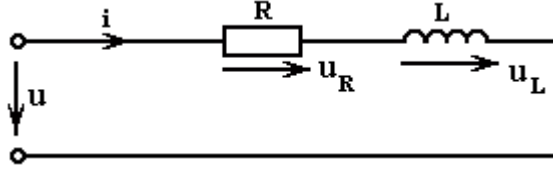


Рисунок 2.9

2. Определим комплексную амплитуду тока в цепи

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

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

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

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

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

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

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

6. Мгновенные напряжения на элементах цепи

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

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

7. Мгновенное напряжение, приложенное к цепи

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

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

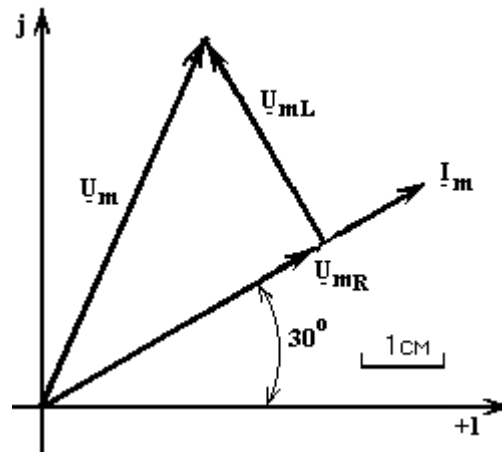


Рисунок 2.10

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)

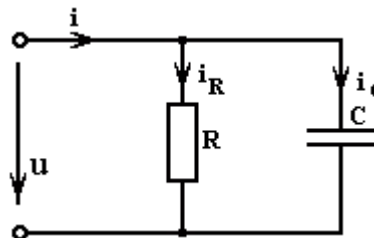


Рисунок 2.11

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

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

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

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

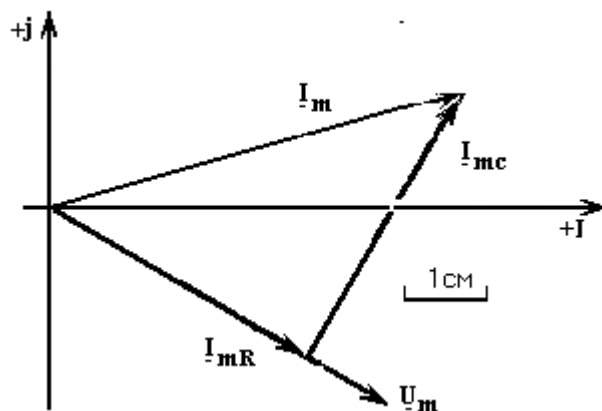


Рисунок 2.12

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

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

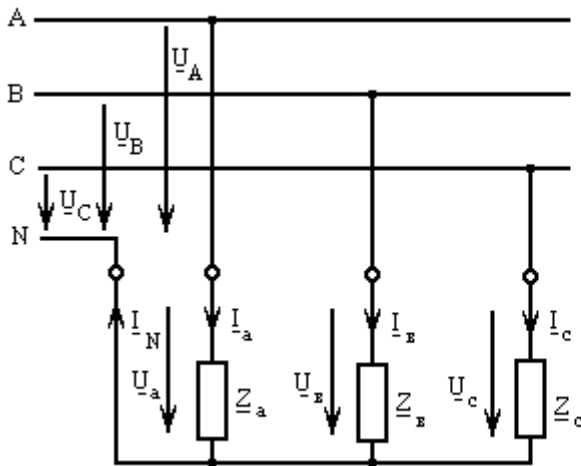


Рисунок 3.1 - Соединение фаз приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»

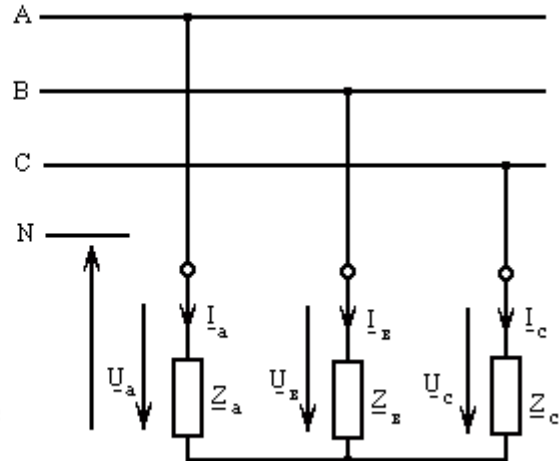


Рисунок 3.2 - Соединение фаз приемника по схеме «звезда с нейтральным проводом»

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

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

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

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

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

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

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

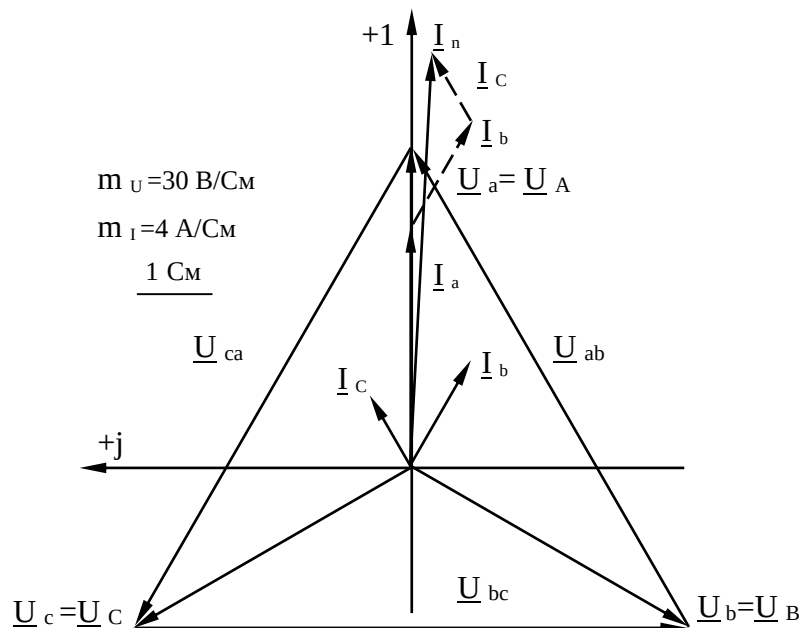


Рисунок 3.3

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

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

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

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

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)

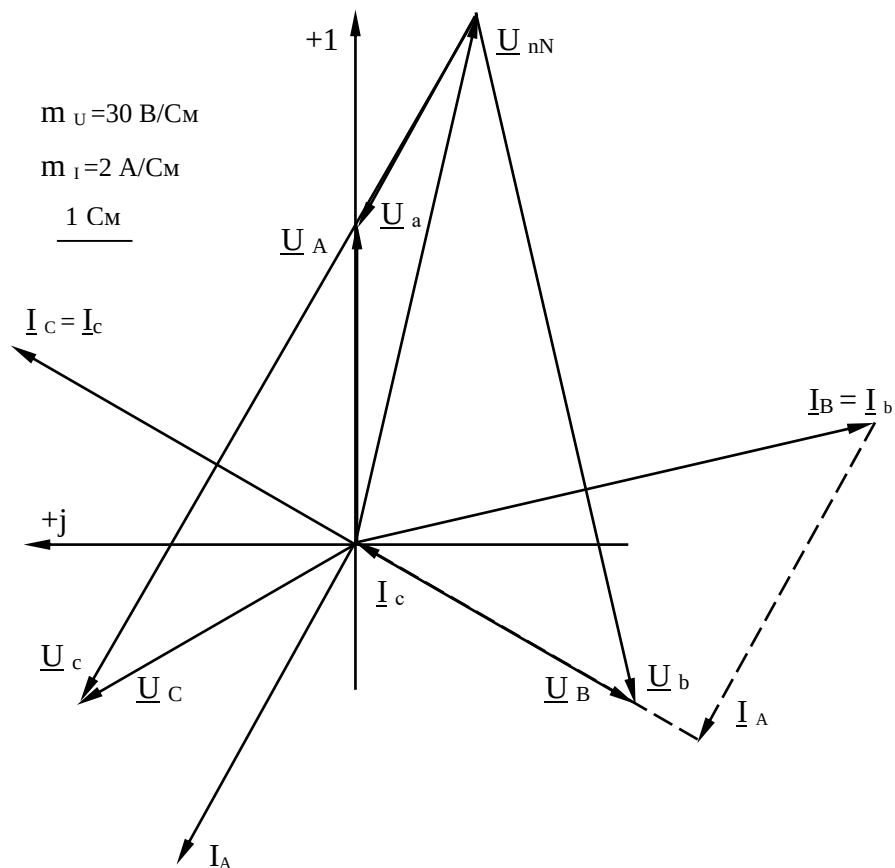


Рисунок 3.4

8. Рассчитаем мощность, потребляемую трехфазным приемником

$$\underline{S} = \underline{U}_a \underline{I}_a^* + \underline{U}_b \underline{I}_b^* + \underline{U}_c \underline{I}_c^* = 95.691e^{j151^0} \cdot 9.569e^{-j151^0} + 281.98e^{-j167^0} \cdot 14.1e^{j76.8^0} + 315.67e^{-j150^0} \cdot 10.522e^{-j60^0} = 915.676 - j654.054 \text{ ВА}$$

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

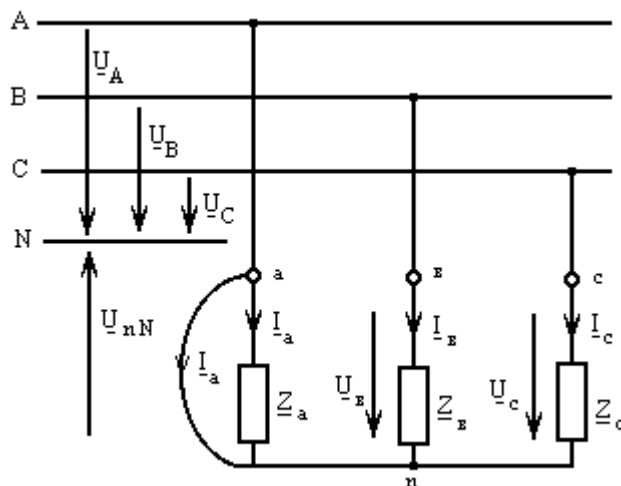


Рисунок 3.5 - Соединение фаз приемника по схеме «звезда без нейтрального провода» и коротком замыкании фазы «а» приемника

1. Определяем комплексные напряжения на фазах симметричной

трехфазной цепи $\underline{U}_A = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j^0} \quad \underline{U}_B = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{-j120^0} \quad \underline{U}_C = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} e^{j120^0}$

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

$$\underline{U}_{nN} = \underline{U}_A = 127e^{j^0} = 127 \text{ В.}$$

3. Определяем комплексные напряжения на фазах приемника

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

$$\underline{U}_b = \underline{U}_B - \underline{U}_{nN} = -63.509 - j110 - 127 = -190.526 - j110 = 220e^{-j150^0} \text{ В}$$

$$\underline{U}_c = \underline{U}_C - \underline{U}_{nN} = -63.509 + j110 - 127 = -190.526 + j110 = 220e^{j150^0} \text{ В}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

7. Векторная диаграмма токов и напряжений представлена на рисунке 3.6

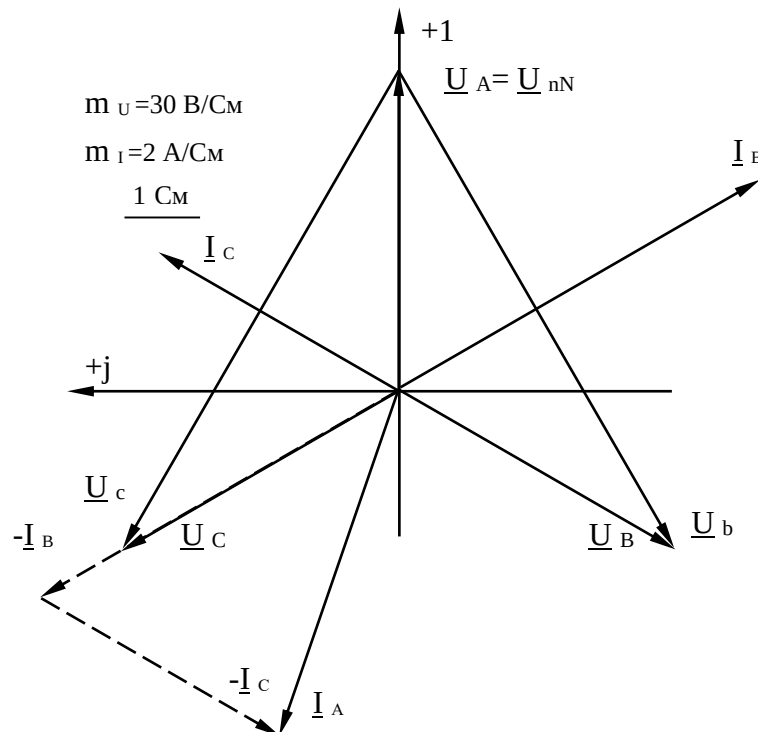


Рисунок 3.6

8. Рассчитываем мощность, потребляемую трехфазным приемником:

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

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

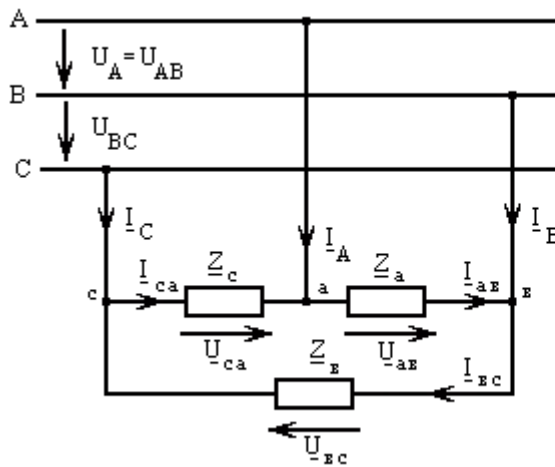


Рисунок 3.7 - Соединение фаз приемника по схеме «треугольник»

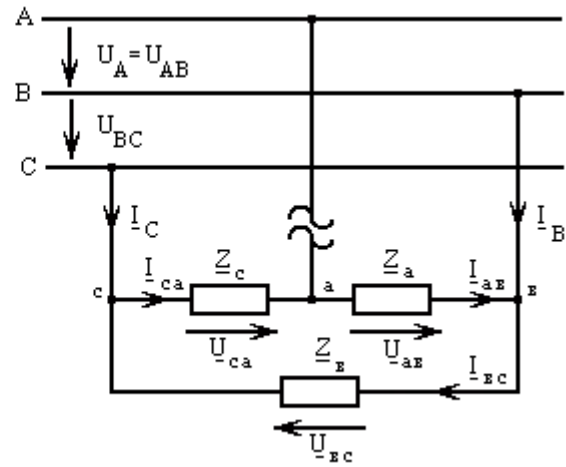


Рисунок 3.8 - Соединение фаз приемника по схеме «треугольник» и обрыве линейного провода «А»

1. Определяем комплексные линейные напряжения симметричной трехфазной цепи

$$\underline{U}_{AB} = U_{\text{л}} e^{j0} = 220 e^{j0} = 220 \text{ В},$$

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

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

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

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

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

$$\underline{I}_{ab} = \frac{\underline{U}_{ab}}{\underline{Z}_a} = \frac{220 e^{j0}}{10} = 22 e^{j0} \text{ А} = 22 \text{ А}$$

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

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

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

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

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

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

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

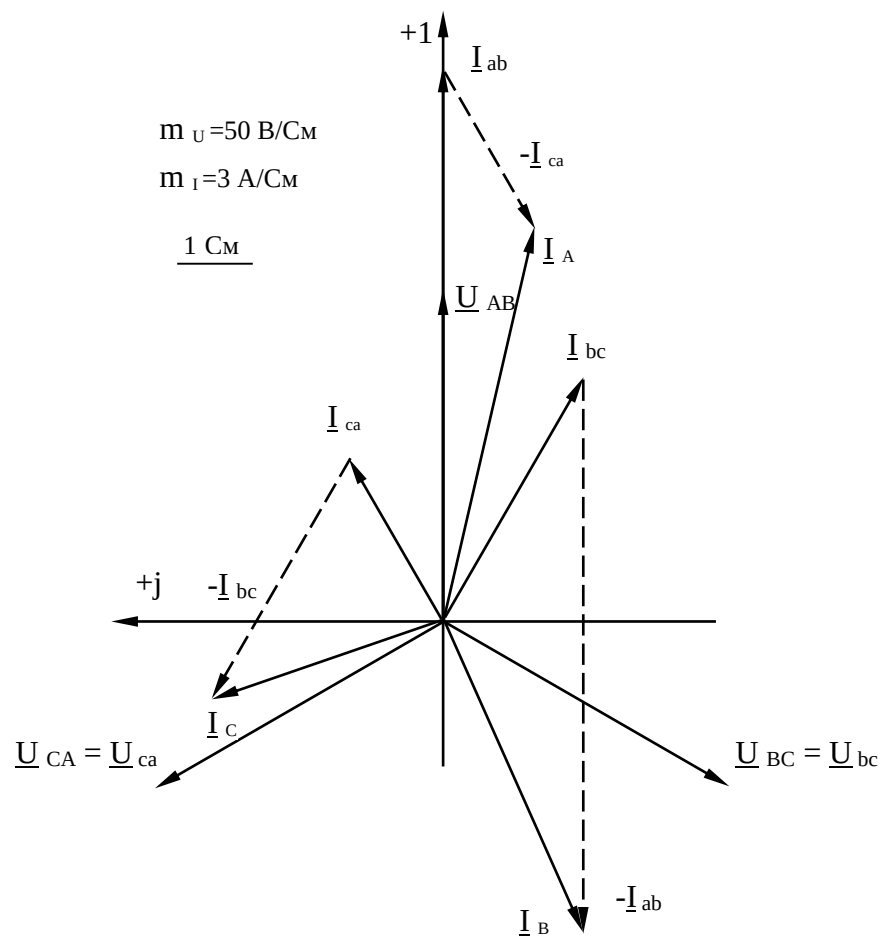


Рисунок 3.9

6. Рассчитываем комплексную мощность, потребляемую трехфазным приемником

$$\underline{S} = \underline{U}_{ab}^* \underline{I}_{ab} + \underline{U}_{bc}^* \underline{I}_{bc} + \underline{U}_{ca}^* \underline{I}_{ca} = 220 \cdot 22 + 220e^{-j120^\circ} \cdot 11e^{j30^\circ} + 220e^{j120^\circ} \cdot 7.33e^{-j30^\circ} = 4840 - j806.667 \text{ ВА.}$$

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 $\underline{U}_b$ 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)

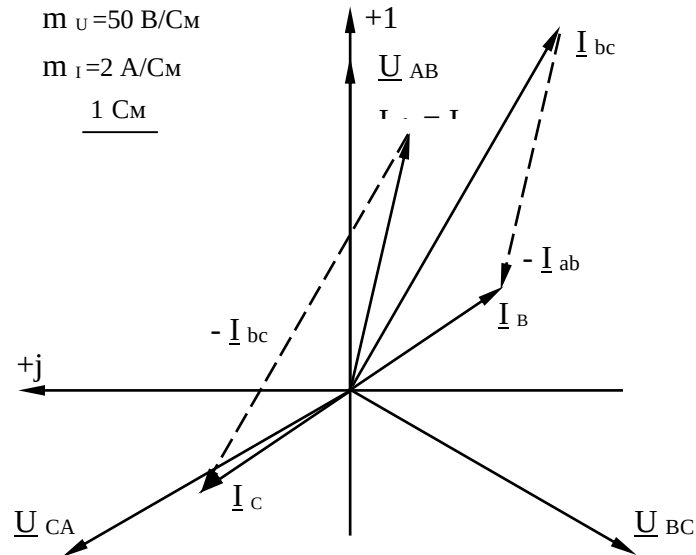


Рисунок 3.10

7. Расчет переходных токов и напряжений 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., Воробийченко 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.

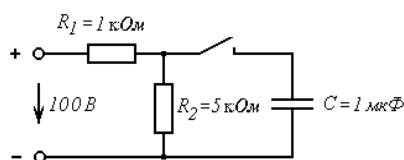


Рисунок 4.1

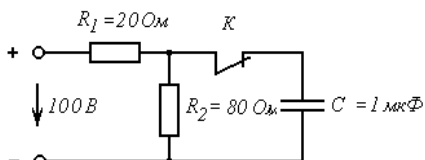


Рисунок 4.2

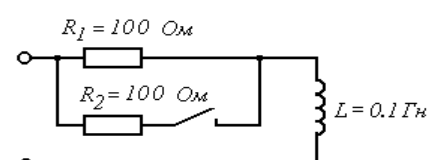


Рисунок 4.3

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 $i(t)$

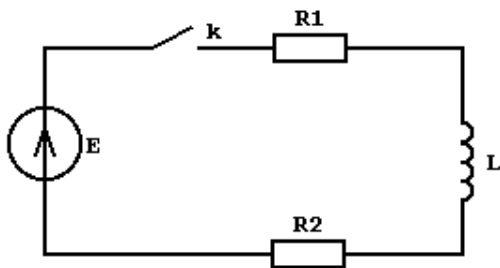


Рисунок 4.4

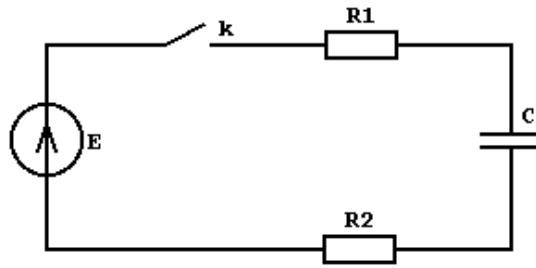


Рисунок 4.5

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	-

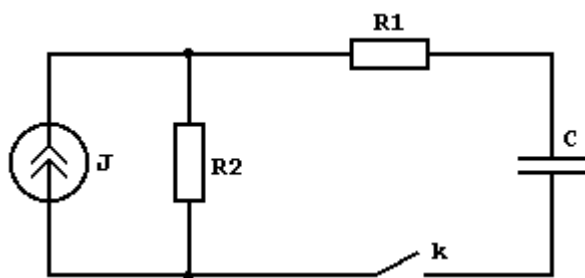


Рисунок 4.6

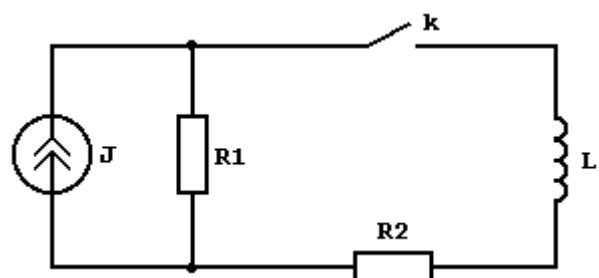


Рисунок 4.7

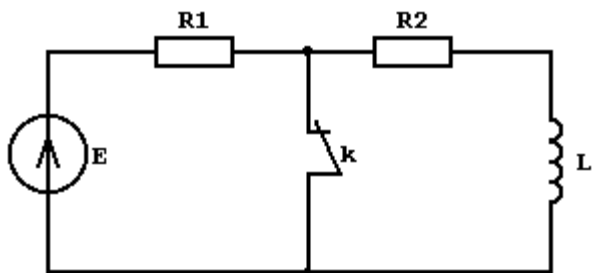


Рисунок 4.8

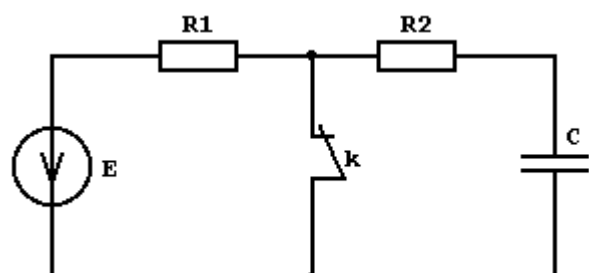


Рисунок 4.9

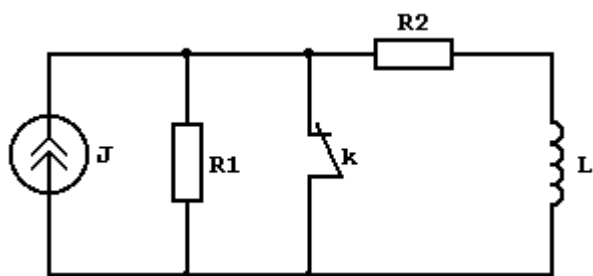


Рисунок 4.10

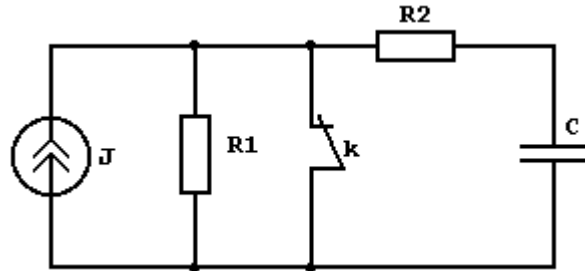


Рисунок 4.11

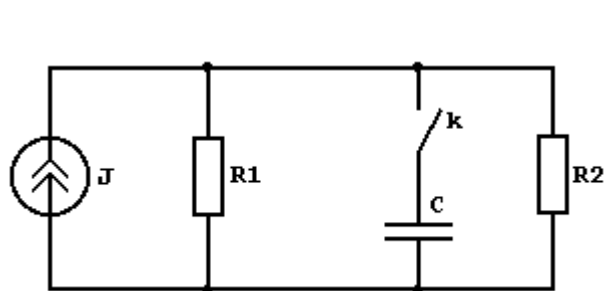


Рисунок 4.12

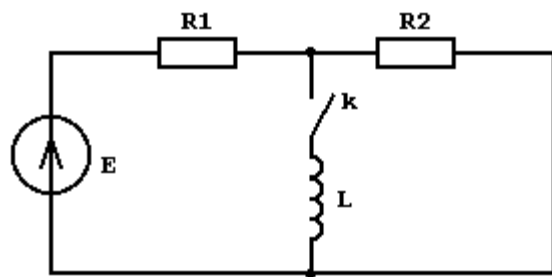


Рисунок 4.13

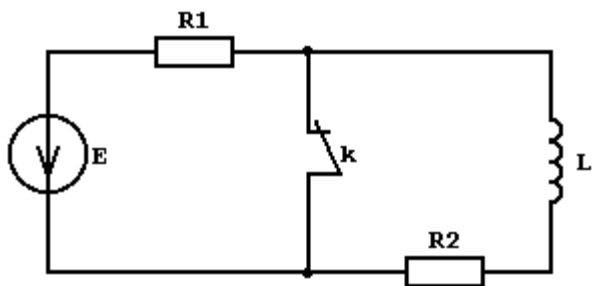


Рисунок 4.14

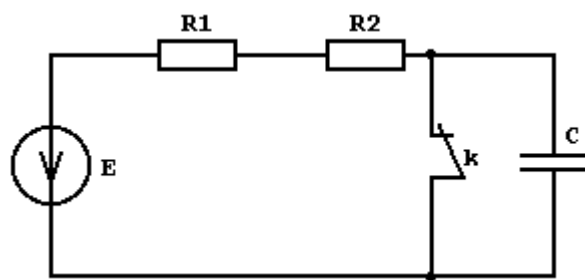


Рисунок 4.15

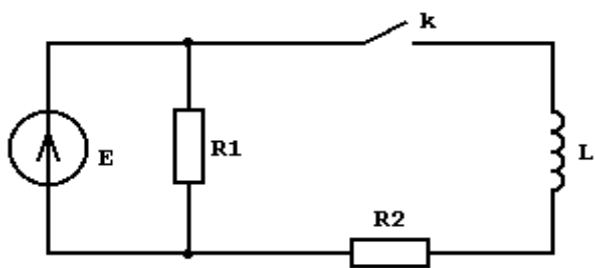


Рисунок 4.16

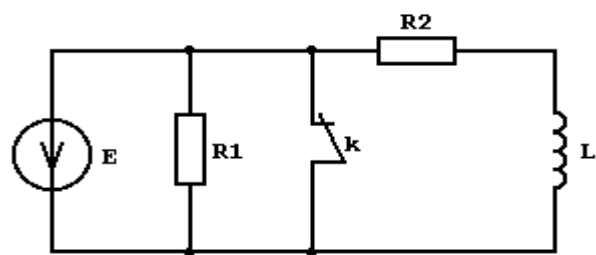


Рисунок 4.17

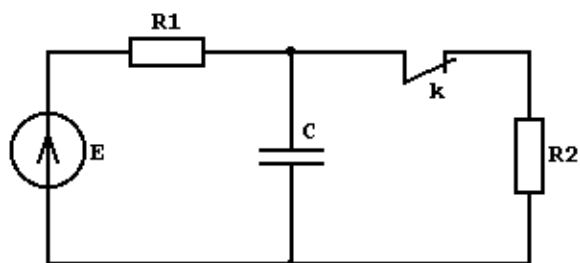


Рисунок 4.18

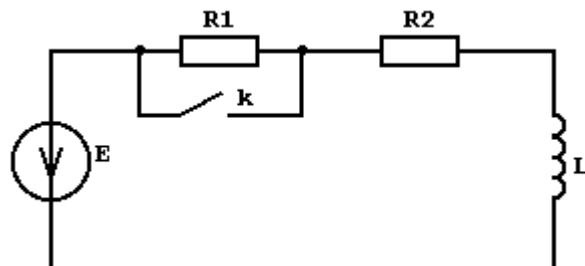


Рисунок 4.19

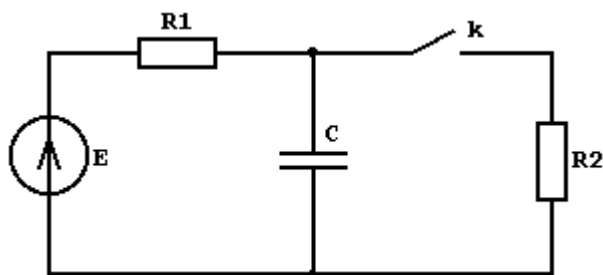


Рисунок 4.20

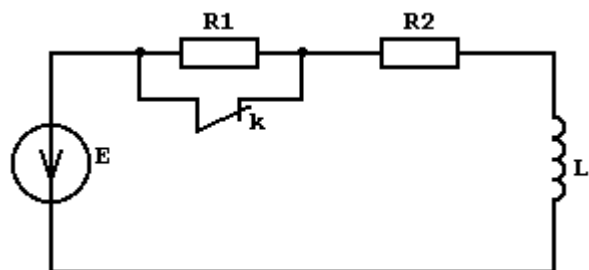


Рисунок 4.21

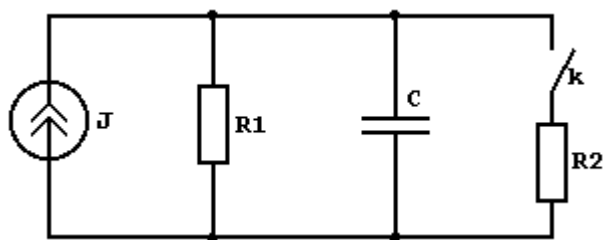


Рисунок 4.22

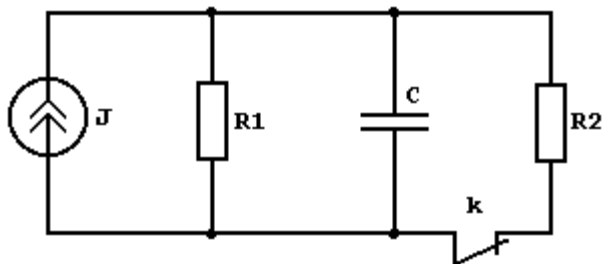


Рисунок 4.23

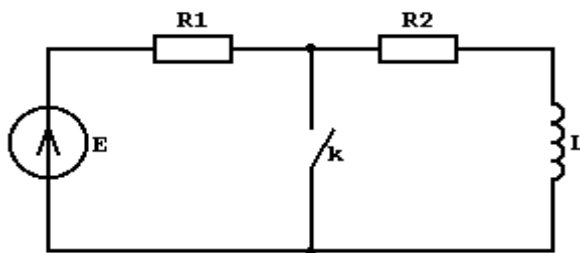


Рисунок 4.24

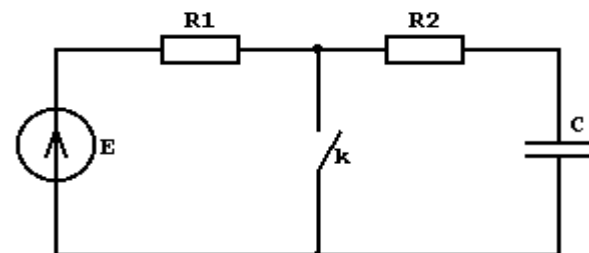


Рисунок 4.25

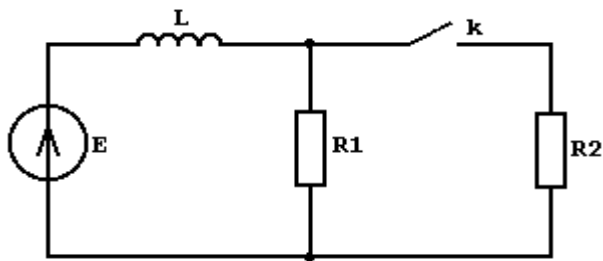


Рисунок 4.26

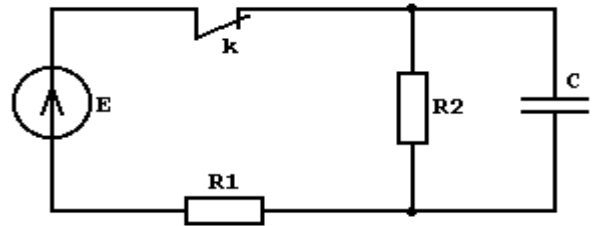


Рисунок 4.27

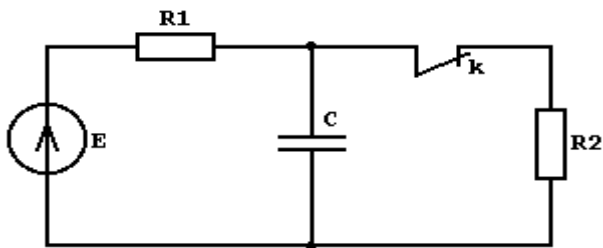


Рисунок 4.28

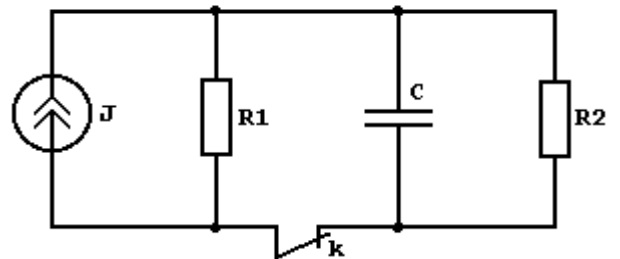


Рисунок 4.29

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	-

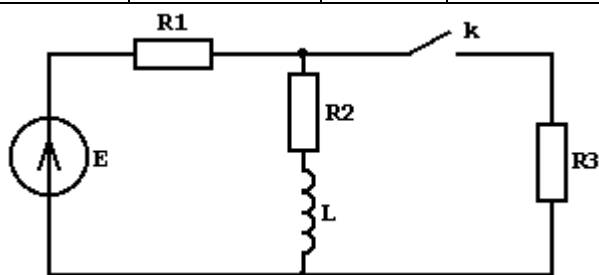


Рисунок 4.32

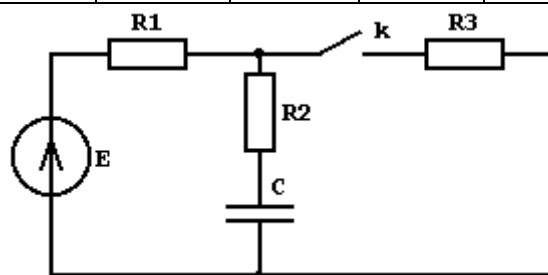


Рисунок 4.33

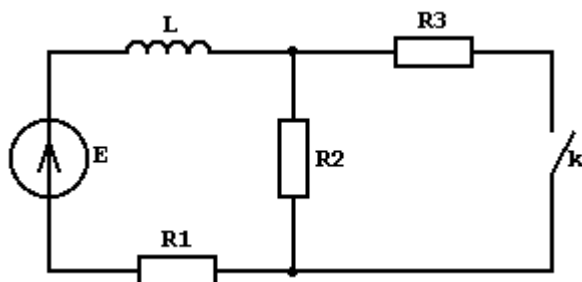


Рисунок 4.34

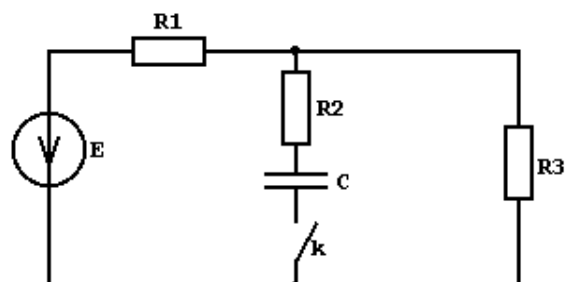


Рисунок 4.35

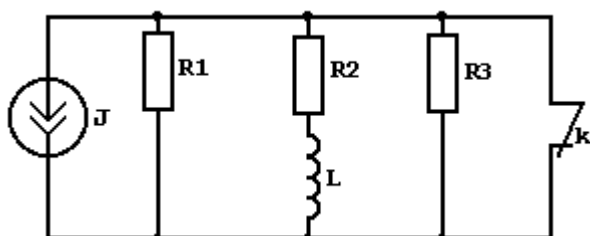


Рисунок 4.36

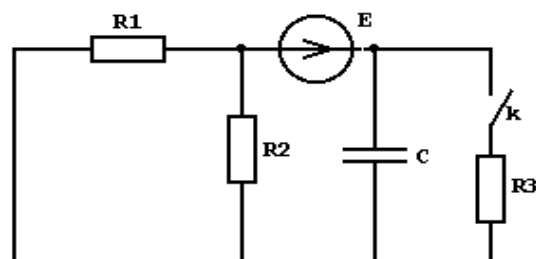


Рисунок 4.37

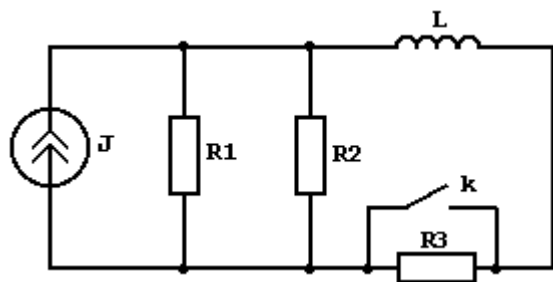


Рисунок 4.38

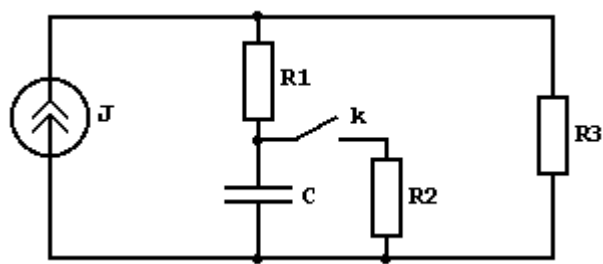


Рисунок 4.39

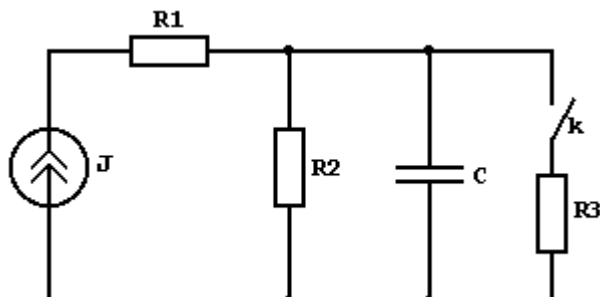


Рисунок 4.40

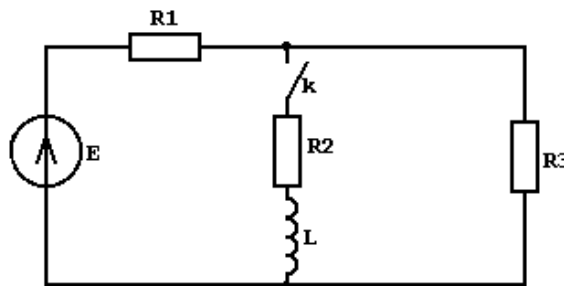


Рисунок 4.41

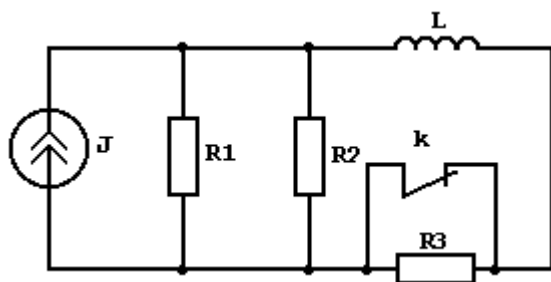


Рисунок 4.42

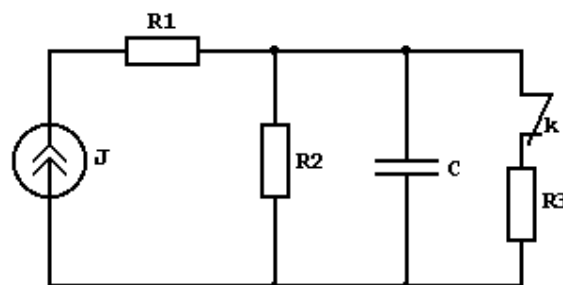


Рисунок 4.43

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)

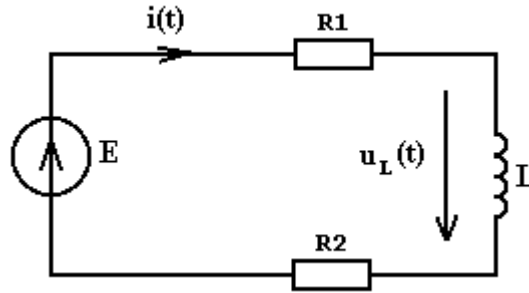


Рисунок 4.46

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

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

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

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

$t \cdot 10^{-5}, \text{с}$	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 $u(t)$

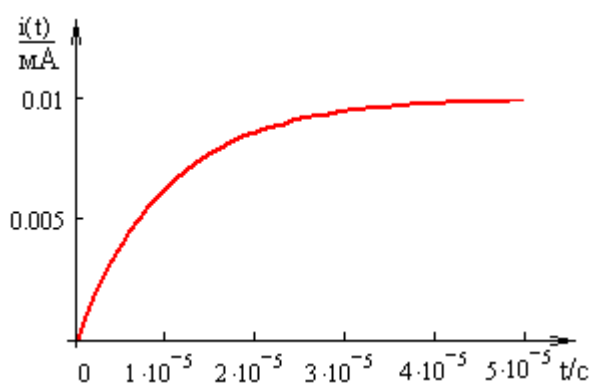


Рисунок 4.47

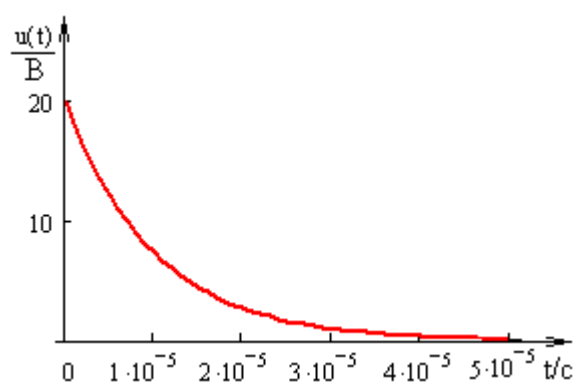


Рисунок 4.48

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

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 $R_1 = 0.2 \text{ кОм}$, $R_2 = 0.2 \text{ кОм}$, $C = 20 \text{ пФ}$, $E = 20 \text{ В}$ (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 $R_1 i + u_c = E$,
 $R_1 C \frac{du_c}{dt} + u_c = E$ (2)

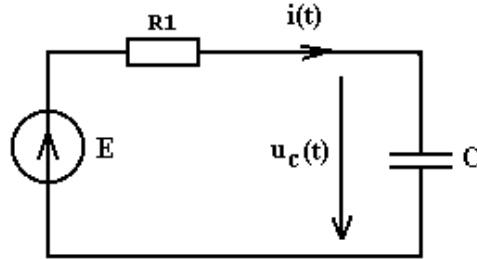


Рисунок 4.49

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. $u_c^{уст} = E = 20$ 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 $\tau = R_1 C = 4 \cdot 10^{-10}$ 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 $u(t)$ 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 $i(t)$

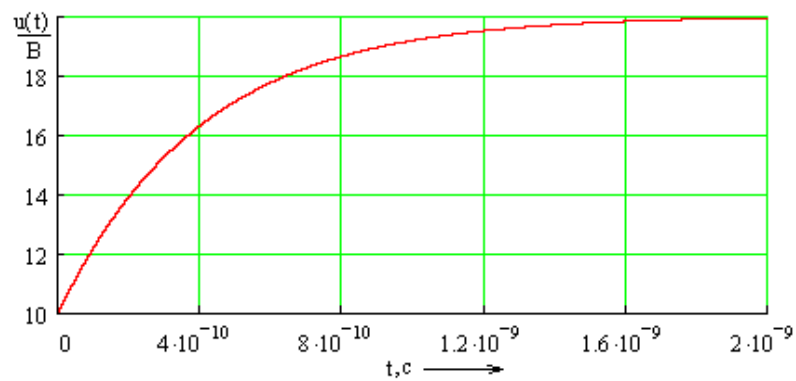


Рисунок 4.50

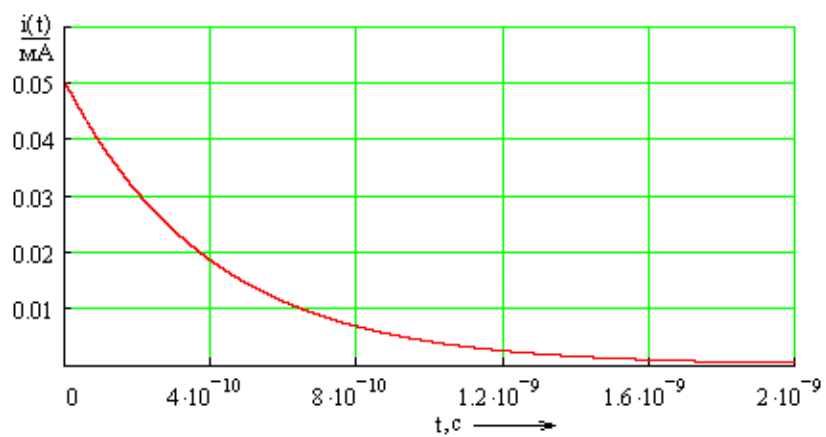


Рисунок 4.51

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):

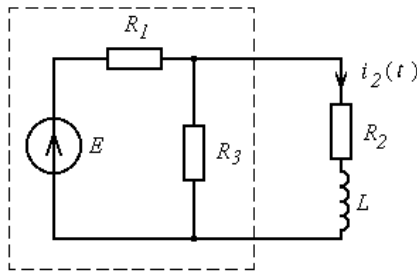


Рисунок 4.52

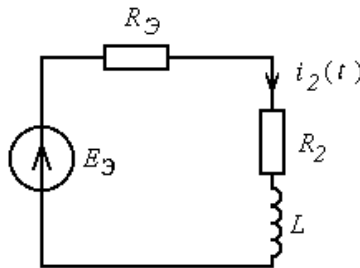


Рисунок 4.53

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

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

3. Для полученной схемы (рисунок 4.53) запишем дифференциальное уравнение $L \frac{di_2}{dt} + (R_3 + R_2)i_2 = E_3$ (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 $\frac{di_2}{dt} = 0$

$$i_{2\text{уст}}(t) = \frac{E_3}{R_3 + R_2} = \frac{10}{10^3 + 2 \cdot 10^3} = 3,3 \cdot 10^{-3}\text{ А}$$

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

где s - корень характеристического уравнения $sL + (R_3 + R_2) = 0$

$$s = -\frac{R_3 + R_2}{L} = -\frac{3 \cdot 10^3}{30 \cdot 10^{-3}} = -10^5\text{ с}^{-1},$$

постоянную A определим с учетом начальных условий

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

$$A = \frac{E}{R_1 + R_2} - \frac{E_3}{R_3 + R_2} = 5 \cdot 10^{-3} - 3.3 \cdot 10^{-3} = 1.7 \cdot 10^{-3} \text{ А}.$$

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

$$u(t) = R_2 \cdot i_2(t) + L \frac{di_2(t)}{dt} = 2 \cdot 10^3 \left(3.3 \cdot 10^{-3} + 1.7 \cdot 10^{-3} e^{-10^5 t} \right) + 30 \cdot 10^{-3} \left(-1.7 \cdot 10^2 e^{-10^5 t} \right) =$$

$$= 6.6 + 3.4 \cdot e^{-10^5 t} - 5.1 \cdot e^{-10^5 t} = 6.6 - 1.7 \cdot e^{-10^5 t} \text{ В}.$$

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

$t \times 10^{-5}, \text{ с}$	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
$i_1(t), \text{ мА}$	7.5	7.17	6.97	6.85	6.779	6.74	6.71	6.69	6.68	6.676	6.672
$i_2(t), \text{ мА}$	5	4.34	3.95	3.71	3.559	3.47	3.42	3.38	3.36	3.352	3.345
$i_3(t), \text{ мА}$	2.5	2.83	3.02	3.15	3.220	3.27	3.29	3.31	3.32	3.324	3.328

$u(t), \text{ В}$	5	5.66	6.05	6.29	6.44	6.53	6.58	6.62	6.64	6.648	6.655
-------------------	---	------	------	------	------	------	------	------	------	-------	-------

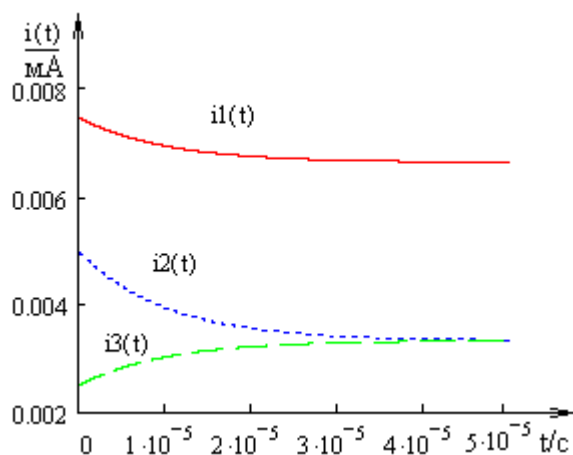


Рисунок 4.54

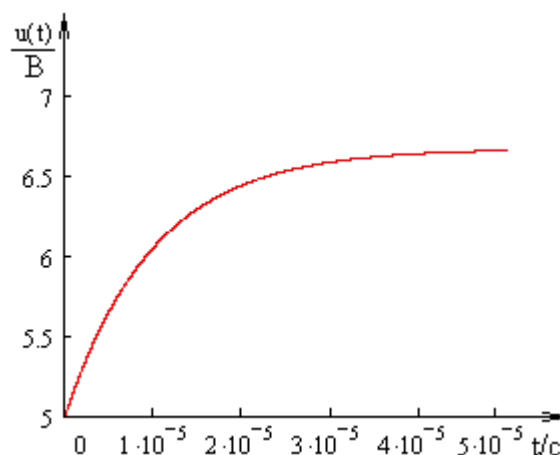


Рисунок 4.55

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)

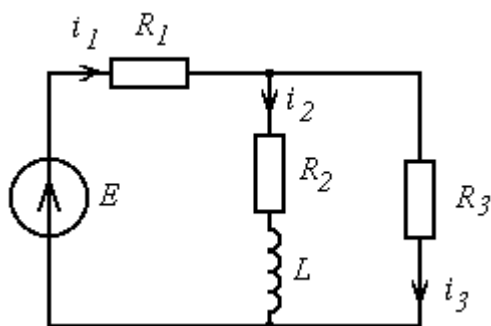


Рисунок 4.56

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\text{следовательно} \quad i_{2\text{св}}(t) = 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-10^5 t} \text{ А}.$$

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

8. Ток $i_1(t) = \frac{E + i_2 R_3}{R_1 + R_3} = \frac{20 + 6,6 + 3,4 \cdot e^{-10^5 t}}{4 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \cdot 10^{-3} + 0,85 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-10^5 t} \text{ А}.$

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

10. Напряжение $u(t) = i_3(t) \cdot R_3 = 6,6 - 1,7 \cdot e^{-10^5 t} \text{ В}.$

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

8. Расчет переходных токов и напряжений 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:

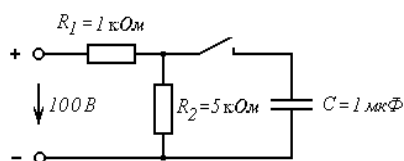


Рисунок 4.57

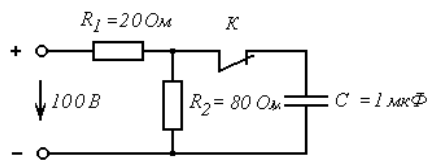


Рисунок 4.58

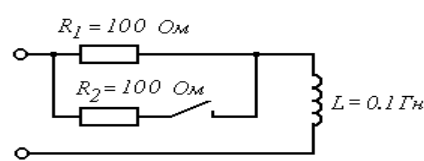


Рисунок 4.59

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

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 $i_L(0) = 0$

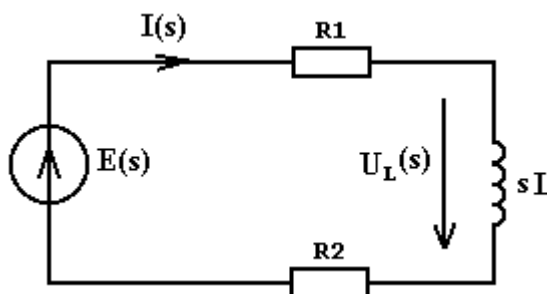


Рисунок 4.60

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)

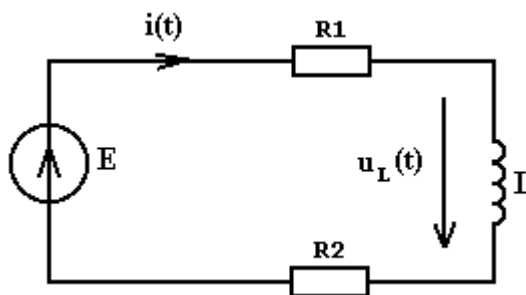


Рисунок 4.61

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

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 $u(t)$

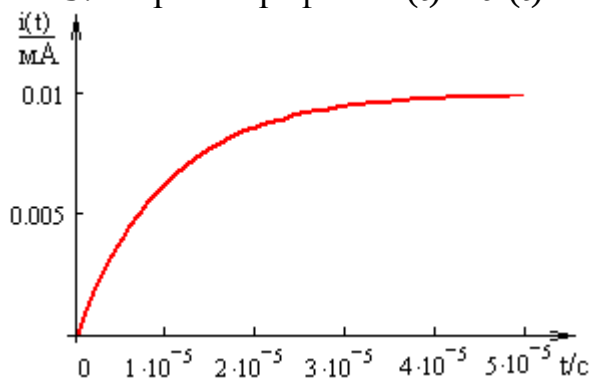


Рисунок 4.62

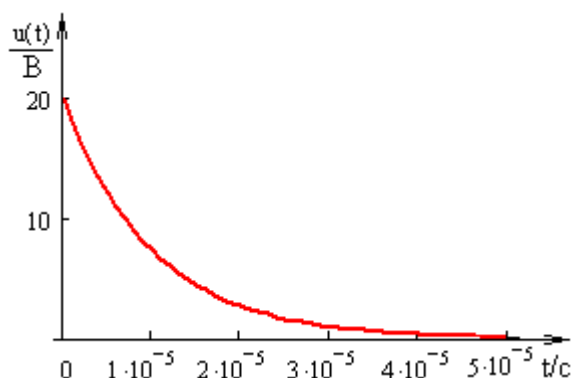


Рисунок 4.63

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

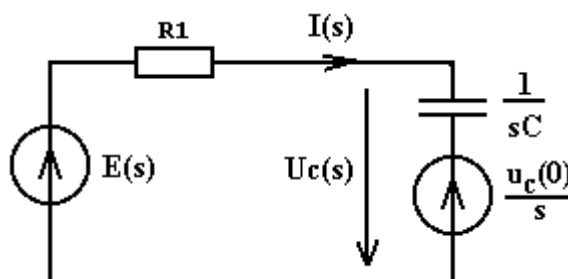


Рисунок 4.64

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)

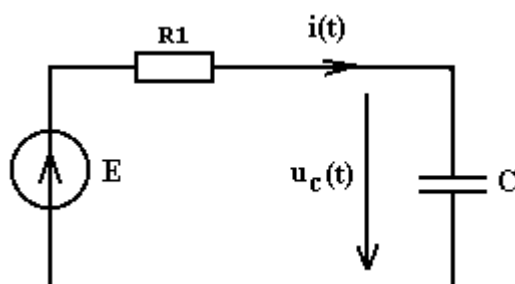


Рисунок 4.65

$$u_c(t) = u(t) = E - R_1 i(t) = 20 - 200 \cdot 0.05 \left(e^{-25 \cdot 10^8 t} \right) = 20 - 10 e^{-25 \cdot 10^8 t} \text{ В.}$$

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	0.007
$i(t), \text{ мА}$	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 $i(t)$

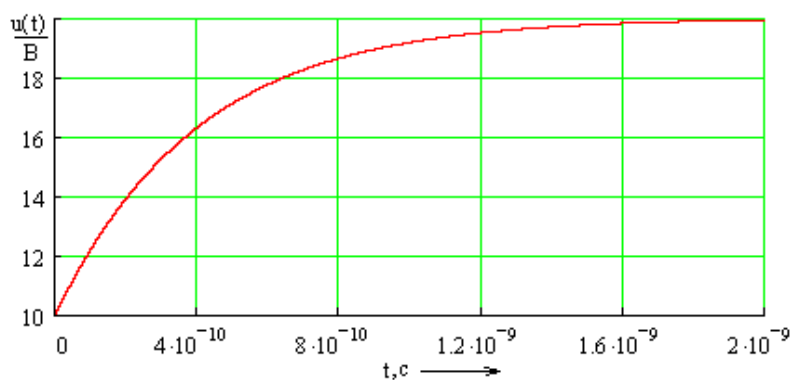


Рисунок 4.66

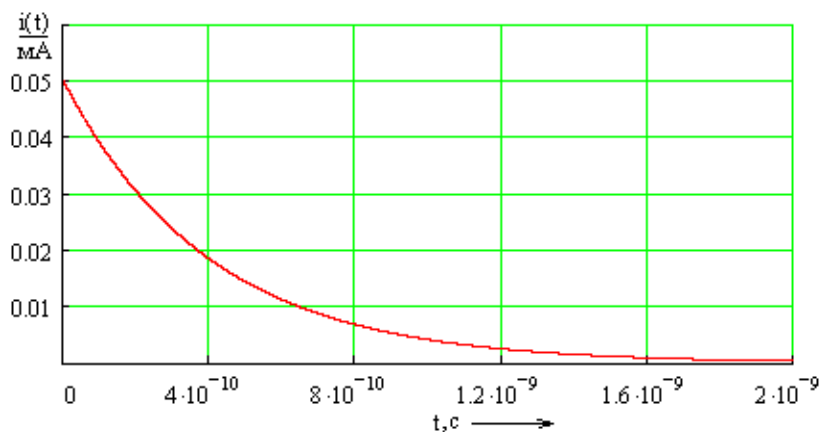


Рисунок 4.67

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

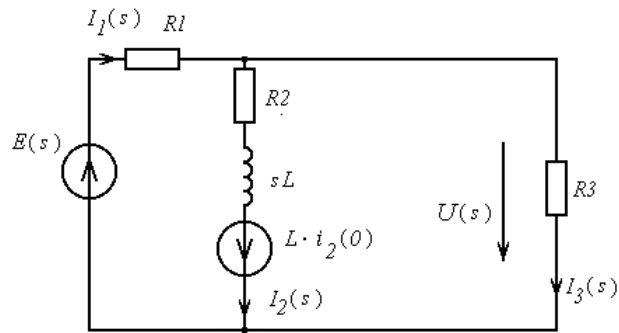


Рисунок 4.68

3. По методу двух узлов определим операторное напряжение

$$U(s) = \frac{E(s)Y_1(s) - L i_2(0)Y_2(s)}{Y_1(s) + Y_2(s) + Y_3(s)} = \frac{\frac{20}{s} \cdot 0.0005 - 30 \cdot 10^{-3} \cdot 0.005 \cdot \frac{1}{2000 + s30 \cdot 10^{-3}}}{0.0005 + \frac{1}{2000 + s30 \cdot 10^{-3}} + 0.0005} = \frac{s \cdot 15 \cdot 10^{-5} + 20}{3 \cdot 10^{-5} s(s + 10^5)}$$

.

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

$$i_3(t) = \frac{u(t)}{R_3} = 3.33 \cdot 10^{-3} - 0.85 \cdot 10^{-3} e^{-10^5 t} \text{ A.}$$

$$i_1(t) = \frac{E - u(t)}{R_1} = 6.6 \cdot 10^{-3} + 0.85 \cdot 10^{-3} e^{-10^5 t} \text{ A.}$$

$$i_2(t) = i_1(t) - i_3(t) = 3.3 \cdot 10^{-3} + 1.7 \cdot 10^{-3} e^{-10^5 t} \text{ A.}$$

7. Строим графики переходных токов и напряжения

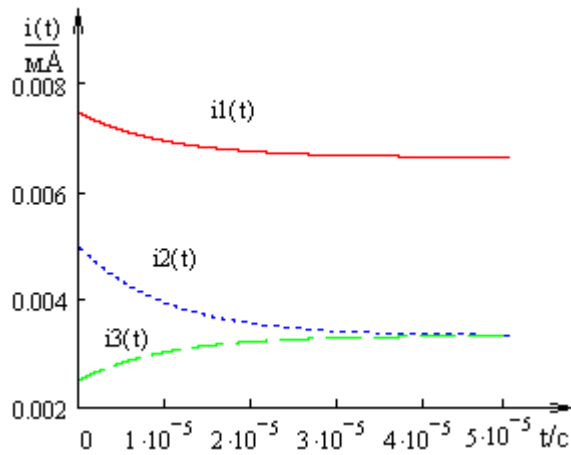


Рисунок 4.69

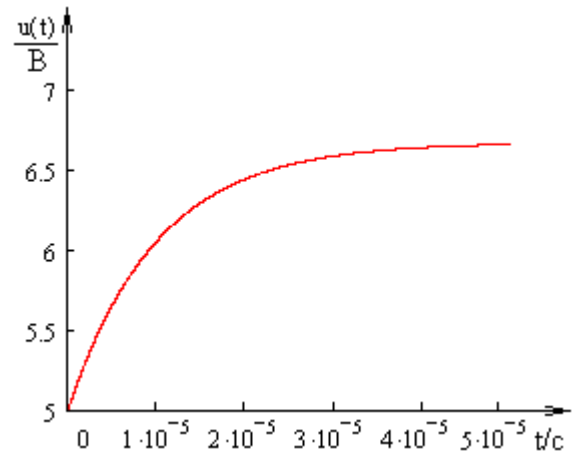


Рисунок 4.70

9. Расчет нелинейных цепей постоянного тока

Учебные вопросы:

1. Расчет нелинейных электрических цепей графическим методом.
2. Расчет нелинейных электрических цепей графоаналитическим методом.

задание курсантам для подготовки к занятию

1. Изучить:

1. Запасный А. И. Основы теории цепей. - Ставрополь: СФРВИРВ, 2001, с.39-44.
2. Бакалов В.П., Воробийченко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 212-227.
3. Атабеков Г.И., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники: Нелинейные цепи. - М.: Энергия, 1970, часть 2. - с.7-24.

2. Ответить на вопросы:

13. Какую электрическую цепь называют нелинейной?
14. Что такое нелинейный элемент? Приведите примеры.
15. Что такое вольтамперная характеристика нелинейного элемента? Приведите примеры вольтамперных характеристик.
16. Что такое статическое сопротивление нелинейного элемента?
17. Каким образом определяется статическое сопротивление нелинейного элемента?
18. Что такое дифференциальное сопротивление нелинейного элемента?
19. Каким образом определяется дифференциальное сопротивление нелинейного элемента?
20. Что такое крутизна вольтамперной характеристики нелинейного элемента?
21. Каким образом определяется крутизна вольтамперной характеристики нелинейного элемента?
22. Каким образом определяется эквивалентная вольтамперная характеристика цепи при последовательном соединении нелинейных элементов?
23. Каким образом определяется эквивалентная вольтамперная характеристика цепи при параллельном соединении нелинейных элементов?
24. Можно ли применять метод наложения для расчета нелинейных цепей?
25. Каким образом осуществляется кусочно-линейная аппроксимация вольтамперной характеристики нелинейного элемента?

26. Каким образом определяется линейная схема замещения цепи при кусочно-линейной аппроксимации вольтамперной характеристики нелинейного элемента?

3. Проанализировать решение задач:

№1.1, №1.2 (Атабеков Г.И., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники: Нелинейные цепи. - М.: Энергия, 1970, часть 2. - с.18-19.)

В ходе практического занятия выполнить задания:

задание №1. Рассчитать графическим методом ток и напряжения на элементах нелинейной цепи для заданной согласно варианту электрической цепи (таблица 1.7).

задание №2. Рассчитать графическим методом токи в ветвях для заданной согласно варианту нелинейной электрической цепи (таблица 1.8).

задание №3. Рассчитать графическим методом токи в ветвях и напряжения на элементах нелинейной электрической цепи, заданной согласно варианту (таблица 1.9).

задание №4. Рассчитать графоаналитическим методом ток и напряжения на элементах нелинейной цепи для заданной согласно варианту электрической цепи (таблица 1.7)

таблица 1.7

Вариант №	схема рис. №	ВАХ рис. №	E, В	R, Ом	U _{эк} , В	I _б , мА
0	1.81	1.87	1	500	5	-
1	1.82	1.88	20	500	-	2
2	1.81	1.87	0.8	400	0	-
3	1.82	1.88	30	300	-	3
4	1.81	1.87	0.9	560	0	-
5	1.82	1.88	25	250	-	2
6	1.81	1.87	1.1	500	5	-
7	1.82	1.88	3.3	350	-	4
8	1.81	1.87	0.8	570	0	-
9	1.82	1.88	20	400	0	1
10	1.81	1.89	0.6	750	5	-
11	1.82	1.90	15	370	-	0.125
12	1.81	1.89	0.5	830	0	-
13	1.82	1.90	25	830	-	0.15
14	1.81	1.89	0.4	500	0	-
15	1.82	1.89	30	750	-	0.2
16	1.81	1.89	0.6	600	5	-
17	1.82	1.90	25	710	-	0.15
18	1.81	1.89	0.4	400	0	-
19	1.82	1.92	25	625	-	0.15
20	1.81	1.91	0.6	1500	10	-
21	1.82	1.92	25	625	-	0.2
22	1.81	1.91	0.4	100	0	-
23	1.82	1.92	20	400	-	0.15
24	1.81	1.91	0.5	830	0	-
25	1.82	1.92	20	400	-	0.2
26	1.81	1.91	0.4	667	10	-
27	1.82	1.92	15	375	-	0.15
28	1.81	1.93	0.4	2000	0	-
29	1.82	1.94	20	200	-	0.2
30	1.81	1.93	0.3	1200	0	-

31	1.82	1.94	15	188	-	0.1
32	1.81	1.95	0.3	375	0	-
33	1.82	1.96	15	100	-	1
34	1.81	1.95	0.4	500	5	-
35	1.82	1.96	20	154	-	1
36	1.81	1.95	0.3	500	0	-
37	1.82	1.96	4	25	-	0.6
38	1.81	1.97	0.8	1000	0	-
39	1.82	1.98	4	33	-	0.4
40	1.81	1.97	0.65	1100	5	-
41	1.82	1.88	20	500	-	3
42	1.81	1.87	0.8	420	0	-
43	1.82	1.88	30	300	-	4
44	1.81	1.87	0.9	580	0	-
45	1.82	1.88	25	250	-	4
46	1.81	1.87	1.1	550	5	-
47	1.82	1.88	3.3	350	-	3
48	1.81	1.97	0.85	1200	0	-
49	1.82	1.98	4.5	35	-	0.4
50	1.82	1.88	3.3	350	-	3

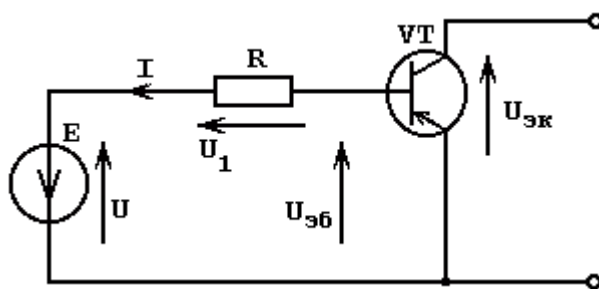


Рисунок 1.81

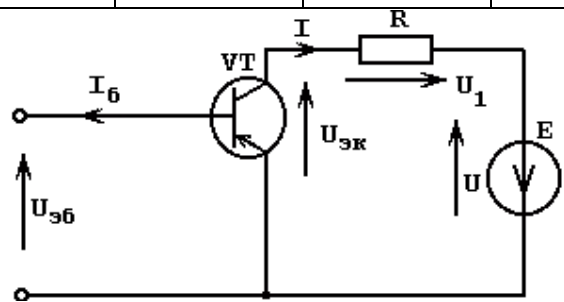


Рисунок 1.82

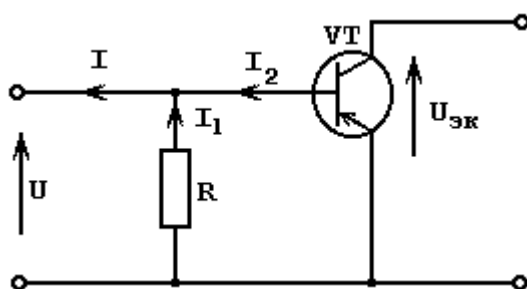


Рисунок 1.83

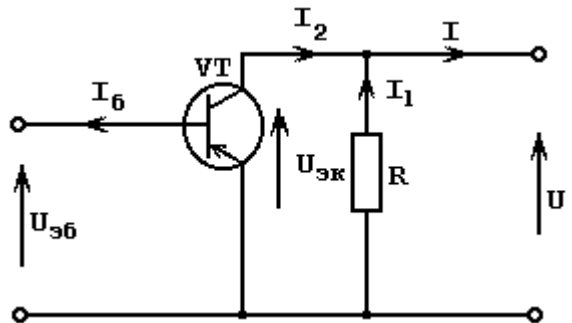


Рисунок 1.84

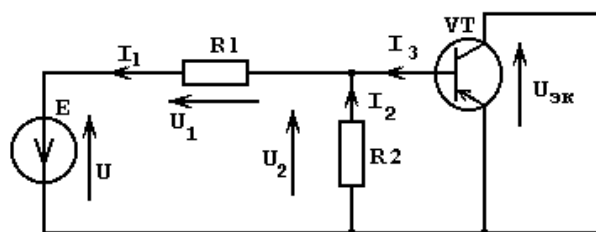


Рисунок 1.85

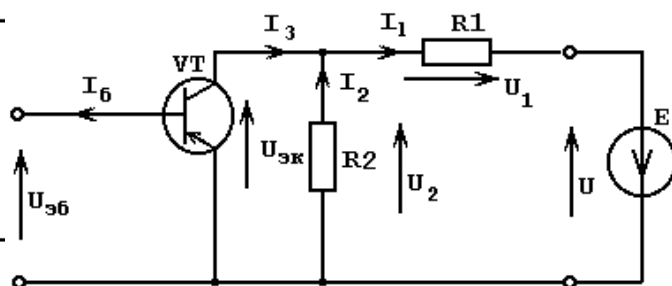


Рисунок 1.86

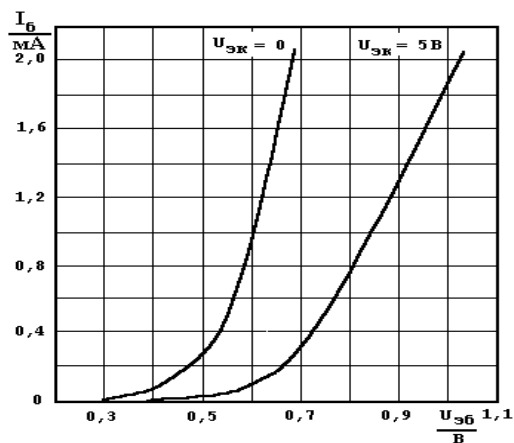


Рисунок 1.87

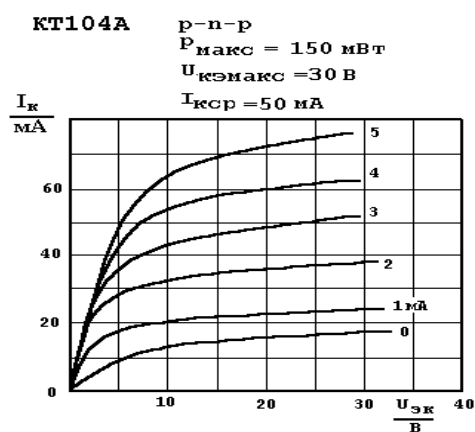


Рисунок 1.88

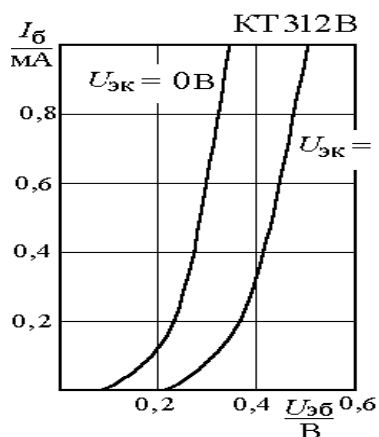


Рисунок 1.89

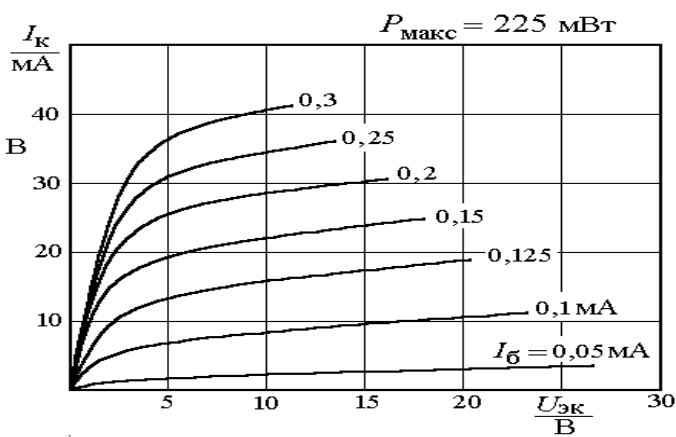


Рисунок 1.90

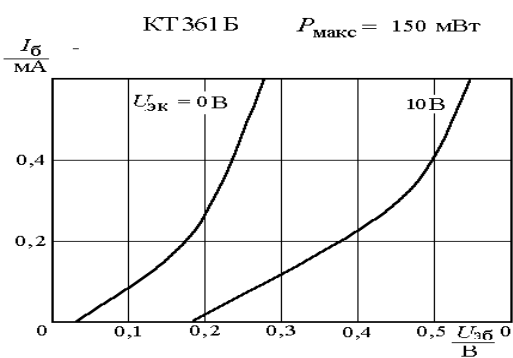


Рисунок 1.91

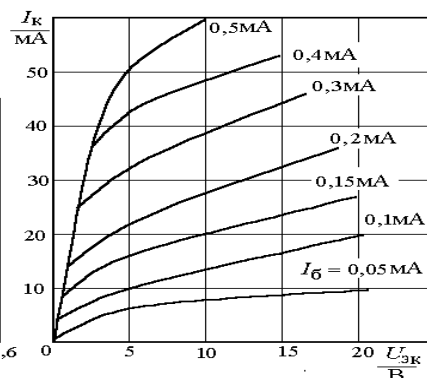


Рисунок 1.92

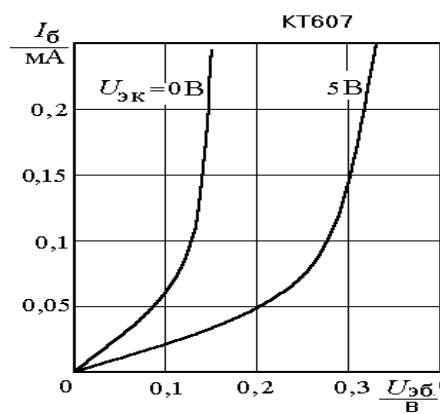


Рисунок 1.93

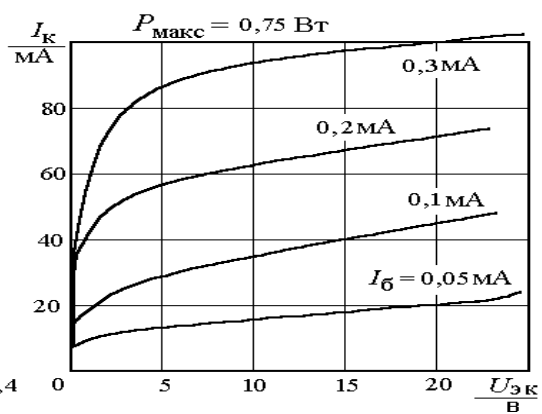


Рисунок 1.94

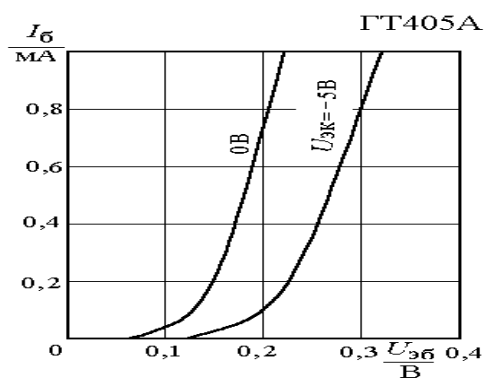


Рисунок 1.95

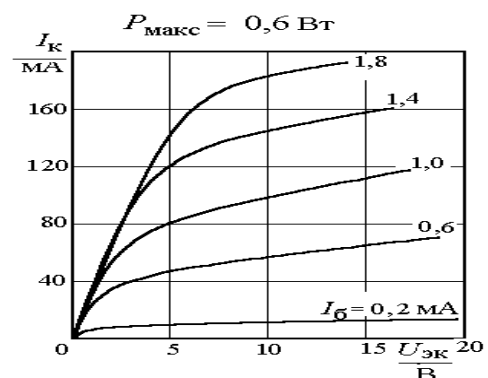


Рисунок 1.96

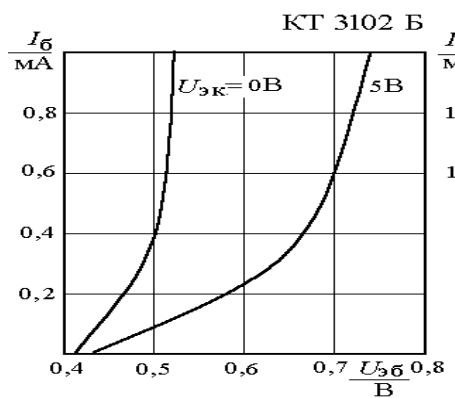


Рисунок 1.97

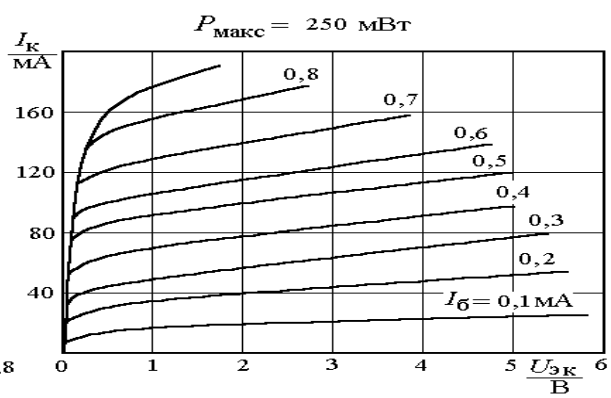


Рисунок 1.98

Таблица 1.8

Вариант №	схема рис. №	ВАН рис. №	I, мА	R, Ом	U _{эк} , В	I _б , мА
0	1.83	1.87	1	1000	5	-
1	1.84	1.88	40	1000	-	2
2	1.83	1.87	0.8	800	0	-
3	1.84	1.88	50	600	-	3
4	1.83	1.87	0.9	1200	0	-
5	1.84	1.88	45	500	-	2
6	1.83	1.87	1.1	1000	5	-
7	1.84	1.88	70	700	-	3
8	1.83	1.87	0.8	1000	0	-
9	1.84	1.88	30	800	0	1
10	1.83	1.89	0.6	1500	5	-
11	1.84	1.90	30	700	-	0.125
12	1.83	1.89	0.5	1600	0	-
13	1.84	1.90	30	1500	-	0.15
14	1.83	1.89	0.4	1000	0	-
15	1.84	1.89	35	1500	-	0.2
16	1.83	1.89	0.6	1200	5	-
17	1.84	1.90	30	1400	-	0.15
18	1.83	1.89	0.4	800	0	-
19	1.84	1.92	35	1200	-	0.15
20	1.83	1.91	0.6	3000	10	-
21	1.84	1.92	40	1000	-	0.2
22	1.83	1.91	0.4	200	0	-
23	1.84	1.92	30	800	-	0.15
24	1.83	1.91	0.5	1500	0	-
25	1.84	1.92	40	800	-	0.2
26	1.83	1.91	0.4	1200	10	-
27	1.84	1.92	35	700	-	0.15
28	1.83	1.93	0.4	3000	0	-
29	1.84	1.94	80	400	-	0.2
30	1.83	1.93	0.3	2400	0	-
31	1.84	1.94	50	400	-	0.1

32	1.83	1.95	0.3	750	0	-
33	1.84	1.96	140	200	-	1
34	1.83	1.95	0.4	1000	5	-
35	1.84	1.96	120	300	-	1
36	1.83	1.95	0.5	1000	0	-
37	1.84	1.96	80	50	-	0.6
38	1.83	1.97	0.8	2000	0	-
39	1.84	1.98	120	60	-	0.4
40	1.83	1.97	0.65	2000	5	-
41	1.84	1.88	46	1000	-	2
42	1.83	1.87	0.7	800	0	-
43	1.84	1.88	56	600	-	3
44	1.83	1.87	0.8	1200	0	-
45	1.84	1.88	49	500	-	2
46	1.83	1.87	1.2	1000	5	-
47	1.84	1.88	52	500	-	2
48	1.83	1.87	1.3	1200	5	-
49	1.84	1.88	65	700	-	3
50	1.84	1.88	55	750	-	2.5

таблица 1.9

Вариант №	схема рис. №	ВАХ рис. №	E, В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	U _{эк} , В	I _б , мА
0	1.85	1.87	1	500	1000	5	-
1	1.86	1.88	20	500	1000	-	2
2	1.85	1.87	0.8	400	800	0	-
3	1.86	1.88	30	300	600	-	3
4	1.85	1.87	0.9	560	1200	0	-
5	1.86	1.88	25	250	500	-	2
6	1.85	1.87	1.1	500	1000	5	-
7	1.86	1.88	3.3	350	700	-	4
8	1.85	1.87	0.8	570	1000	0	-
9	1.86	1.88	20	400	800	0	1
10	1.85	1.89	0.6	750	1500	5	-
11	1.86	1.90	15	370	700	-	0.125
12	1.85	1.89	0.5	830	1600	0	-
13	1.86	1.90	25	830	1500	-	0.15
14	1.85	1.89	0.4	500	1000	0	-
15	1.86	1.89	30	750	1500	-	0.2
16	1.85	1.89	0.6	600	1200	5	-
17	1.86	1.90	25	710	1400	-	0.15
18	1.85	1.89	0.4	400	800	0	-
19	1.86	1.92	25	625	1200	-	0.15
20	1.85	1.91	0.6	1500	3000	10	-
21	1.86	1.92	25	625	1000	-	0.2
22	1.85	1.91	0.4	100	200	0	-
23	1.86	1.92	20	400	800	-	0.15
24	1.85	1.91	0.5	830	1500	0	-
25	1.86	1.92	20	400	800	-	0.2
26	1.85	1.91	0.4	667	1200	10	-
27	1.86	1.92	15	375	700	-	0.15
28	1.85	1.93	0.4	2000	3000	0	-
29	1.86	1.94	20	200	400	-	0.2
30	1.85	1.93	0.3	1200	2400	0	-
31	1.86	1.94	15	188	400	-	0.1

32	1.85	1.95	0.3	375	750	0	-
33	1.86	1.96	15	100	200	-	1
34	1.85	1.95	0.4	500	1000	5	-
35	1.86	1.96	20	154	300	-	1
36	1.85	1.95	0.3	500	1000	0	-
37	1.86	1.96	4	25	50	-	0.6
38	1.85	1.97	0.8	1000	2000	0	-
39	1.86	1.98	4	33	60	-	0.4
40	1.85	1.97	0.65	1100	2000	5	-
41	1.86	1.88	20	500	1200	-	2
42	1.85	1.87	0.8	400	700	0	-
43	1.86	1.88	30	300	500	-	3
44	1.85	1.87	0.9	560	1400	0	-
45	1.86	1.88	25	250	550	-	2
46	1.85	1.87	1.1	500	1300	5	-
47	1.86	1.90	25	750	1300	-	0.15
48	1.85	1.89	0.45	450	800	0	-
49	1.86	1.92	27	655	1200	-	0.15
50	1.85	1.91	0.65	1700	3000	10	-

Пример выполнения заданий (вариант №0)

Задание №1. Вольтамперная характеристика нелинейного элемента (транзистор КТ 104 А) изображена на рис. 1.87. Рассчитать ток в цепи (рис. 1.81) графическим методом и определить напряжение на участках цепи, если $R = 500 \text{ Ом}$, $E = 1 \text{ В}$, $U_{ЭК} = 5 \text{ В}$.

I. Решение (1 способ)

1. Строим вольтамперную характеристику нелинейного элемента при $U_{ЭК} = 5 \text{ В}$ (рис 1.99).

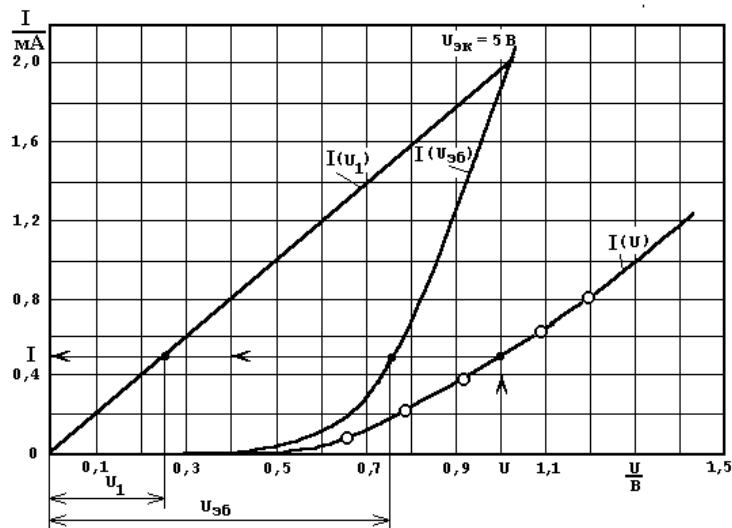


Рис 1.99

2. Вольтамперная характеристика линейного элемента R может быть построена по координатам двух точек. При этом выбираем произвольно величину тока (в пределах изменения тока в нелинейном элементе) и по закону Ома определяем напряжение на линейном элементе $U_1 = I \cdot R$, например, если $I = 0 \text{ mA}$, тогда $U_1 = I \cdot R = 0$, при $I = 2 \text{ mA}$, $U_1 = I \cdot R = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 500 = 1 \text{ V}$.

3. Строим эквивалентную вольтамперную характеристику нелинейной цепи (рис. 1.81). Так как линейный и нелинейный элементы соединены последовательно, то в каждом из них один и тот же ток. Тогда $U(I_n) = U_1(I_n) + U_{\text{н}}(I_n)$, Здесь I_n – задаваемое для построения эквивалентной ВАХ значение тока. Таким образом, при построении эквивалентной ВАХ необходимо произвольно задавать значение тока и графически суммировать напряжения U_1 и $U_{\text{н}}$, соответствующие этому току (рис. 1.99).

4. Находим величину тока в цепи при заданном значении эдс $E = 1 \text{ V}$. Для этого параллельно оси ординат (ось I) проводим прямую линию из точки $U = 1 \text{ V}$ до точки пересечения этой линии с графиком эквивалентной ВАХ $I(U)$, а затем проводим линию параллельно оси абсцисс (ось U) до пересечения с осью тока I (рис. 1.99) и находим величину тока в нелинейной цепи $I = 0.5 \text{ mA}$.

5. Напряжения на отдельных элементах цепи определяются, если из точек пересечения линии тока $I = 0.5 \text{ mA}$ с соответствующей ВАХ элемента опустить перпендикуляры на ось напряжения U . Таким образом, получим $U_1 = 0.95 \text{ V}$, $U_{\text{н}} = U_{\text{ЭБ}} = 0.75 \text{ V}$ (рис. 1.99).

2 способ решения (метод пересечения характеристик)

1. Строим вольтамперную характеристику нелинейного элемента (рис. 1.100).

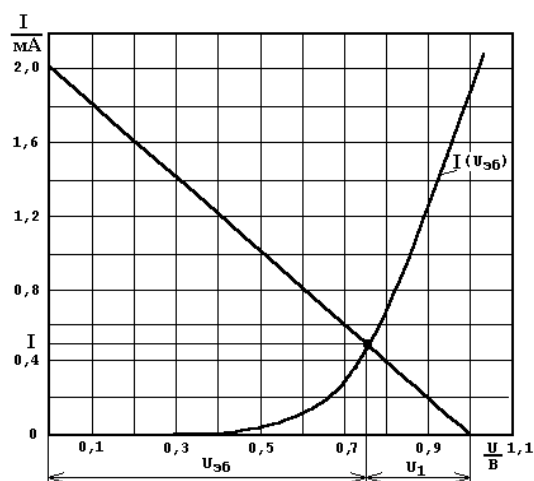


Рис 1.100

2. Напряжение на нелинейном элементе в соответствии со вторым законом Кирхгофа определяется уравнением $E - I \cdot R = U_{ЭБ}$

Левая часть этого уравнения является линейной и может рассматриваться как нагрузочная характеристика для источника $U_n(I) = E - I \cdot R$. Ее построение проведем по двум точкам, которые могут быть определены из режимов холостого хода ($I = 0$) и короткого замыкания ($U_n(I) = 0$). В рассматриваемом задании при $I = 0$, $U_n(I) = E = 1$ В, а при $U_n(I) = 0$

получим $I = I_{кз} = \frac{E}{R} = \frac{1}{500} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 2 \text{ mA}$.

3. По полученным координатам построим характеристику $I(U_n)$ (рис. 1.100).

4. Режим цепи определяет точка пересечения нагрузочной характеристики $I(U_n)$ с ВАХ нелинейного элемента.

5. Из графика (рис 1.100) определяем $I = 0.5 \text{ A}$, $U_1 = 2.5 \text{ В}$, $U_{нэ} = U_{ЭБ} = 0.75 \text{ В}$.

Задание 2. В заданной нелинейной цепи (рис. 1.83) графическим методом определить токи в ветвях, если вольтамперная характеристика нелинейного элемента задана (см. рис. 1. 87), $R = 1000 \text{ Ом}$, $I = 1.4 \text{ A}$, $U_{ЭК} = 5 \text{ В}$ (см. табл.1.8).

Решение

1. Строим ВАХ нелинейного элемента $I_2(U)$ рис. 1.101.

2. ВАХ линейного элемента R строим по координатам 2^x точек

$(U = 0, I_1 = \frac{U}{R} = 0), (U = 1 \text{ В}, I_1 = \frac{U}{R} = \frac{1}{1000} = 0.001 \text{ A} = 1 \text{ mA})$.

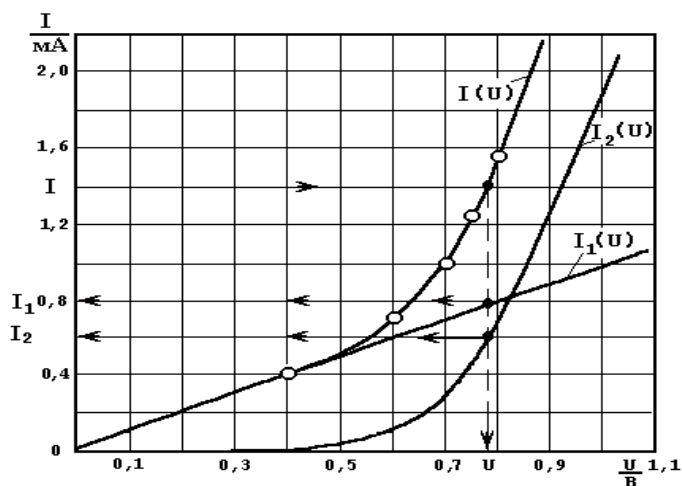


Рис 1.101

3. Так как элементы соединены параллельно, то они находятся под действием одного и того же напряжения, следовательно эквивалентная ВАХ цепи $I(U_n) = I_1(U_n) + I_2(U_n)$.

Здесь U_n – задаваемые произвольно в пределах графика напряжения на элементах.

На рис. 1.101 представлен график $I(U)$.

4. Проведем линию параллельно оси U относительно заданного тока $I = 1.4$ мА до пересечения с эквивалентной ВАХ $I(U)$.

5. Точка пересечения этой линии с эквивалентной ВАХ дает возможность определить напряжение на элементах нелинейной цепи $U = 0.79$ В.

6. По найденному напряжению на элементах $U = 0.79$ В, используя ВАХ линейного элемента, $I_1(U)$ находим ток $I_1 = 0.8$ мА в резистивном элементе, а используя ВАХ нелинейного элемента $I_2(U)$ находим ток $I_2 = 0.6$ мА в нелинейном элементе.

Задание 3. В заданной нелинейной цепи (рис. 1.85) определить токи в ветвях, если заданы ВАХ нелинейного элемента при $U_{\text{эк}} = 5$ В (рис. 1.87), $R_1 = 500$ Ом, $R_2 = 1000$ Ом, $E = 1$ В

Решение

1. Строим ВАХ (1) нелинейного элемента $I_3(U_2)$ (рис. 1.102)
2. Строим вольтамперную характеристику (2) элемента R_2 $I_2(U_2)$ (рис.1.102) по двум точкам $(U_2 = 0, I_2 = 0), (U_2 = 1 \text{ В}, I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{1}{1000} = 1 \text{ мА})$.
3. Строим ВАХ (3) участка цепи 1-2. $I(U_2) = I_2(U_2) + I_3(U_2)$ (рис. 1.102).
4. Строим нагрузочную характеристику (4) $E - I \cdot R_1 = U_H(I)$ по координатам 2 точек $(I = 0, U_H = 1 - 0 \cdot R_1 = 1 \text{ В}), (U_H = 0, 0 = E - I \cdot R_1 \Rightarrow I = \frac{E}{R_1} = \frac{1}{500} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ А})$.

5. Точка пересечения "а" (рис. 1.102) определяет режим цепи. Ток $I = 0.7\text{mA}$, $U_2 = 0.6\text{V}$

В.

6. Токи в ветвях определяются из графиков соответствующих вольтамперных характеристик $I_2 = 0.6\text{mA}$, $I_3 = 0.1\text{mA}$.

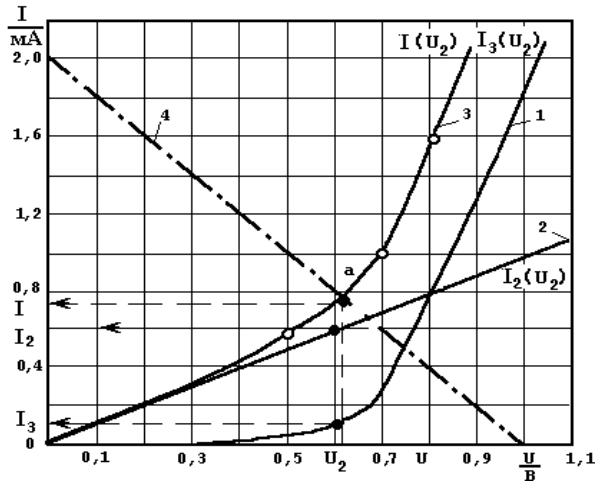


Рис 1.102

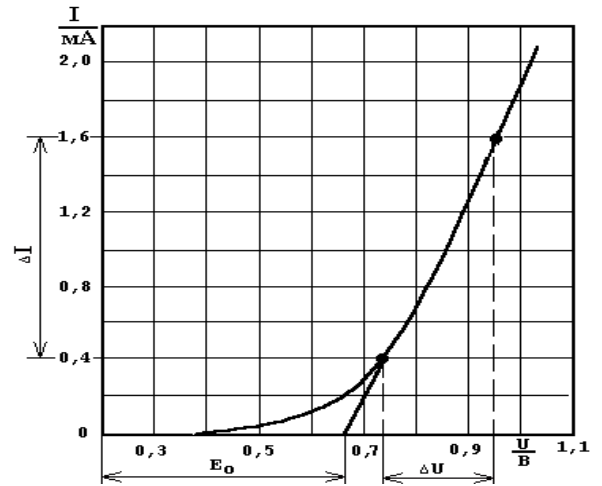


Рис 1.103

Задание 4. Вольтамперная характеристика нелинейного элемента (транзистор КТ 104 А) изображена на рис. 1.87. Рассчитать ток в цепи (рис. 1.81) графоаналитическим методом и определить напряжение на участках цепи, если $R_1 = 500\text{ Ом}$, $E_1 = 1\text{ В}$, $U_{\text{ЭК}} = 5\text{ В}$ (см. табл. 1.7)

Решение

1. Строим вольтамперную характеристику нелинейного элемента (рис. 1.103)

2. Так как вольтамперная характеристика (рис. 1.103) на рабочем участке практически линейна, то для расчета можно нелинейный элемент заменить эквивалентной схемой, состоящей из источника эдс E_0 и дифференциального сопротивления R_d .

2.1. Проведем кусочно-линейную аппроксимацию (рис. 1.103).

2.2. Определим по графику (рис. 1.103)

$$R_d = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{0.95 - 0.75}{(1.6 - 0.4) \cdot 10^{-3}} = \frac{0.2}{1.2 \cdot 10^{-3}} = 167\text{ Ом}, E_0 = 0.67\text{ В}.$$

2.3. Составим упрощенную схему цепи (рис. 1.104)

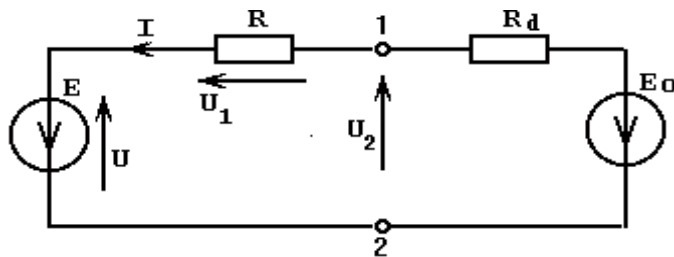


Рис 1.104

В эквивалентной схеме эдс E_0 направлена против направления тока I , так как при аппроксимации ось абсцисс (U) пересекается аппроксимированной ВАХ при $U > 0$.

3. Для цепи (рис. 1.104) составим уравнение по второму закону Кирхгофа

$$I \cdot R + I \cdot R_d = E - E_0.$$

$$\text{Отсюда } I = \frac{E - E_0}{R_1 + R_d} = \frac{1 - 0.67}{500 + 167} = \frac{0.33}{667} = 0.49 \cdot 10^{-3} \text{ A} = 0.49 \text{ mA} \approx 0.5 \text{ mA}.$$

Сравнивая результат расчета тока I графоаналитическим методом с результатом, полученным графическим методом в задании № 1, приходим к выводу, что результаты совпадают.

10. Расчет первичных 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.

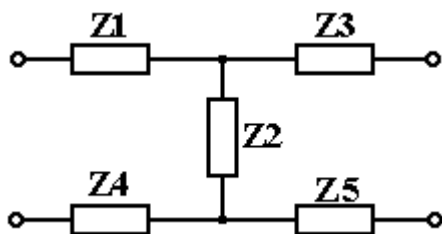


Рис. 5.1

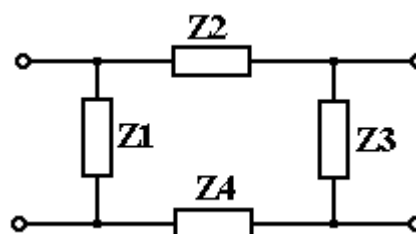


Рис. 5.2

Таблица 5.1

№ варианта	Рис.№	Z_1 , Ом	Z_2 , Ом	Z_3 , Ом	Z_4 , Ом	Z_5 , Ом	$E_{Г}$, В	$Z_{Г}$, Ом	$Z_{Н}$, 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.

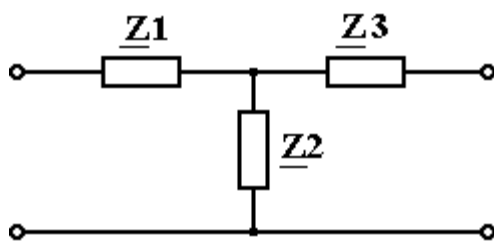


Рис.5.3

$$\underline{Z}_1 = 10 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_2 = j10 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_3 = 5 \text{ Ом}.$$

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)

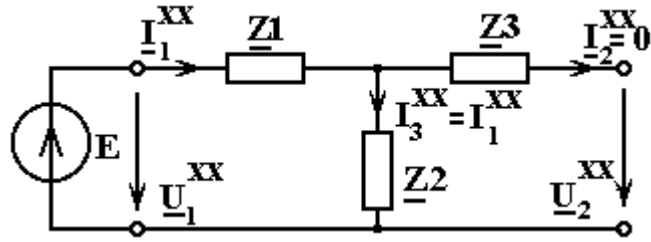


Рис.5.4

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)

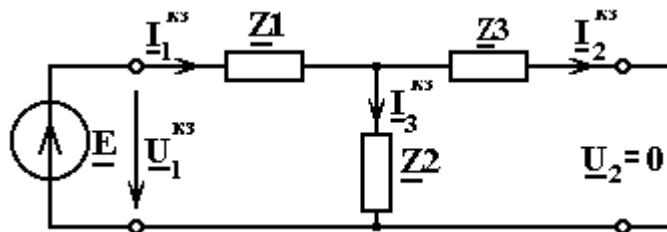


Рис.5.5

3.2. Система уравнений для режима короткого замыкания

$$\underline{U}_1^{k3} = \underline{A}_{12} \underline{I}_2^{k3}$$

$$\underline{I}_1^{k3} = \underline{A}_{22} \underline{I}_2^{k3}$$

3.3. Токи и напряжения в четырехполюснике при коротком замыкании

$$\underline{U}_1^{k3} = \underline{I}_1^{k3} (\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}) = \underline{I}_1^{k3} \cdot \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 + \underline{Z}_1 \underline{Z}_3 + \underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}$$

$$\underline{I}_2^{K3} = \underline{I}_1^{K3} \cdot \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}$$

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)

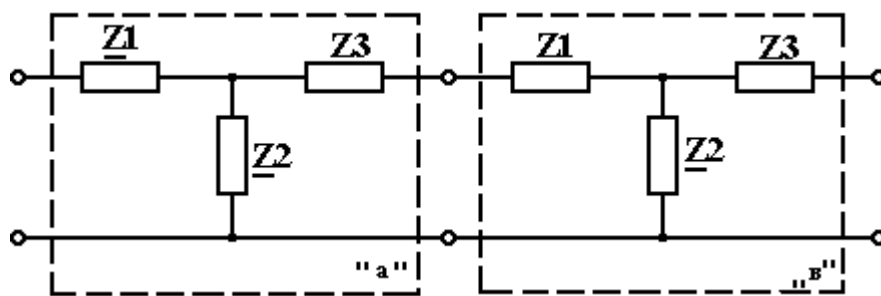


Рис.5.6

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»

$[\underline{A}_b] = \begin{bmatrix} \underline{A}_{11b} & \underline{A}_{12b} \\ \underline{A}_{21b} & \underline{A}_{22b} \end{bmatrix}$ – 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.

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)

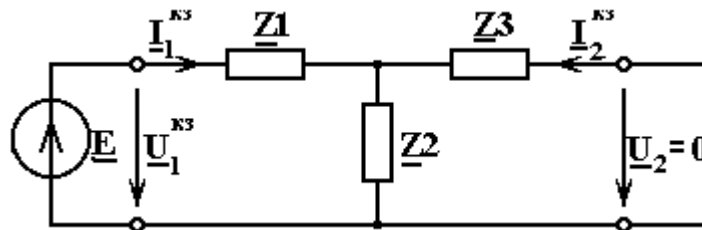


Рис.5.7

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)

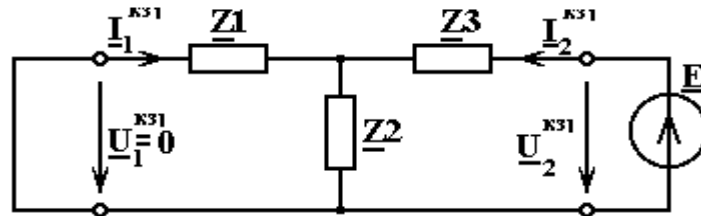


Рис.5.8

3.2. Система уравнений четырехполюсника при коротком замыкании входных зажимов

$$\begin{aligned}\underline{I}_1^{K3} &= \underline{Y}_{12} \underline{U}_2^{K31} \\ \underline{I}_2^{K31} &= \underline{Y}_{22} \underline{U}_2^{K31}\end{aligned}$$

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)

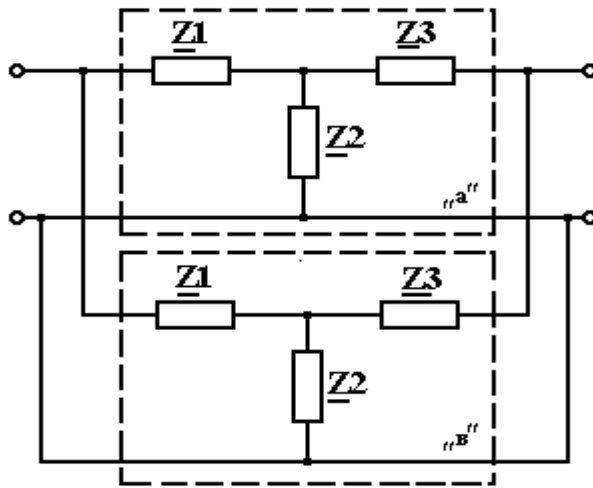


Рис. 5.9

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]

$$[\underline{A}] = \begin{bmatrix} \frac{-\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} & \frac{-1}{\underline{Y}_{21}} \\ -\frac{|\underline{Y}|}{\underline{Y}_{21}} & \frac{-\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}} \end{bmatrix}$$

Таблица 5.2

Определяемые параметры	В зависимости от параметров				
	$\underline{Y}$	$\underline{Z}$	$\underline{H}$	$\underline{F}$	$\underline{A}$

<u>Y</u>	$\frac{\underline{Y}_{11} \underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{21} \underline{Y}_{22}}$	$\frac{\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}}{ \underline{Z} } \frac{\underline{Z}_{12}}{ \underline{Z} }$ $\frac{-\underline{Z}_{21}}{ \underline{Z} } \frac{\underline{Z}_{11}}{ \underline{Z} }$	$\frac{1}{\underline{H}_{11}} \frac{-\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{11}}$ $\frac{\underline{H}_{21}}{\underline{H}_{11}} \frac{ \underline{H} }{\underline{H}_{11}}$	$\frac{ \underline{F} }{\underline{F}_{22}} \frac{\underline{F}_{12}}{\underline{F}_{22}}$ $\frac{-\underline{F}_{21}}{\underline{F}_{22}} \frac{1}{\underline{F}_{22}}$	$\frac{\underline{A}_{22} - \underline{A} }{\underline{A}_{12} \underline{A}_{12}}$ $\frac{-1}{\underline{A}_{12}} \frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{12}}$
<u>Z</u>	$\frac{\underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12}}{ \underline{Y} } \frac{\underline{Y}_{12}}{ \underline{Y} }$ $\frac{-\underline{Y}_{21}}{ \underline{Y} } \frac{\underline{Y}_{11}}{ \underline{Y} }$	$\underline{Z}_{11} \underline{Z}_{12}$ $\underline{Z}_{21} \underline{Z}_{22}$	$\frac{ \underline{H} }{\underline{H}_{22}} \frac{\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{22}}$ $\frac{-\underline{H}_{21}}{\underline{H}_{22}} \frac{1}{\underline{H}_{22}}$	$\frac{1}{\underline{F}_{11}} \frac{-\underline{F}_{12}}{\underline{F}_{11}}$ $\frac{\underline{F}_{21}}{\underline{F}_{11}} \frac{ \underline{F} }{\underline{F}_{11}}$	$\frac{\underline{A}_{11}}{\underline{A}_{21}} \frac{ \underline{A} }{\underline{A}_{21}}$ $\frac{1}{\underline{A}_{21}} \frac{\underline{A}_{22}}{\underline{A}_{21}}$
<u>H</u>	$\frac{1}{\underline{Y}_{11}} \frac{-\underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{11}}$ $\frac{\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{11}} \frac{ \underline{Y} }{\underline{Y}_{11}}$	$\frac{ \underline{Z} }{\underline{Z}_{22}} \frac{\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{22}}$ $\frac{-\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{22}} \frac{1}{\underline{Z}_{22}}$	$\underline{H}_{11} \underline{H}_{12}$ $\underline{H}_{21} \underline{H}_{22}$	$\frac{\underline{F}_{22} - \underline{F}_{12}}{ \underline{F} } \frac{\underline{F}_{12}}{ \underline{F} }$ $\frac{-\underline{F}_{21}}{ \underline{F} } \frac{\underline{F}_{11}}{ \underline{F} }$	$\frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{22}} \frac{ \underline{A} }{\underline{A}_{22}}$ $\frac{-1}{\underline{A}_{22}} \frac{\underline{A}_{21}}{\underline{A}_{22}}$
<u>F</u>	$\frac{ \underline{Y} }{\underline{Y}_{22}} \frac{\underline{Y}_{12}}{\underline{Y}_{22}}$ $\frac{-\underline{Y}_{21}}{\underline{Y}_{22}} \frac{1}{\underline{Y}_{22}}$	$\frac{1}{\underline{Z}_{11}} \frac{-\underline{Z}_{12}}{\underline{Z}_{11}}$ $\frac{\underline{Z}_{21}}{\underline{Z}_{11}} \frac{ \underline{Z} }{\underline{Z}_{11}}$	$\frac{\underline{H}_{22} - \underline{H}_{12}}{ \underline{H} } \frac{\underline{H}_{12}}{ \underline{H} }$ $\frac{-\underline{H}_{22}}{ \underline{H} } \frac{\underline{H}_{11}}{ \underline{H} }$	$\underline{F}_{11} \underline{F}_{12}$ $\underline{F}_{21} \underline{F}_{22}$	$\frac{\underline{A}_{21} - \underline{A} }{\underline{A}_{11} \underline{A}_{11}}$ $\frac{1}{\underline{A}_{11}} \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{A}_{11}}$
<u>A</u>	$\frac{-\underline{Y}_{22}}{\underline{Y}_{21}} \frac{-1}{\underline{Y}_{21}}$ $\frac{- \underline{Y} }{\underline{Y}_{21}} \frac{-\underline{Y}_{11}}{\underline{Y}_{21}}$	$\frac{\underline{Z}_{11}}{\underline{Z}_{21}} \frac{ \underline{Z} }{\underline{Z}_{21}}$ $\frac{1}{\underline{Z}_{21}} \frac{\underline{Z}_{22}}{\underline{Z}_{21}}$	$\frac{- \underline{H} }{\underline{H}_{21}} \frac{-\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{21}}$ $\frac{-\underline{H}_{22}}{\underline{H}_{21}} \frac{-1}{\underline{H}_{21}}$	$\frac{1}{\underline{F}_{21}} \frac{\underline{F}_{22}}{\underline{F}_{21}}$ $\frac{\underline{F}_{11}}{\underline{F}_{21}} \frac{ \underline{F} }{\underline{F}_{21}}$	$\underline{A}_{11} \underline{A}_{12}$ $\underline{A}_{21} \underline{A}_{22}$

В таблице $|\underline{Y}| = \underline{Y}_{11}\underline{Y}_{22} - \underline{Y}_{12}\underline{Y}_{21}$, $|\underline{Z}| = \underline{Z}_{11}\underline{Z}_{22} - \underline{Z}_{12}\underline{Z}_{21}$, $|\underline{H}| = \underline{H}_{11}\underline{H}_{22} - \underline{H}_{12}\underline{H}_{21}$,

$$|\underline{F}| = \underline{F}_{11}\underline{F}_{22} - \underline{F}_{12}\underline{F}_{21}, \quad |\underline{A}| = \underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{12}\underline{A}_{21}$$

5.5. Элементы матрицы $[\underline{A}]$ 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)

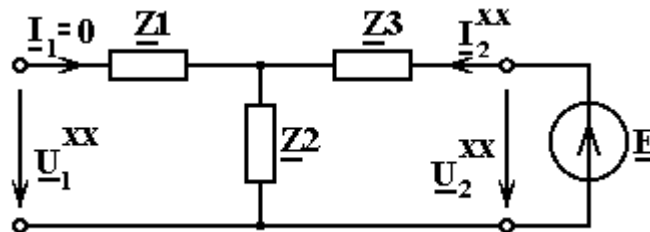


Рис.5.10

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)

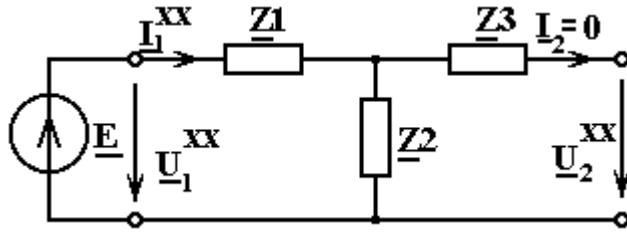


Рис. 5.11

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).

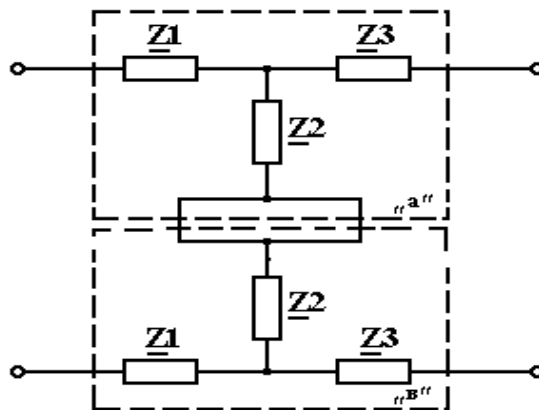


Рис. 5.12

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)

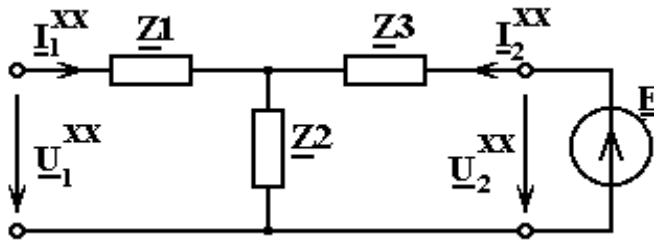


Рис. 5.13

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)

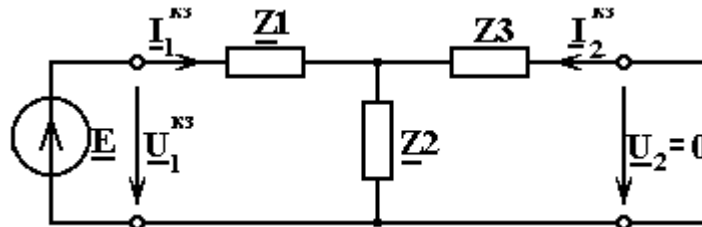


Рис. 5.14

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).

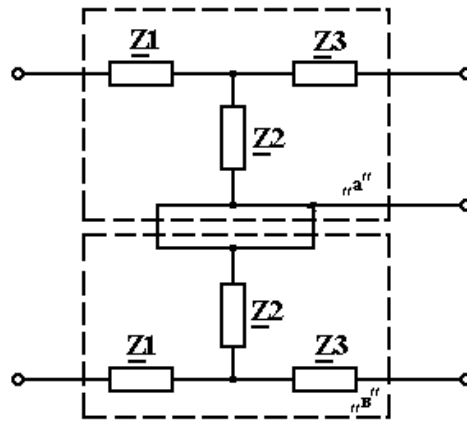


Рис.5.15

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]

$$[\underline{A}] = \begin{bmatrix} -\frac{|\underline{H}|}{\underline{H}_{21}} & -\frac{\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{21}} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{21} \\ -\underline{H}_{22} & -1 \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{21} \end{bmatrix}$$

5.5. Элементы матрицы $[A]$ - составного четырехполюсника

$$\underline{A}_{11} = -\frac{|\underline{H}|}{\underline{H}_{21}} = -\frac{\underline{H}_{11}\underline{H}_{22} - \underline{H}_{21}\underline{H}_{12}}{\underline{H}_{21}} = -\frac{(28 + j4)(0.08 - j0.16) - (-1.6 - j0.8)(1.6 + j0.8)}{-1.6 - j0.8} = 2 - j2,$$

$$\underline{A}_{12} = -\frac{\underline{H}_{11}}{\underline{H}_{21}} = -\frac{28 + j4}{-1.6 - j0.8} = 15 - j5 \text{ Ом},$$

$$\underline{A}_{21} = -\frac{\underline{H}_{22}}{\underline{H}_{21}} = -\frac{0.08 - j0.16}{-1.6 - j0.8} = -j0.1 \text{ См},$$

$$\underline{A}_{22} = -\frac{1}{\underline{H}_{21}} = -\frac{1}{-1.6 - j0.8} = 0.5 - j0.25.$$

$$5.6. \text{ Проверка: } \underline{A}_{11}\underline{A}_{22} - \underline{A}_{21}\underline{A}_{12} = (2 - j2)(0.5 - j0.25) - (-j0.1)(15 - j5) = 1$$

11. Расчет характеристических и рабочих параметров четырехполюсников

Учебные вопросы:

1. Расчет характеристических параметров четырехполюсников.
2. Расчет вносимого ослабления четырехполюсников.
3. Расчет рабочего ослабления четырехполюсников.

задание курсантам для подготовки к занятию

1. Изучить:

1. Никулин В. И. Теория электрических цепей. – М.: РИОР, 2016, с. 170-178.
2. Бакалов В.П., Воробиенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 262-274.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с.312-313, 316-317.

2. Ответить на вопросы:

1. Назовите характеристические параметры четырехполюсников.
2. Что называют характеристическим сопротивлением четырехполюсников.
3. Запишите выражение для определения характеристического сопротивления по А-параметрам четырехполюсника.
4. Что называют характеристической постоянной передачи четырехполюсника.
5. Что называют характеристическим (собственным) ослаблением четырехполюсника.
6. Запишите выражение для определения характеристического ослабления по А-параметрам четырехполюсника.
7. Что называют вносимым ослаблением четырехполюсника.
8. Запишите выражение для определения вносимого ослабления по А- параметрам четырехполюсника.
9. Что называют рабочим ослаблением четырехполюсника.
10. Запишите выражение для определения рабочего ослабления по А- параметрам четырехполюсника.

3. Проанализировать решение задач:

№ 11.20, 11.31 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1982. - с. 327, 330-332)

В ходе практического занятия выполнить задания:

задание №1. Для заданного согласно варианту четырехполюсника (табл.5.1) рассчитать характеристические сопротивления.

задание №2. Для заданного согласно варианту четырехполюсника (табл.5.1) рассчитать характеристическую постоянную передачи .

задание №3. Для заданного согласно варианту четырехполюсника (табл.5.1) рассчитать вносимое ослабление.

задание №4. Для заданного согласно варианту четырехполюсника (табл.5.1) рассчитать рабочее ослабление.

Пример выполнения заданий (вариант №0)

Задание № 1. Для заданного четырехполюсника (см. рис.5.3) рассчитать характеристические сопротивления, если $\underline{Z}_1=10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2=j10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_3=5 \text{ Ом}$ (табл.5.1).

Решение (1 способ)

1. Для определения характеристических сопротивлений используем формулы [1 с.151]:

$$\underline{Z}_{1c} = \sqrt{\frac{\underline{A}_{11} \cdot \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21} \cdot \underline{A}_{22}}}, \quad \underline{Z}_{2c} = \sqrt{\frac{\underline{A}_{22} \cdot \underline{A}_{12}}{\underline{A}_{21} \cdot \underline{A}_{11}}}.$$

2. А-параметры для заданного четырехполюсника определены (см. занятие 5.1)

$$\underline{A}_{11} = 1 - j1, \quad \underline{A}_{12} = 15 - j5 \text{ Ом}, \quad \underline{A}_{21} = -j0.1 \text{ См}, \quad \underline{A}_{22} = 1 - j0.5$$

3. Расчет характеристических сопротивлений

$$\underline{Z}_{1c} = \sqrt{\frac{(1-j1) \cdot (15-j5)}{(-j0.1) \cdot (1-j0.5)}} = \sqrt{\frac{10-j20}{-0.05-j0.1}} = \sqrt{\frac{22.361e^{-j1.107}}{0.112e^{-j2.034}}} = \sqrt{200e^{j0.927}} =$$

$$= 14.142e^{j0.464} = 12.649 + j6.325 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_{2c} = \sqrt{\frac{(1-j2.5) \cdot (15-j5)}{(-j0.1) \cdot (1-j1)}} = 11.18e^{j0.785} = 7.906 + j7.906 \text{ Ом}.$$

Решение (2 способ)

1. Для определения характеристических сопротивлений используем формулы [3 с.313]:

$$\underline{Z}_{1c} = \sqrt{\underline{Z}_{1x} \cdot \underline{Z}_{1k}} \quad , \quad \underline{Z}_{2c} = \sqrt{\underline{Z}_{2x} \cdot \underline{Z}_{2k}} \quad .$$

2. Расчет входных комплексных сопротивлений $\underline{Z}_{1x}$, $\underline{Z}_{1k}$ (режим холостого хода и короткого замыкания относительно выходных зажимов).

2.1. Схема четырехполюсника в режиме холостого хода (рис.5.16)

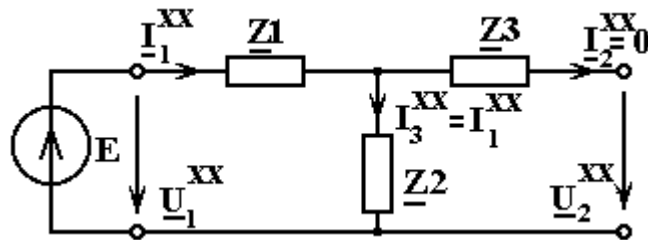


Рис.5.16

2.2. Комплексное сопротивление $\underline{Z}_{1x}$ для режима холостого хода

$$\underline{Z}_{1x} = \frac{\underline{U}_1^{xx}}{\underline{I}_1^{xx}} = \frac{\underline{I}_1^{xx} \cdot (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2)}{\underline{I}_1^{xx}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = 10 + j10 \text{ Ом}.$$

2.3. Схема четырехполюсника в режиме короткого замыкания (рис.5.17)

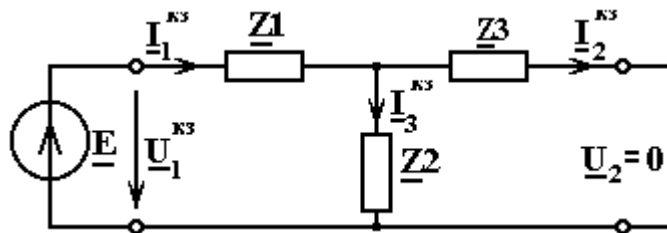


Рис.5.17

2.3. Комплексное сопротивление $\underline{Z}_{1k}$ для режима короткого замыкания

$$\underline{Z}_{1k} = \frac{\underline{I}_1^{k3} (\underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3})}{\underline{I}_1^{k3}} = \underline{Z}_1 + \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = 10 + \frac{j10 \cdot 5}{j10 + 5} = 14 + j2 \text{ Ом}.$$

3. Расчет входных комплексных сопротивлений Z_{2x} , Z_{2k} (режим холостого хода и короткого замыкания относительно входных зажимов).

3.1. Схема четырехполюсника в режиме холостого хода (рис.5.18)

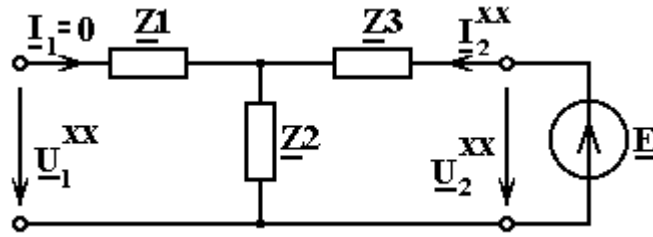


Рис.5.18

3.2. Комплексное сопротивление Z_{2x} для режима холостого хода

$$Z_{2x} = \frac{U_2^{xx}}{I_2^{xx}} = \frac{I_2^{xx} \cdot (Z_3 + Z_2)}{I_2^{xx}} = Z_3 + Z_2 = 5 + j10 \text{ Ом.}$$

3.3. Схема четырехполюсника в режиме короткого замыкания (рис.5.19)

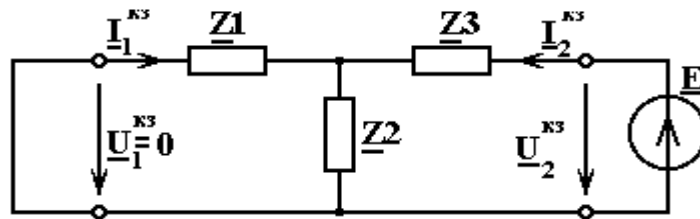


Рис.5.19

3.4. Комплексное сопротивление Z_{2k} для режима короткого замыкания

$$Z_{2k} = \frac{I_2^{k3} (Z_3 + \frac{Z_2 \cdot Z_1}{Z_2 + Z_1})}{I_2^{k3}} = Z_3 + \frac{Z_2 \cdot Z_1}{Z_2 + Z_1} = 5 + \frac{j10 \cdot 10}{j10 + 10} = 10 + j5 \text{ Ом}$$

4. Расчет характеристических сопротивлений

$$Z_{1c} = \sqrt{Z_{1x} \cdot Z_{1k}} = \sqrt{(10 + j10)(14 + j2)} = 12.649 + j6.325 = 14.142e^{j0.464} \text{ Ом,}$$

$$Z_{2c} = \sqrt{Z_{2x} \cdot Z_{2k}} = \sqrt{(5 + j10)(10 + j5)} = 7.906 + j7.906 = 11.18e^{j0.785} \text{ Ом.}$$

Задание № 2. Для заданного четырехполюсника (см. рис.5.3) рассчитать характеристическую (собственную) постоянную ослабления, если $Z_1=10$ Ом, $Z_2=j10$ Ом, $Z_3=5$ Ом (табл.5.1).

Решение (1 способ)

1. Характеристическая постоянная передачи четырехполюсника может быть определена по формуле [1с.152] $\Gamma_c = A_c + jB_c = \ln(\sqrt{A_{11} \cdot A_{22}} + \sqrt{A_{12} \cdot A_{21}})$, так как А-параметры для заданного четырехполюсника определены (см. занятие 5.1)

$$\underline{A}_{11} = 1 - j1, \quad \underline{A}_{12} = 15 - j5 \text{ Ом}, \quad \underline{A}_{21} = -j0.1 \text{ См}, \quad \underline{A}_{22} = 1 - j0.5$$

3. Расчет характеристической постоянной передачи четырехполюсника

$$\begin{aligned} \Gamma_c &= \ln(\sqrt{\underline{A}_{11} \cdot \underline{A}_{22}} + \sqrt{\underline{A}_{12} - \underline{A}_{21}}) = \ln(\sqrt{(1 - j1)(1 - j0.5)} + \sqrt{(15 - j5)(-j0.1)}) = \\ &= \ln(1.02 - j0.735 + 0.735 - j1.02) = \ln(1.755 - j1.755) = \ln 2.482 \cdot e^{-j0.785} = \\ &= \ln 2.482 + \ln e^{-j0.785} = 0.909 - j0.785 = A_c + jB_c \end{aligned}$$

4. Характеристическая постоянная ослабления $A_c = 0.909$ Нп = $0.909 \cdot 8.686 = 7.896$ дБ.

Решение (2 способ)

1. Находим полную мощность $S_1 = |\underline{U}_1 \underline{I}_1|$ на входе четырехполюсника при согласованной нагрузке $\underline{Z}_H = \underline{Z}_{2c}$.

1.1. Комплексный ток на входе четырехполюсника (рис.5.20)

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{E}_r}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_{ав}} = \frac{10}{10 + 2.649 + j6.325} = 0.632 - j0.316 \text{ А.}$$

Здесь $\underline{E}_r$ - комплексная ЭДС генератора выбираем равной 10 В,

$\underline{Z}_{ав}$ - эквивалентное комплексное сопротивление участка цепи «ав»

$$\underline{Z}_{ав} = \frac{\underline{Z}_2(\underline{Z}_3 + \underline{Z}_{2c})}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3 + \underline{Z}_{2c}} = \frac{j10(5 + 7.906 + j7.906)}{j10 + 5 + 7.906 + j7.906} = 2.649 + j6.325 \text{ ом.}$$

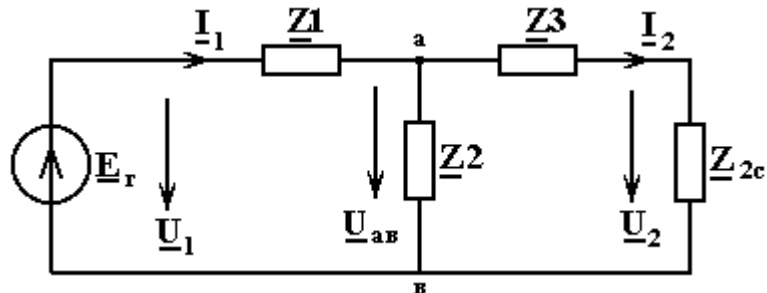


Рис.5.20

1.2. Комплексное напряжение на входе четырехполюсника $\underline{U}_1 = \underline{E}_r = 10 \text{ В.}$

1.3 Полная мощность на входе четырехполюсника

$$S_1 = |\underline{U}_1 \underline{I}_1| = |(0.632 - j0.0316)10| = 7.071 \text{ ВА}$$

2. Находим полную мощность $S_2 = |\underline{U}_2 \underline{I}_2|$ в нагрузке $\underline{Z}_H = \underline{Z}_{2c}$.

2.1. Комплексное напряжение $\underline{U}_{ав}$ определим по методу двух узлов (частный случай метода узловых потенциалов)

$$\underline{U}_{ав} = \frac{\underline{E}_r \cdot \frac{1}{\underline{Z}_1}}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_{2c}}} = \frac{10 \cdot \frac{1}{10}}{\frac{1}{10} + \frac{1}{j10} + \frac{1}{5 + 7.906 + j7.906}} = 3.675 + j3.162 \text{ В.}$$

2.2. Комплексный ток в нагрузке $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{ав}}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_{2с}} = \frac{3.675 + j3.162}{5 + 7.906 + j7.906} = 0.316 + j0.051 \text{ A.}$

2.3. Комплексное напряжение на нагрузке $\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{2с} = (0.316 + j0.051) \cdot 7.906 + j7.906 = 2.094 + j2.906 \text{ В.}$

2.4. Полная мощность в нагрузке $S_2 = |\underline{U}_2 \underline{I}_2| = |(2.094 + j2.906)(0.316 + j0.051)| = 1.147 \text{ ВА}$

3. Характеристическое (собственное) ослабление четырехполюсника $A_c = \frac{1}{2} \ln \frac{S_1}{S_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{7.071}{1.147} = 0.909 \text{ Нп} = 0.909 \cdot 8.686 = 7.896 \text{ дБ.}$

Задание № 3. Для заданного четырехполюсника (см. рис.5.3) рассчитать вносимое ослабление, если $\underline{Z}_1=10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2=j10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_3=5 \text{ Ом}$, $E_r=10 \text{ В}$, $\underline{Z}_r=10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_н=20 \text{ Ом}$ (см. табл.5.1).

Решение (1 способ)

1. Находим полную мощность в нагрузке, при ее подключении непосредственно к источнику [3]

1.1. Расчетная схема (рис.5.21)

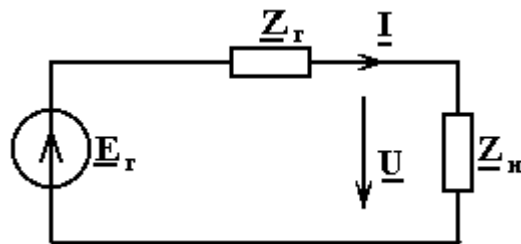


Рис.5.21

1.2. Комплексный ток в цепи $\underline{I} = \frac{\underline{E}_r}{\underline{Z}_r + \underline{Z}_н} = \frac{10 \cdot e^{j0}}{10 + 20} = 0.333 \text{ A.}$

1.3. Комплексное напряжение на нагрузке $\underline{U} = \underline{I} \cdot \underline{Z}_н = 0.333 \cdot 20 = 6.66 \text{ В.}$

1.4. Полная мощность в нагрузке $S = |\underline{U}| \cdot |\underline{I}| = 6.66 \cdot 0.333 = 2.222 \text{ В} \cdot \text{А.}$

2. Находим полную мощность в нагрузке при ее подключении к источнику через четырехполюсник.

2.1. Расчетная схема (рис.5.22)

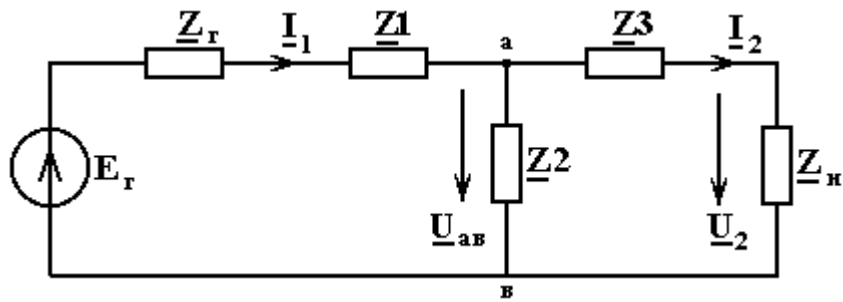


Рис.5.22

2.2. Комплексное напряжение $\underline{U}_{ав}$ определим по методу двух узлов

$$\underline{U}_{ав} = \frac{\underline{E}_r \cdot \frac{1}{\underline{Z}_r + \underline{Z}_1}}{\frac{1}{\underline{Z}_r + \underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2} + \frac{1}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_н}} = \frac{10 \cdot \frac{1}{10 + 10}}{\frac{1}{10 + 10} + \frac{1}{j10} + \frac{1}{5 + 20}} = 2.486 + j2.762 \text{ В.}$$

2.3. Комплексный ток в нагрузке $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{ав}}{\underline{Z}_3 + \underline{Z}_н} = \frac{2.486 + j2.762}{5 + 20} = 0.099 + j0.11 \text{ А.}$

2.4. Комплексное напряжение на нагрузке

$$\underline{U}_2 = \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_н = (0.099 + j0.11) \cdot 20 = 1.989 + j2.21 \text{ В.}$$

2.5. Комплексная мощность в нагрузке

$$\underline{S}_2 = \underline{U}_2 \cdot \underline{I}_2^* = (1.989 + j2.21)(0.099 - j0.11) = 0.442 \text{ ВА}$$

2.6. Полная мощность $S_2 = |\underline{S}_2| = 0.442 \text{ ВА}$

3. Вносимое ослабление

$$A_{вн} = \frac{1}{2} \ln \frac{S}{S_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{2.222}{0.442} = 0.807 \text{ Нп} = 0.807 \cdot 8.686 = 7.014 \text{ дБ}$$

Решение (2 способ)

Поскольку в заданиях № 1- № 2 определены $\underline{Z}_{1с}, \underline{Z}_{2с}, A_c$, то $A_{вн}$ рассчитаем по формуле [1с.159]:

$$A_{вн} = A_c + \ln \left| \frac{\underline{Z}_r + \underline{Z}_{1с}}{2\sqrt{\underline{Z}_r \cdot \underline{Z}_{2с}}} \right| + \ln \left| \frac{\underline{Z}_н + \underline{Z}_{2с}}{2\sqrt{\underline{Z}_н \cdot \underline{Z}_{2с}}} \right| + \ln \left| 1 - \frac{\underline{Z}_r - \underline{Z}_{1с}}{\underline{Z}_r + \underline{Z}_{1с}} \cdot \frac{\underline{Z}_н - \underline{Z}_{2с}}{\underline{Z}_н + \underline{Z}_{2с}} e^{-2\Gamma_c} \right| - \ln \left| \frac{\underline{Z}_r + \underline{Z}_н}{2\sqrt{\underline{Z}_r \cdot \underline{Z}_н}} \right|$$

Для этого предварительно вычислим значения отдельных слагаемых:

1. Собственная постоянная ослабления $A_c = 0.909 \text{ Нп.}$

2. $A_1 = \ln \left| \frac{\underline{Z}_r + \underline{Z}_{1с}}{2\sqrt{\underline{Z}_r \cdot \underline{Z}_{1с}}} \right| = \ln \left| \frac{10 + 12.649 + j6.325}{2\sqrt{10 \cdot 14.142} \cdot e^{j0.464}} \right| = \ln \frac{\sqrt{22.649^2 + 6.325^2}}{2\sqrt{141.42}} =$
 $= \ln 0.989 = -0.011 \text{ Нп.}$

$$3. A_2 = \ln \left| \frac{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{2c}}{2\sqrt{\underline{Z}_H \cdot \underline{Z}_{2c}}} \right| = \ln \left| \frac{20 + 7.906 + j7.906}{2\sqrt{20 \cdot 11.18e^{j0.785}}} \right| = \ln 0.97 = -0.031 \text{ Нп.}$$

$$4. A_3 = \ln \left| 1 - \frac{10 - 12.649 - j6.325}{10 + 12.649 + j6.325} \cdot \frac{20 - 7.906 - j7.906}{20 + 7.906 - j7.906} e^{-2 \cdot (0.909 - j0.783)} \right| =$$

$$= \ln \left| 1 - 0.292e^{-j2.24} \cdot 0.498e^{-j0.855} \cdot 0.162e^{j1.571} \right| = \ln \left| 1 - 1.103 \cdot 10^{-3} + j0.024 \right| =$$

$$= \ln |0.999 + j0.024| = \ln 0.999 = -8.26 \cdot 10^{-4} \text{ Нп.}$$

$$5. A_4 = \ln \left| \frac{\underline{Z}_r + \underline{Z}_H}{2\underline{Z}_r \cdot \underline{Z}_H} \right| = \ln \frac{10 + 20}{2 \cdot \sqrt{20 \cdot 20}} = \ln 1.061 = 0.059 \text{ Нп.}$$

Вносимое ослабление в неперах

$$A_{\text{вн}} = A_c + A_1 + A_2 + A_3 - A_4 = 0.909 - 0.011 - 0.031 - 8.26 \cdot 10^{-4} - 0.059 = 0.807 \text{ Нп.}$$

Вносимое ослабление в децибелах $A_{\text{вн}} = 8.686 \cdot 0.807 \text{ дБ} = 7.014 \text{ дБ.}$

Задание №4. Для заданного четырехполюсника (см. рис.5.3) рассчитать рабочее ослабление, если $\underline{Z}_1=10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2=j10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_3=5 \text{ Ом}$, $E_r=10 \text{ В}$, $\underline{Z}_r=10 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_H=20 \text{ Ом}$ (см. табл.5.1).

Решение (1 способ)

1. Находим полную мощность в нагрузке $\underline{Z}_H = \underline{Z}_r$ при ее подключении непосредственно к источнику

1.1. Расчетная схема (рис. 5.23)

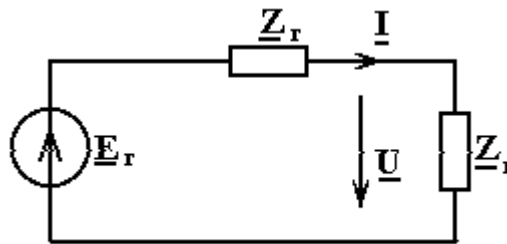


Рис. 5.23

1.2. Комплексный ток в цепи $\underline{I} = \frac{\underline{E}_r}{\underline{Z}_r + \underline{Z}_r} = \frac{\underline{E}_r}{2\underline{Z}_r} = \frac{10e^{j0}}{2 \cdot 10} = 0.5 \text{ А.}$

1.3. Комплексное напряжение на нагрузке (рис.5.23) $\underline{U} = \underline{I} \cdot \underline{Z}_r = 0.5 \cdot 10 = 5 \text{ В.}$

1.4. Полная мощность в сопротивлении нагрузки $\underline{Z}_H = \underline{Z}_r$ $S = |\underline{U}| \cdot |\underline{I}| = 5 \cdot 0.5 = 2.5 \text{ ВА.}$

2. Полная мощность в заданной нагрузке $\underline{Z}_H=20 \text{ Ом}$ (табл.5.1 вариант №0) при ее подключении к четырехполюснику определяется по алгоритму, рассмотренному в задании № 3, и составляет величину $S_2 = 0.442 \text{ ВА.}$

3. Рабочее ослабление в неперах $A_p = \frac{1}{2} \ln \frac{S}{S_2} = \frac{1}{2} \ln \frac{2.5}{0.442} = 0.866 \text{ Нп.}$

4. Рабочее ослабление в децибелах $A_p = 10 \lg \frac{S}{S_2} = 10 \lg \frac{0.5}{0.442} = 7.525 \text{ дБ.}$

Решение (2 способ)

1. Для нахождения рабочего ослабления можно использовать формулу [1 с.159]

$$A_p = A_c + \ln \left| \frac{Z_\Gamma + Z_{1c}}{2\sqrt{Z_\Gamma \cdot Z_{1c}}} \right| + \ln \left| \frac{Z_H + Z_{2c}}{2\sqrt{Z_H \cdot Z_{2c}}} \right| + \ln \left| 1 - \frac{Z_\Gamma - Z_{1c}}{Z_\Gamma + Z_{1c}} \cdot \frac{Z_H - Z_{2c}}{Z_H + Z_{2c}} e^{-2\Gamma_c} \right|$$

2. Используя результаты расчета отдельных слагаемых для этого выражения, полученные в задании № 3, определим

$$A_p = A_c + A_1 + A_2 + A_3 = 0.909 - 0.011 - 0.031 - 8.26 \cdot 10^{-4} = 0.866 \text{ Нп.}$$

3. Такой же результат можно получить, если использовать значение $A_{вн}$

$$A_p = A_{вн} + \ln \left| \frac{Z_\Gamma + Z_H}{2\sqrt{Z_\Gamma \cdot Z_H}} \right| = A_{вн} + A_4 = 0.807 + 0.059 = 0.866 \text{ Нп.}$$

4. Рабочее ослабление в децибелах $A_p = 8.686 \cdot 0.866 = 7.525 \text{ дБ.}$

12. Анализ длинных линий в режимах бегущих и стоячих волн

Учебные вопросы:

1. Анализ длинных линий при согласованной нагрузке.
2. Анализ длинных линий при коротком замыкании.
3. Анализ длинных линий при холостом ходе.
4. Анализ длинных линий при реактивной нагрузке.

задание курсантам для подготовки к занятию

1.Изучить:

1. Никулин В. И. Теория электрических цепей. – М.: РИОР, 2016, с. 206-222.
2. Бакалов В.П., Воробиевко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 291-300.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с.248-249, 252-253.

2.Ответить на вопросы:

1. Назовите первичные параметры длинной линии.
2. Назовите вторичные параметры длинной линии.
3. Назовите условия согласования длинной линии с нагрузкой.
4. Запишите систему уравнений длинной линии с согласованной нагрузкой.
5. При каких условиях в длинной линии создается режим стоячих волн?
6. Запишите систему уравнений распределения тока и напряжения в длинной линии без потерь в режиме холостого хода при отсчете расстояния от нагрузки.
7. Запишите систему уравнений распределения тока и напряжения в длинной линии в режиме короткого замыкания при отсчете расстояния от нагрузки.
8. Качественно изобразите графики распределения действующих тока и напряжения в длинной линии без потерь в режиме короткого замыкания при отсчете расстояния от нагрузки.

3.Проанализировать решение задач

№ 9.28, 9.30 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1982. - с. 269-272)

В ходе практического занятия выполнить задания:

Задание № 1. Энергия передается на высокой частоте f от генератора к излучающей системе с помощью фидера, первичные параметры которого L_{Π}, C_{Π} . заданы согласно

варианту (табл.5.3). Потерями в фидере можно пренебречь ($R_{\Pi} = 0$, $G_{\Pi} = 0$). Напряжение генератора $u_1 = U_{m1} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$. Определить вторичные параметры линии. Определить напряжение и ток в нагрузке, если $Z_{\Pi} = Z_{\text{в}}$. Построить графики распределения вдоль длинной линии действующих напряжения U и тока I , входного сопротивления $Z_{\text{вх}}$. Записать уравнения мгновенных значений напряжения и тока для моментов времени t_1 и t_2 , построить графики мгновенных напряжений.

Задание №2. Фидер имеет длину ℓ и параметры C_{Π} , L_{Π} (табл. 5.3) и находится в режиме холостого хода. Определить действующие значения напряжения и тока, если к фидеру подведено напряжение $u_1 = U_{m1} \sin \omega t$. Начертить графики распределения действующих значений напряжения и тока вдоль фидера. Записать уравнения мгновенных значений напряжения и тока для t_1 и t_2 , построить графики мгновенных токов.

Задание №3. Фидер имеет длину ℓ и параметры C_{Π} , L_{Π} (табл. 5.3) и находится в режиме короткого замыкания. Рассчитать и начертить графики распределения напряжения $U(y)$, тока $I(y)$ и $X_{\text{вх}}(y)$ вдоль фидера, если к фидеру подведено напряжение $u_1 = U_{m1} \sin \omega t$. Записать уравнение мгновенных значений напряжения и тока для t_1 и t_2 .

Задание №4. Фидер имеет длину ℓ и параметры C_{Π} , L_{Π} (табл. 5.3) и нагружен на сопротивление $jX_{\text{н}}$. Рассчитать и начертить графики распределения напряжения $U(y)$, тока $I(y)$ и $X_{\text{вх}}(y)$ вдоль фидера, если к фидеру подведено напряжение $u_1 = U_{m1} \sin \omega t$.

Таблица 5.3

№ варианта	L_{Π} , мкГн/м	C_{Π} , пФ/м	ℓ , м	U_{m1} , В	f_1 , МГц	t_1	t_2	$X_{\text{н}}$, Ом
0	1,57	7,1	3,5	14,14	100	0	T/8	470
1	1,67	6,67	6	28	30	T/20	T/3	-500
2	0,992	6,2	5,5	10	50	T/15	T/4	400
3	1,55	6,2	7	30	40	T/25	T/6	500
4	1,561	6,0	8,5	40	60	T/30	T/8	-510
5	1,754	5,8	9	50	70	T/35	T/9	550
6	1,088	6,8	10	60	80	T/40	T/10	-400
7	1,512	4,2	8	70	90	T/45	0	600
8	1,86	4,4	6,5	80	100	T/50	T/15	-650
9	0,81	4,0	4,5	90	90	T/60	T/20	450
10	0,62	4,0	5	10	80	T/10	T/30	-400
11	1,011	7,0	8	12	70	0	T/40	380
12	1,659	7,2	9,5	14	60	T/12	T/50	-480
13	1,8	7,2	10	18	50	T/13	T/2	500
14	1,825	7,3	3,8	20	40	T/14	T/3	-500
15	2,238	7,4	12	24	30	T/15	T/4	550

16	2,736	7,6	15	28	20	T/16	T/5	-600
17	3,296	7,6	15	28	20	T/17	T/6	650
18	3,43	7,0	10	32	20	T/18	T/7	-700
19	2,52	7,0	8.7	34	30	T/19	T/8	600
20	1,75	7,0	6.8	38	40	T/20	T/9	-500
21	1,12	7,0	5.6	40	50	T/21	T/10	400
22	1,52	7,5	10	50	60	T/32	T/1	-450
23	2,27	7,5	7.7	60	70	T/23	T/2	550
24	3,17	7,5	4.3	10	80	T/24	T/3	-650
25	1,7	7,5	3.4	15	90	T/25	T/4	600
26	1,625	6,5	4.8	20	100	T/10	T/5	-500
27	1,04	6,5	5.2	25	150	T/15	0	400
28	1,316	6,5	3.3	30	200	T/20	T/10	-450
29	2,34	6,5	8.4	35	30	T/25	T/1	600
30	2,746	6,5	6	40	50	T/20	0	-650
31	3,1	5,5	5	30	30	T/5	T/2	750
32	2,7	5,5	3	35	90	T/1	T/20	-700
33	1,29	5,5	4	28	120	0	T/25	600
34	1,375	5,5	4	14	150	T/10	T/30	-500
35	1,664	5,5	3	28	200	T/20	0	550
36	2,746	6,5	4	45	150	T/25	0	-600
37	3,0	5,0	6	30	30	T/4	T/6	700
38	2,9	6,5	5	45	95	T/2	T/20	-750
39	1,29	5,0	4	27	125	0	T/25	500
40	1,37	5,8	4	16	140	T/12	T/3	-550
41	1,69	6,65	6.5	28	30	T/25	T/5	-500
42	0,982	6,25	4.5	15	50	T/12	T/4	420
43	1,56	6,12	6	30	40	T/20	T/6	520
44	1,56	6,1	8	40	60	T/10	T/8	-610
45	1,75	5,84	5	50	70	T/5	T/9	510
46	1,088	6,8	10	60	80	T/40	T/10	-400
47	1,52	4,25	7	75	90	T/15	0	590
48	1,83	4,6	6	60	100	T/5	T/15	-550
49	0,88	4,4	4	80	90	T/10	T/3	440
50	0,65	4,5	5.5	10	85	T/12	T/20	-410

Пример выполнения заданий (вариант № 0)

Задание № 1. Энергия передается на высокой частоте $f = 100$ МГц от генератора к излучающей системе с помощью фидера, имеющего первичные параметры $C_{\Pi} = 7.1 \text{ пФ/м}$, $L_{\Pi} = 1.57 \text{ мкГн/м}$ (табл.5.3). Потерями в фидере можно пренебречь ($R_{\Pi} = 0$, $G_{\Pi} = 0$). Напряжение генератора $u_1 = 14.14 \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$. Определить вторичные параметры линии. Определить напряжение и ток в нагрузке, если $Z_{\text{н}} = Z_{\text{в}}$. Построить графики распределения вдоль длинной линии действующих напряжения U и тока I ,

входного сопротивления $Z_{вх}$. Записать уравнения мгновенных значений напряжения и тока для моментов времени $t_1 = 0$ и $t_2 = \frac{T}{8}$, построить графики мгновенных напряжений.

Решение

1. Определяем коэффициент распространения $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = \sqrt{(R_{\Pi} + j\omega L_{\Pi})(G_{\Pi} + j\omega C_{\Pi})} = j\omega\sqrt{L_{\Pi}C_{\Pi}} = j \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^8 \sqrt{1.57 \cdot 10^{-6} \cdot 7.1 \cdot 10^{-12}} = j2.1 \text{ рад/м.}$

1.1 Находим коэффициент ослабления $\alpha = 0$.

1.2 Находим коэффициент фазы $\beta = \omega\sqrt{L_{\Pi} \cdot C_{\Pi}} = 2.1 \text{ рад/м.}$

2. Определяем длину волны $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{2.1} = 3 \text{ м.}$

3. Определяем волновое сопротивление $\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{R_{\Pi} + j\omega L_{\Pi}}{G_{\Pi} + j\omega C_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{L_{\Pi}}{C_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{1.57 \cdot 10^{-6}}{7.1 \cdot 10^{-12}}} = 470 \text{ Ом.}$

4. Входное сопротивление линии без потерь

$$\underline{Z}_{вх}(x) = \underline{Z}_B \frac{\underline{Z}_H \cos \beta x - j\underline{Z}_B \sin \beta x}{\underline{Z}_B \cos \beta x - j\underline{Z}_H \sin \beta x} = \underline{Z}_B \frac{\underline{Z}_B \cos \beta x - j\underline{Z}_B \sin \beta x}{\underline{Z}_B \cos \beta x - j\underline{Z}_B \sin \beta x} = \underline{Z}_B = 470 \text{ Ом.}$$

5. Комплексный ток генератора $\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_{m1}}{\sqrt{2}\underline{Z}_{вх}} = \frac{14.14e^{j\frac{\pi}{2}}}{14.14 \cdot 470} = \frac{10e^{j\frac{\pi}{2}}}{470} = 0.021e^{j\frac{\pi}{2}} \text{ А.}$

6. Комплексные действующие вдоль линии напряжение и ток определяются выражениями[3]

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_1 \cos \beta x - j\underline{I}_1 \underline{Z}_B \sin \beta x = \underline{U}_1 \cos \beta x - j\underline{U}_1 \sin \beta x = \underline{U}_1 (\cos \beta x - j \sin \beta x) = \underline{U}_1 e^{-j\beta x},$$

$$\underline{I}(x) = \underline{I}_1 \cos \beta x - j \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_B} \sin \beta x = \underline{I}_1 \cos \beta x - j\underline{I}_1 \sin \beta x = \underline{I}_1 (\cos \beta x - j \sin \beta x) = \underline{I}_1 e^{-j\beta x}.$$

6. Напряжения на нагрузке:

$$\text{- комплексное напряжение } \underline{U}_2 = \underline{U}(\ell) = \underline{U}_1 e^{-j\beta \ell} = 10e^{-j2.1 \cdot 3.5} = 10e^{-j7.35} \text{ В,}$$

$$\text{- действующее напряжение } U_2 = 10 \text{ В.}$$

7. Токи в нагрузке: - комплексный ток $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_H} = \frac{10e^{-j7.35}}{470} = 0.021e^{-j7.35} \text{ А.}$

$$\text{- действующий ток } I_2 = 0.021 \text{ А.}$$

8. Мгновенное напряжение можно записать, используя уравнение

$$\underline{U}(x) = \underline{U}_1 e^{-j\beta x} = U_1 e^{j\frac{\pi}{2}} e^{-j\beta x}, \quad u(t, x) = U_1 \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \beta x)$$

При $t = 0$ $u(t, x) = U_1 \sqrt{2} \sin(\frac{\pi}{2} - \beta x) = U_{m1} \cos(\beta x) = 14.14 \cos \beta x$ В (рис.5.25).

При $t = \frac{T}{8}$

$$u(t, x) = U_1 \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \beta x) = U_{m1} \sin(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{8} + \frac{\pi}{2} - \beta x) = U_{m1} \sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2} - \beta x) =$$

$$= U_{m1} \sin(\beta x + \frac{\pi}{4}) = 14.14 \sin(\beta x + \frac{\pi}{4}) \text{ В (рис.5.25).}$$

9. Мгновенный ток можно записать, используя уравнение $\underline{I}(x) = \underline{I}_1 e^{-j\beta x} = I_1 e^{j\frac{\pi}{2}} e^{-j\beta x}$

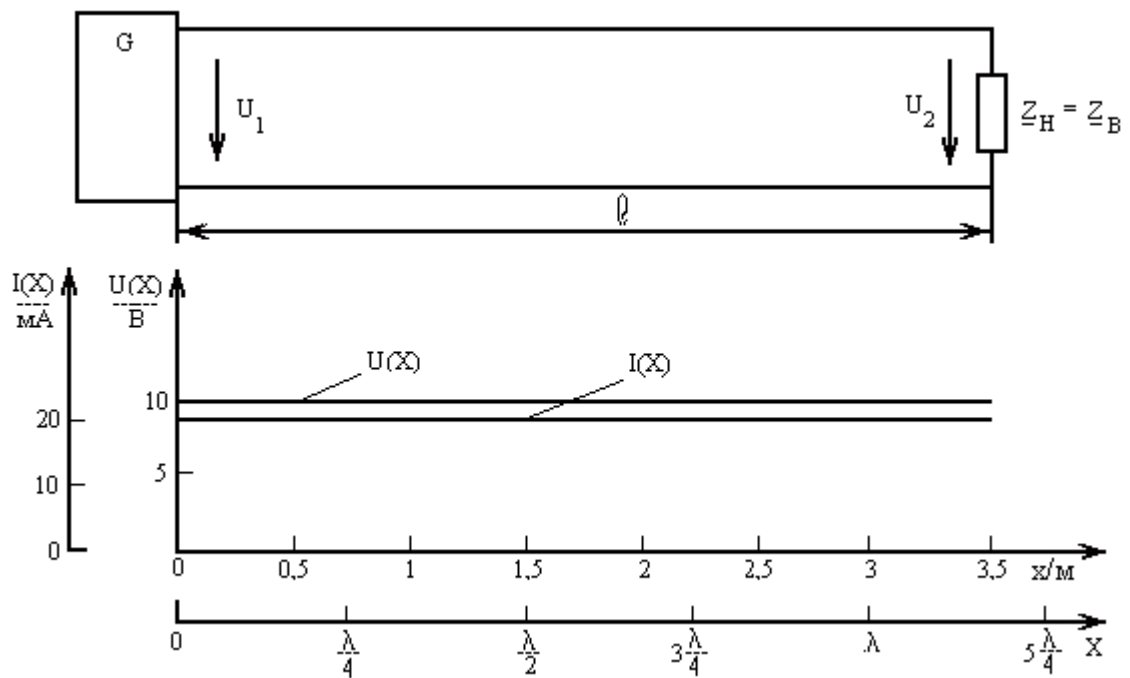
$$i(t, x) = I_1 \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \beta x)$$

При $t = 0$ $i(t, x) = I_1 \sqrt{2} \sin(\frac{\pi}{2} - \beta x) = I_{m1} \cos(\beta x) = 0.021 \cos \beta x$ А.

При $t = \frac{T}{8}$

$$i(t, x) = I_1 \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2} - \beta x) = I_{m1} \sin(\frac{2\pi}{T} \frac{T}{8} + \frac{\pi}{2} - \beta x) = I_{m1} \sin(\frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2} - \beta x) =$$

$$= I_{m1} \sin(\beta x + \frac{\pi}{4}) = 0.021 \sin(\beta x + \frac{\pi}{4}) \text{ А.}$$



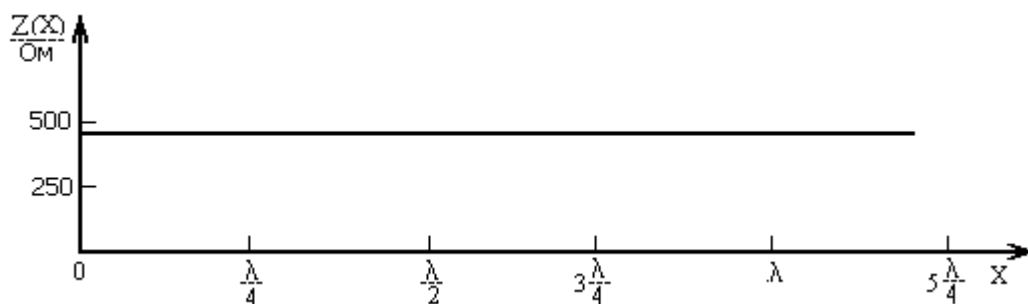


Рис. 5.24. Графики распределения действующих напряжения и тока, входного сопротивления вдоль линии в режиме согласованной нагрузки

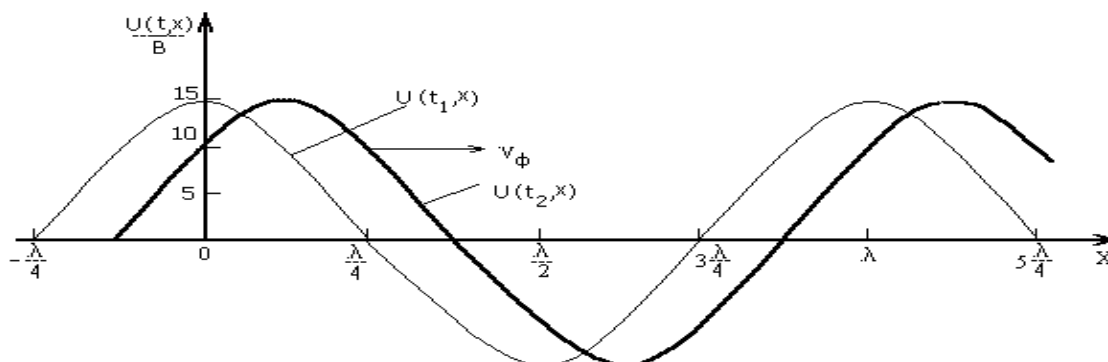


Рис. 5.26. Графики изменения мгновенного напряжения в длинной линии в режиме согласованной нагрузки

Задание №2. Фидер имеет длину ℓ и параметры $C_{\Pi} = 7.1 \text{ пФ/м}$, $L_{\Pi} = 1.57 \text{ мкГн/м}$ (табл. 5.3) и находится в режиме холостого хода. Определить действующие значения напряжения и тока, если к фидеру подведено напряжение $u_1 = 14.14 \sin \omega t$. Начертить кривые распределения действующих значений напряжения и тока вдоль фидера. Записать уравнения мгновенных значений напряжения и тока для моментов времени $t_1 = 0$ и $t_2 = \frac{T}{8}$.

Решение

1. Волновое сопротивление $Z_{\text{В}} = \sqrt{\frac{L_{\Pi}}{C_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{1.57 \cdot 10^{-6}}{7.1 \cdot 10^{-12}}} = 470 \text{ Ом}$

2 Находим коэффициент фазы $\beta = \omega \sqrt{L_{\Pi} C_{\Pi}} = 2\pi \cdot 10^8 \sqrt{1.57 \cdot 10^{-6} \cdot 7.1 \cdot 10^{-12}} = 2.1 \text{ рад/м}$

3. Определяем длину волны $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{2.1} = 3 \text{ м.}$

4. Напряжение в конце линии U_2 в режиме холостого хода ($I_2 = 0$) определим из выражения для комплексного напряжения вдоль линии [2]

$\underline{U}(y) = \underline{U}_2 \cos \beta y + j \underline{I}_2 \underline{Z}_B \sin \beta y = \underline{U}_2 \cos \beta y = \underline{U}_2 \cos \beta \ell = \underline{U}_1$, отсюда напряжение

$$\underline{U}_2 = \frac{\underline{U}_1}{\cos \beta \ell} = \frac{\underline{U}_{m1}}{\sqrt{2} \cdot \cos \beta \ell} = \frac{14.14 \cdot e^{j0}}{\sqrt{2} \cdot \cos(2.1 \cdot 3.5)} = 20 \text{ В.}$$

5. Комплексный действующий вдоль линии ток режиме холостого хода определяется

$$\text{выражением [2]} \quad \underline{I}(y) = \underline{I}_2 \cos \beta y + j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_B} \sin \beta y = j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_B} \sin \beta y$$

6. Действующие напряжение и ток, входное сопротивление вдоль линии в режиме холостого хода ($\underline{I}_2 = 0$)

$$U(y) = |\underline{U}(y)| = U_2 |\cos \beta y| = 20 |\cos \beta y|,$$

$$I(y) = |\underline{I}(y)| = \frac{U_2}{Z_B} |\sin \beta y| = \frac{20}{470} \cdot |\sin \beta y| = 0.043 |\sin \beta y|,$$

$$X_{\text{вх}}(y) = -Z_B \operatorname{ctg} \beta y = -470 \operatorname{ctg} \beta y.$$

7. Расчеты, необходимые для построения графиков, представлены в таблице 5.4

Таблица 5.4

$y(\lambda)$	$y, \text{ м}$	βy	$\cos \beta y$	$\sin \beta y$	$\operatorname{ctg} \beta y$	$U(y), \text{ В}$	$I(y), \text{ мА}$	$X_{\text{вх}}(y), \text{ Ом}$
0	0	0	1	0	∞	20	0	$-\infty$
$\frac{1}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.15	0.1π	0.951	0.309	3.078	19.02	13	- 1447
$\frac{2}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.3	0.2π	0.809	0.588	1.376	16.18	25	- 650
$\frac{3}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.45	0.3π	0.588	0.809	0.727	11.76	34	- 344
$\frac{4}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.6	0.4π	0.309	0.951	0.325	6.18	40	- 156
$\frac{\lambda}{4}$	0.75	0.5π	0	1	0	0	43	0

8. Уравнения мгновенных напряжений и токов в режиме холостого хода

$$u(t, y) = U_2 \cdot \sqrt{2} \sin \omega t \cos \beta y, \quad i(t, y) = \frac{U_2 \sqrt{2}}{Z_B} \cdot \cos \omega t \sin \beta y.$$

$$\text{При } t = t_1 = 0 \quad u(t, y) = 0, \quad i(t_1, y) = \frac{U_2 \sqrt{2}}{Z_B} \sin \beta y = \frac{20 \sqrt{2}}{470} \sin \beta y = 0.06 \sin \beta y$$

При

$$t = t_2 = \frac{T}{8}$$

$$u(t_2, y) = U_2 \sqrt{2} \sin\left(\frac{2\pi T}{T} \frac{T}{8}\right) \cos \beta y = U_2 \sqrt{2} \sin\left(\frac{2\pi}{4}\right) \cos \beta y = \frac{20 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{2}}{2} \cos \beta y = 20 \cos \beta y$$

,

$$i(t_2, y) = \frac{U_2 \sqrt{2}}{Z_B} \cdot \cos \omega t \sin \beta y = \frac{U_2 \sqrt{2}}{Z_B} \cdot \cos\left(\frac{2\pi T}{T} \frac{T}{8}\right) \sin \beta y = \frac{20\sqrt{2}}{470} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \sin \beta y = 0.043 \sin \beta y$$

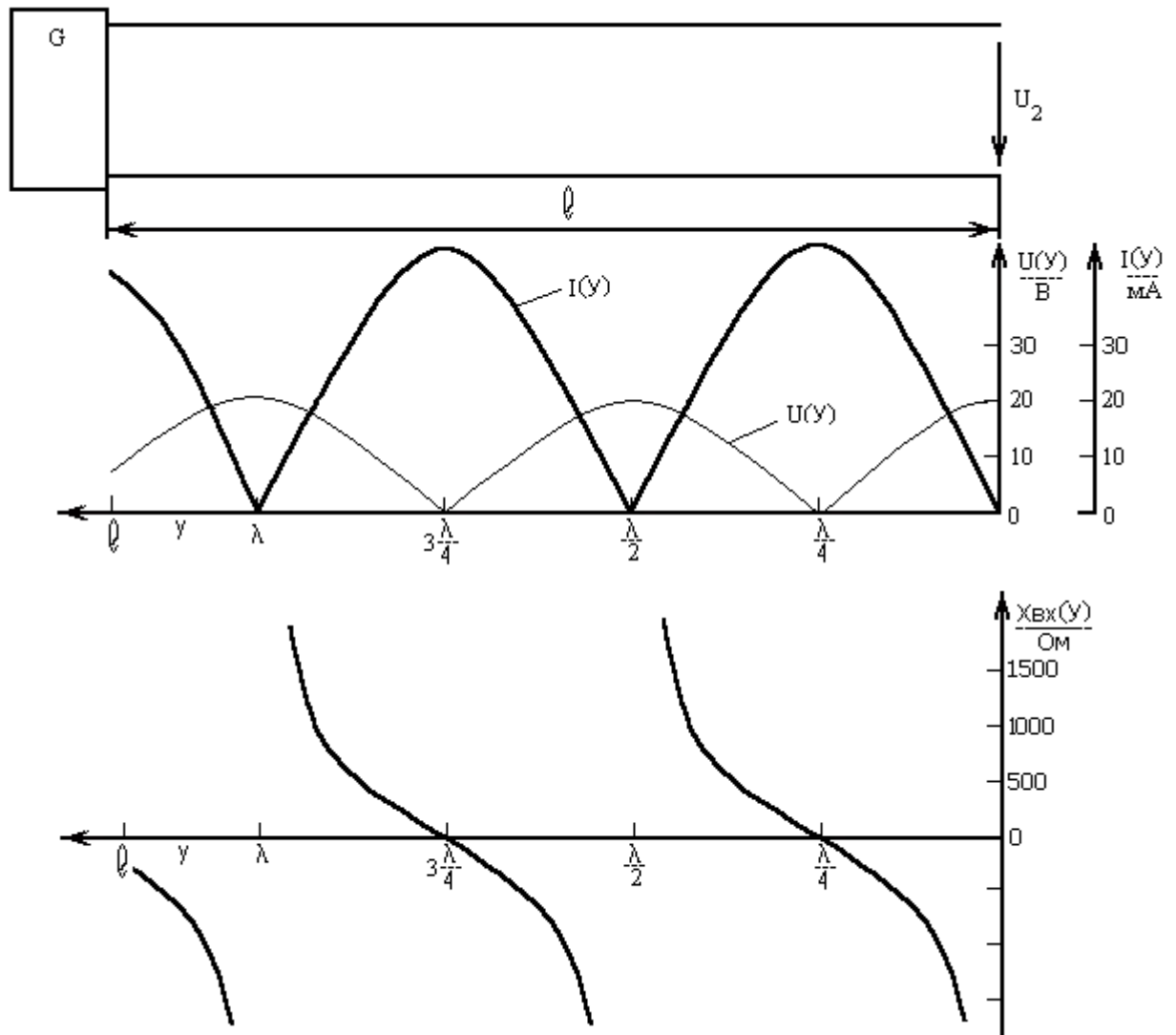


Рис. 5.27. Графики распределения действующих напряжения и тока, входного сопротивления вдоль линии в режиме холостого хода

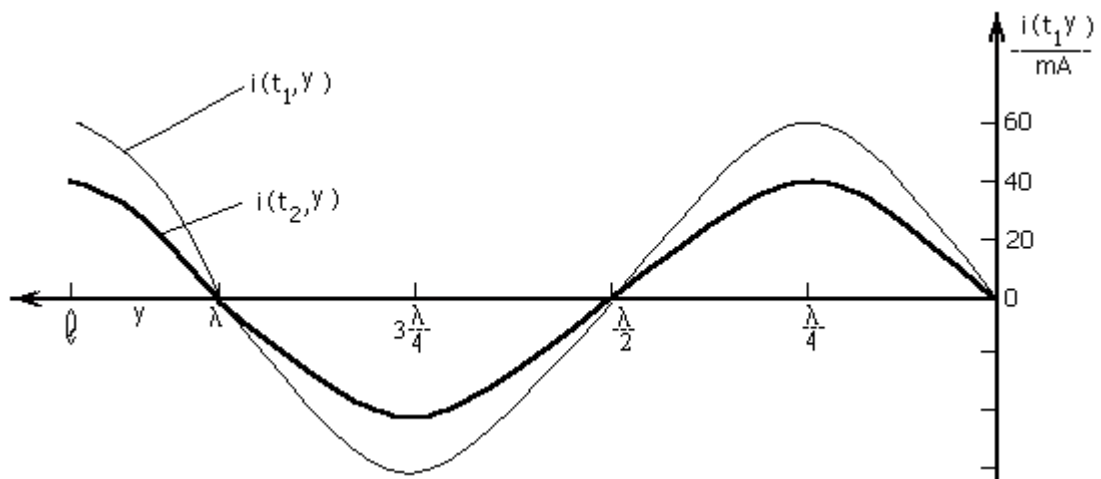


Рис. 5.28. Графики изменения мгновенного тока в длинной линии в режиме холостого хода

Задание №3. Фидер имеет длину ℓ и параметры $C_{\Pi} = 7.1 \text{ пФ/м}$, $L_{\Pi} = 1.57 \text{ мкГн/м}$ (табл. 5.3) и находится в режиме короткого замыкания. Рассчитать и начертить кривые распределения напряжения $U(y)$, тока $I(y)$ и $X_{\text{вх}}(y)$ вдоль фидера, если к фидеру подведено напряжение $u_1 = 14.14 \sin \omega t$. Записать уравнение мгновенных значений напряжения и тока для $t_1=0$ и $t_2=T/8$.

Решение

1. Волновое сопротивление $\underline{Z}_B = \sqrt{\frac{L_{\Pi}}{C_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{1.57 \cdot 10^{-6}}{7.1 \cdot 10^{-12}}} = 470 \text{ Ом}.$

2. Коэффициент фазы $\beta = \omega \sqrt{L_{\Pi} C_{\Pi}} = 2\pi \cdot 10^8 \sqrt{1.57 \cdot 10^{-6} \cdot 7.1 \cdot 10^{-12}} = 2.1 \text{ рад/м}$

3. Длина волны $\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = 3 \text{ м}.$

4. Комплексный действующий вдоль линии ток в режиме короткого замыкания ($U_2=0$)

определяется выражением [2] $\underline{I}(y) = \underline{I}_2 \cos \beta y + j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_B} \sin \beta y = \underline{I}_2 \cos \beta y$. Отсюда можно

рассчитать ток в конце линии, определив ток в генераторе, т.е. ток в начале линии $\underline{I}(y)=\underline{I}(\ell$

$)=\underline{I}_1=\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{\text{вх}}}$. Здесь $\underline{Z}_{\text{вх}} = \underline{Z}_{\text{вх}}(\ell) = j\underline{Z}_B \cdot \tan \beta y = j\underline{Z}_B \cdot \tan \beta \ell \text{ Ом}.$ таким образом

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{I}_1}{\cos \beta \ell} = \frac{\underline{U}_{m1}}{\sqrt{2} \cdot j\underline{Z}_B \cdot \tan \beta \ell \cdot \cos \beta \ell} = \frac{\underline{U}_{m1} e^{-j\frac{\pi}{2}}}{\sqrt{2} \underline{Z}_B \sin \beta \ell} = \frac{14.14 e^{-j\frac{\pi}{2}}}{\sqrt{2} \cdot 470 \cdot \sin(2.1 \cdot 3.5)} = 0.025 e^{-j\frac{\pi}{2}} \text{ А}$$

.

Комплексное напряжение вдоль линии [3] $\underline{U}(y) = \underline{U}_2 \cos \beta y + j\underline{I}_2 \underline{Z}_B \sin \beta y = j\underline{I}_2 \underline{Z}_B \sin \beta y$

5. Действующие напряжение и ток, входное сопротивление вдоль линии в режиме к.з.
($U_2=0$)

$$U(y) = I_2 Z_B |\sin \beta y| = 11.55 \sin \beta y \text{ В}, \quad I(y) = I_2 |\cos \beta y| = 25 |\cos \beta y| \text{ мА},$$

$$X_{\text{вх}}(y) = Z_B \cdot \operatorname{tg} \beta y = 470 \operatorname{tg} \beta y \text{ Ом}.$$

6. Расчеты, необходимые для построения графиков, представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5

$y(\lambda)$	$y, \text{ м}$	βy	$\cos \beta y$	$\sin \beta y$	$\operatorname{tg} \beta y$	$U(y), \text{ В}$	$I(y), \text{ мА}$	$X_{\text{вх}}(y), \text{ Ом}$
0	0	0	1	0	0	0	25	0
$\frac{1}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.15	0.1π	0.951	0.309	3.025	3.6	23	153
$\frac{2}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.3	0.2π	0.809	0.588	0,727	6.8	20	341
$\frac{3}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.45	0.3π	0.588	0.809	1,376	9.3	14	644
$\frac{4}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.6	0.4π	0.309	0.951	3,078	10.98	7	1427
$\frac{\lambda}{4}$	0.75	0.5π	0	1	∞	11.55	0	∞

7. Уравнения мгновенных напряжений и токов в режиме короткого замыкания

$$u(t, y) = I_2 \sqrt{2} \cdot Z_B \cdot \sin \omega t \cdot \sin \beta y,$$

$$i(t, y) = I_2 \sqrt{2} \cdot \cos \omega t \cdot \cos \beta y,$$

при $t = 0 \quad u(t, y) = 0 \quad i(t, y) = I_2 \cdot \sqrt{2} \cdot 1 \cdot \cos \beta y = 34 \cos \beta y \text{ мА}.$

$$t = \frac{T}{8} \quad u(t, y) = 0.025 \cdot \sqrt{2} \cdot 470 \cdot \sin\left(\frac{2\pi T}{T} \frac{T}{8}\right) \cdot \sin \beta y = 0.025 \cdot \sqrt{2} \cdot 470 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \sin \beta y = 11.28 \sin \beta y \text{ В}.$$

$$i(t, y) = I_2 \sqrt{2} \cdot \cos \omega t \cdot \cos \beta y = I_2 \sqrt{2} \cdot \cos\left(\frac{2\pi T}{T} \frac{T}{8}\right) \cdot \cos \beta y = I_2 \sqrt{2} \cdot \cos\left(\frac{\pi}{4}\right) \cdot \cos \beta y = 25 \cos \beta y \text{ мА}$$

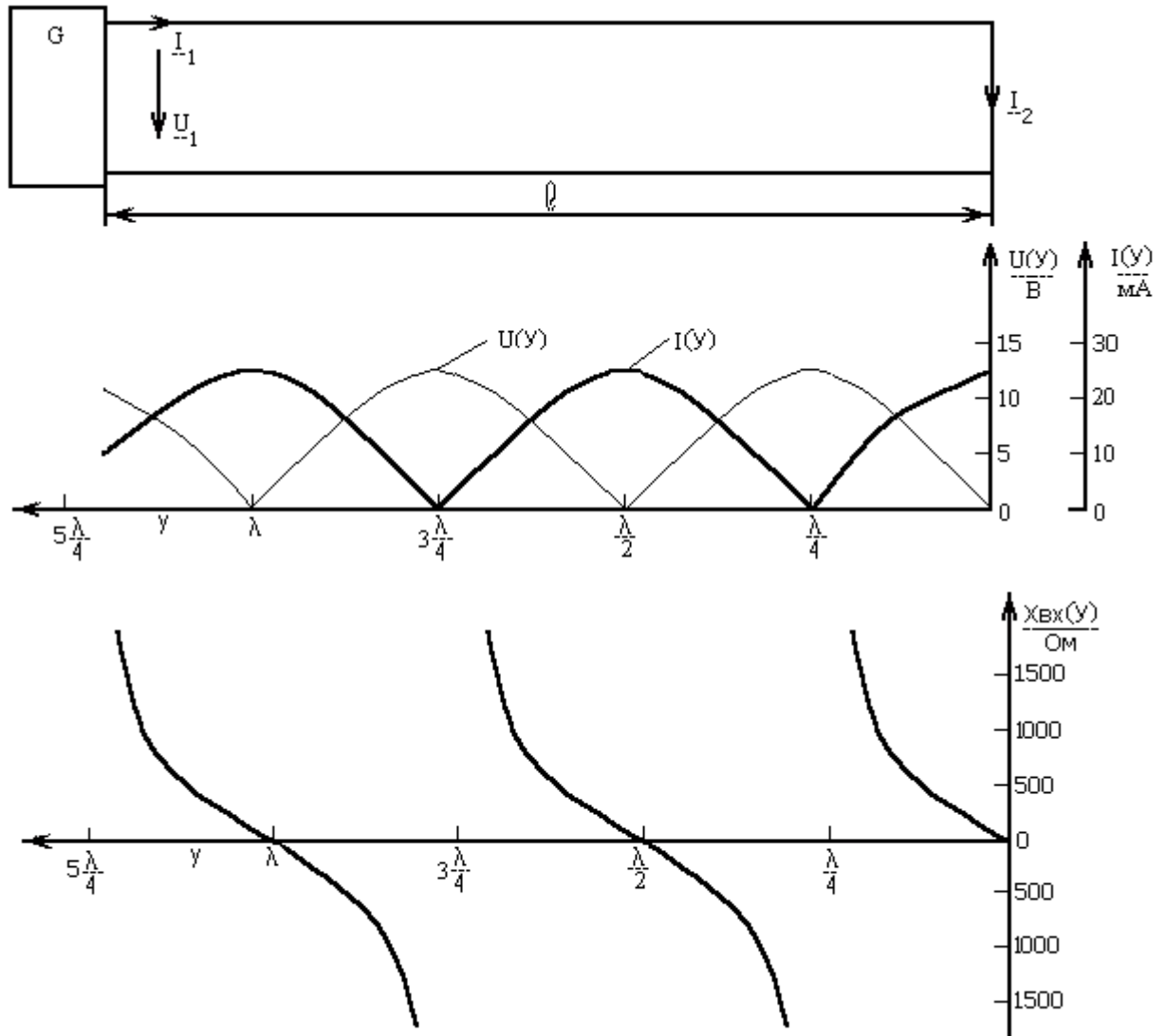


Рис. 5.29. Графики распределения действующих напряжения и тока, входного сопротивления вдоль линии в режиме короткого замыкания.

Задание №4. Фидер имеет длину ℓ и параметры $C_{\Pi} = 7.1 \text{ пФ/м}$, $L_{\Pi} = 1.57 \text{ мкГн/м}$ (табл. 5.3) нагружен на сопротивление $Z_{\text{н}} = jX_{\text{н}} = j470 \text{ Ом}$. Рассчитать и начертить кривые распределения напряжения $U(y)$, тока $I(y)$ и $X_{\text{вх}}(y)$ вдоль фидера, если к фидеру подведено напряжение $u_1 = 14.14 \sin \omega t$.

Решение

1. Длина короткозамкнутого отрезка линии, входное сопротивление которого эквивалентно

$$X_{\text{н}} = 470 \text{ Ом} (X_{\text{н}} > 0), \quad y_0 = \frac{1}{\beta} \arctg \frac{X_{\text{н}}}{Z_{\text{в}}} = \frac{1}{2.1} \arctg \frac{470}{470} = \frac{1}{2.1} \cdot 0.785 = 0.375 \text{ м}.$$

2. Проводим расчет действующих напряжения и тока, входного сопротивления вдоль линии длиной $\ell' = \ell + y_0$ в режиме к.з. по аналогии с заданием № 3.

2.1. Действующий ток в конце короткозамкнутой линии

$$I_2 = \frac{U_{m1}}{\sqrt{2} \cdot Z_B \cdot \sin(\beta \ell')} = \frac{14.14}{\sqrt{2} \cdot 470 \cdot \sin(\beta \cdot 3.875)} = 0.022 \text{ A} = 22 \text{ mA}.$$

2.2. Действующие напряжение и ток, входное сопротивление вдоль линии длиной

$\ell' = \ell + y_0$ в режиме к.з. ($U_2=0$)

$$U(y) = I_2 Z_B |\sin \beta y| = 10.34 |\sin \beta y| \text{ В},$$

$$I(y) = I_2 |\cos \beta y| = 22 |\cos \beta y| \text{ mA},$$

$$X_{\text{вх}}(y) = Z_B \cdot \text{tg } \beta y \text{ Ом}.$$

2.3. Расчеты, необходимые для построения графиков, представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6

$y(\lambda)$	$y, \text{ м}$	βy	$\cos \beta y$	$\sin \beta y$	$\text{tg } \beta y$	$U(y), \text{ В}$	$I(y), \text{ mA}$	$X_{\text{вх}}(y), \text{ Ом}$
0	0	0	1	0	0	0	22	0
$\frac{1}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.15	0.1π	0.951	0.309	3.025	3.2	21	153
$\frac{2}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.3	0.2π	0.809	0.588	0,727	6.1	18	340
$\frac{3}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.45	0.3π	0.588	0.809	1,376	8.4	13	642
$\frac{4}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.6	0.4π	0.309	0.951	3,078	9.8	7	1417
$\frac{\lambda}{4}$	0.75	0.5π	0	1	∞	10.35	0	∞

3. Строим графики $U(y)$, $I(y)$, $X_{\text{вх}}(y)$ для короткозамкнутой линии и затем начало координат переносим на y_0 .

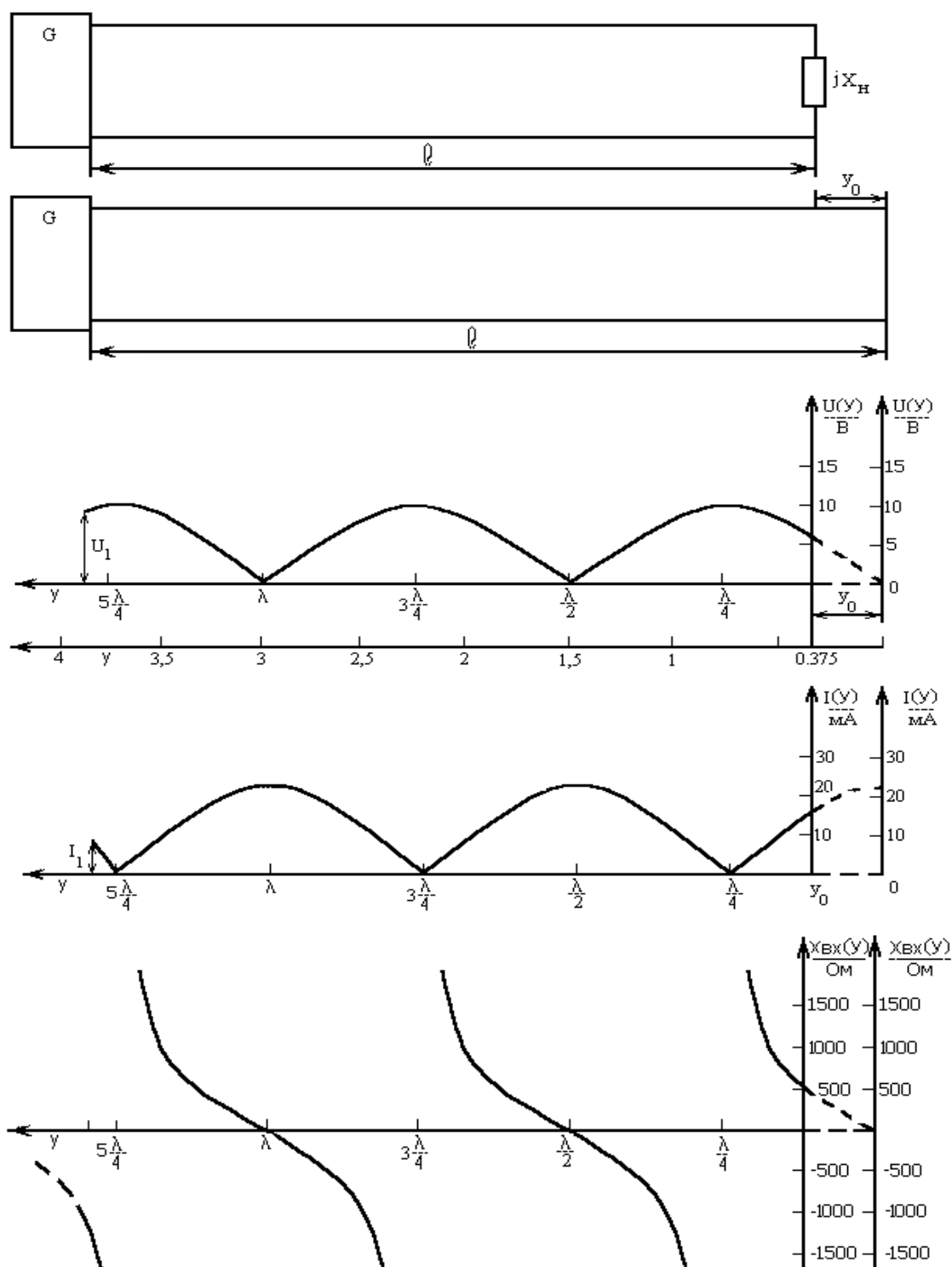


Рис. 5.30. Графики $U(y)$, $I(y)$, $X_{вх}(y)$ линии, нагруженной на сопротивление $Z_H = jX_H$.

13. Анализ длинных линий в режиме смешанных волн

Учебные вопросы:

1. Анализ длинных линий при $R_H > Z_B$.
2. Анализ длинных линий при $R_H < Z_B$.
3. Расчет входного сопротивления фидера.

задание курсантам для подготовки к занятию

1.Изучить:

1. Никулин В. И. Теория электрических цепей. – М.: РИОР, 2016, с. 211-218.
2. Бакалов В.П., Воробийенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 291-300.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей.- М.: Высшая школа, 1982.- с. 252-253.

2.Ответить на вопросы:

1. При каких условиях в длинной линии создается режим смешанных волн?
2. Запишите систему уравнений распределения комплексных тока и напряжения в длинной линии без потерь в режиме смешанных волн при отсчете расстояния от нагрузки.
3. Запишите систему уравнений распределения действующих тока и напряжения в длинной линии без потерь в режиме смешанных волн при отсчете расстояния от нагрузки.
4. Качественно изобразите графики распределения действующих тока и напряжения в длинной линии без потерь в режиме смешанных волн при отсчете расстояния от нагрузки, если $R_H > Z_B$.
5. Качественно изобразите графики распределения действующих тока и напряжения в длинной линии без потерь в режиме смешанных волн при отсчете расстояния от нагрузки, если $R_H < Z_B$.
6. Что такое коэффициент отражения?
7. Что такое коэффициент бегущей волны? Каким образом можно рассчитать коэффициент бегущей волны?
8. Что такое коэффициент стоячей волны? Каким образом можно рассчитать коэффициент стоячей волны?
9. Запишите выражение для расчета входного сопротивления длинной линии без потерь.

3. Проанализировать решение задач

№ 9.32 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1982. - с. 273-275)

В ходе практического занятия выполнить задания:

Задание № 1. Линия без потерь, параметры которой $L_{\text{п}}$, $C_{\text{п}}$ и длина ℓ , нагружена на активное сопротивление $R_{\text{н}} = n_1 Z_{\text{в}}$ (табл. 5.7). Напряжение на нагрузке U_2 , частота f . Определить напряжение и ток в начале линии и входное сопротивление линии. Рассчитать и начертить графики распределения вдоль длинной линии действующих напряжения U и тока I , активной $R_{\text{вх}}$ и реактивной $X_{\text{вх}}$ составляющих входного сопротивления нагруженной линии.

Задание № 2. Линия без потерь, параметры которой $L_{\text{п}}$, $C_{\text{п}}$ и длина ℓ , нагружена на активное сопротивление $R_{\text{н}} = n_2 Z_{\text{в}}$ (табл. 5.7). Напряжение на нагрузке U_2 , частота f . Определить напряжение и ток в начале линии и входное сопротивление линии. Рассчитать и начертить графики изменения действующих значений напряжения U и тока I , активной $R_{\text{вх}}$ и реактивной $X_{\text{вх}}$ составляющих входного сопротивления нагруженной линии.

Задание № 3. Клистронный СВЧ генератор подключен на входе длинной линии без потерь, параметры которой $L_{\text{п}}$, $C_{\text{п}}$ и длина ℓ , нагружена на активное сопротивление $R_{\text{н}} = n_1 Z_{\text{в}}$ (табл. 5.7). Напряжение на нагрузке U_2 , частота f . На расстоянии y_0 от нагрузки к линии подсоединен короткозамкнутый шлейф с тем же волновым сопротивлением и длиной $\ell_{\text{ш}} = \lambda/8$. Определить напряжение и ток в начале линии и входное сопротивление линии.

Таблица 5.7

№ варианта	L _п , мкГн/м	C _п , пФ/м	ℓ, м	U _{м2} , В	f, МГц	n ₁	n ₂	y _о , М
0	1,57	7,1	3.5	14	100	2	0.5	1.5
1	1,67	6,67	6	28	30	1.5	0.4	3
2	0,992	6,2	5	10	50	3	0.25	2
3	1,55	6,2	7	30	40	2.5	0.3	3.5
4	1,561	6,0	8	40	60	2.7	0.35	4
5	1,754	5,8	9	50	70	3	0.4	5
6	1,088	6,8	10	60	80	1.6	0.45	4
7	1,512	4,2	8	70	90	2.8	0.5	3
8	1,86	4,4	6	80	100	1.9	0.25	2
9	0,81	4,0	4	90	90	2.4	0.2	2.5
10	0,62	4,0	5	10	80	2	0.5	1.5
11	1,011	7,0	8	12	70	1.5	0.4	3
12	1,659	7,2	9	14	60	3	0.25	2
13	1,8	7,2	10	18	50	2.5	0.3	3.5
14	1,825	7,3	3	20	40	2.7	0.35	4
15	2,238	7,4	12	24	30	3	0.4	5
16	2,736	7,6	15	28	20	1.6	0.45	4
17	3,296	7,6	15	28	20	2.8	0.5	3
18	3,43	7,0	10	32	20	1.9	0.25	2
19	2,52	7,0	8	34	30	2.4	0.2	2.5
20	1,75	7,0	6	38	40	2	0.5	1.5
21	1,12	7,0	5	40	50	1.5	0.4	3
22	1,52	7,5	10	50	60	3	0.25	2
23	2,27	7,5	7	60	70	2.5	0.3	3.5
24	3,17	7,5	4	10	80	2.7	0.35	4
25	1,7	7,5	3	15	90	3	0.4	5
26	1,625	6,5	4	20	100	1.6	0.45	4
27	1,04	6,5	5	25	150	2.8	0.5	3
28	1,316	6,5	3	30	200	1.9	0.25	2
29	2,34	6,5	8	35	30	2.4	0.2	2.5
30	2,746	6,5	6	40	50	2	0.5	1.5
31	3,1	5,5	5	30	30	1.5	0.4	3
32	2,7	5,5	3	35	90	3	0.25	2
33	1,29	5,5	4	28	120	2.5	0.3	3.5
34	1,375	5,5	4	14	150	2.7	0.35	4
35	1,664	5,5	3	28	200	3	0.4	5
36	3,1	7,5	4	10	80	1.6	0.45	4
37	1,75	7,2	3	15	90	2.8	0.5	3
38	1,65	6,3	4	20	100	1.9	0.25	2
39	1,4	7,5	5	25	150	2.4	0.2	2.5
40	1,312	6,5	3	30	200	2	0.5	1.5
41	1,69	6,65	6.5	28	60	2.7	0.35	4
42	0,982	6,25	4.5	15	70	3	0.4	5
43	1,56	6,12	6	30	80	1.6	0.45	4
44	1,56	6,1	8	40	90	2.8	0.5	3
45	1,75	5,84	5	50	100	1.9	0.25	2
46	1,088	6,8	10	60	90	2.4	0.2	2.5

47	1,52	4,25	7	75	80	2	0.5	1.5
48	1,83	4,6	6	60	70	1.5	0.4	3
49	0,88	4,4	4	80	60	3	0.25	2
50	0,65	4,5	5.5	10	50	2.5	0.3	3.5

Пример выполнения заданий (вариант №0)

Задание № 1. Линия без потерь, параметры которой $L_{\Pi}=1.57$ мкГн/м, $C_{\Pi}=7.1$ пФ/м и длина $\ell = 3.5$ м, нагружена на активное сопротивление $R_{\Pi} = n_1 Z_{\Pi} = 2Z_{\Pi}$ (табл. 5.7). Напряжение на нагрузке $U_{m2} = 14.14$ В, частота $f = 100$ МГц. Определить напряжение и ток в начале линии и входное сопротивление линии. Рассчитать и начертить графики изменения действующих значений напряжения U и тока I , активной $R_{\text{вх}}$ и реактивной $X_{\text{вх}}$ составляющих входного сопротивления нагруженной линии.

Решение

$$1. \text{ Волновое сопротивление } \underline{Z}_{\Pi} = \sqrt{\frac{L_{\Pi}}{C_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{1.57 \cdot 10^{-6}}{7.1 \cdot 10^{-12}}} = 470 \text{ Ом}$$

$$2. \text{ Коэффициент фазы } \beta = \omega \sqrt{L_{\Pi} \cdot C_{\Pi}} = 2\pi \cdot 10^8 \sqrt{1.57 \cdot 10^{-6} \cdot 7.1 \cdot 10^{-12}} = 2.1 \text{ рад/м.}$$

$$3. \text{ Комплексное напряжение на нагрузке } \underline{U}_2 = \frac{U_{m2}}{\sqrt{2}} e^{j\psi} = \frac{14.14}{\sqrt{2}} e^{j0} = 10 \text{ В.}$$

$$4. \text{ Сопротивление нагрузки } R_{\Pi} = n_1 \underline{Z}_{\Pi} = 2 \cdot 470 = 940 \text{ Ом.}$$

$$5. \text{ Ток в нагрузке } \underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{R_{\Pi}} = \frac{10}{940} = 0.011 \text{ А} = 11 \text{ мА.}$$

6. Комплексные ток и напряжение в начале линии

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta \ell + j \underline{I}_2 \underline{Z}_{\Pi} \sin \beta \ell = 10 \cos (2.1 \cdot 3.5) + j 0.011 \cdot 470 \cdot \sin (2.1 \cdot 3.5) = 4.83 + j 4.38 = 6.62 e^{j43^\circ} \text{ В}$$

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 \cos \beta \ell + j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{\Pi}} \sin \beta \ell = 0.011 \cdot \cos (2.1 \cdot 3.5) + j \frac{10}{470} \sin (2.1 \cdot 3.5) = 0.005 + j 0.019 = 0.019 \cdot e^{j74^\circ} \text{ А}$$

$$7. \text{ Входное сопротивление линии } \underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} = 285 - j \cdot 181 \text{ Ом.}$$

8. Действующие значения напряжения и тока

$$U(y) = U_2 \sqrt{\cos^2 \beta y + m^2 \sin^2 \beta y} = 10 \sqrt{\cos^2 \beta y + 0.25 \cdot \sin^2 \beta y},$$

$$I(y) = \frac{I_2}{m} \sqrt{m^2 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = 0.022 \sqrt{0.25 \cdot \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y}.$$

$$\text{Здесь } m = \frac{Z_{\Pi}}{R_{\Pi}} = \frac{470}{940} = 0.5$$

9. Активная и реактивная составляющие входного сопротивления

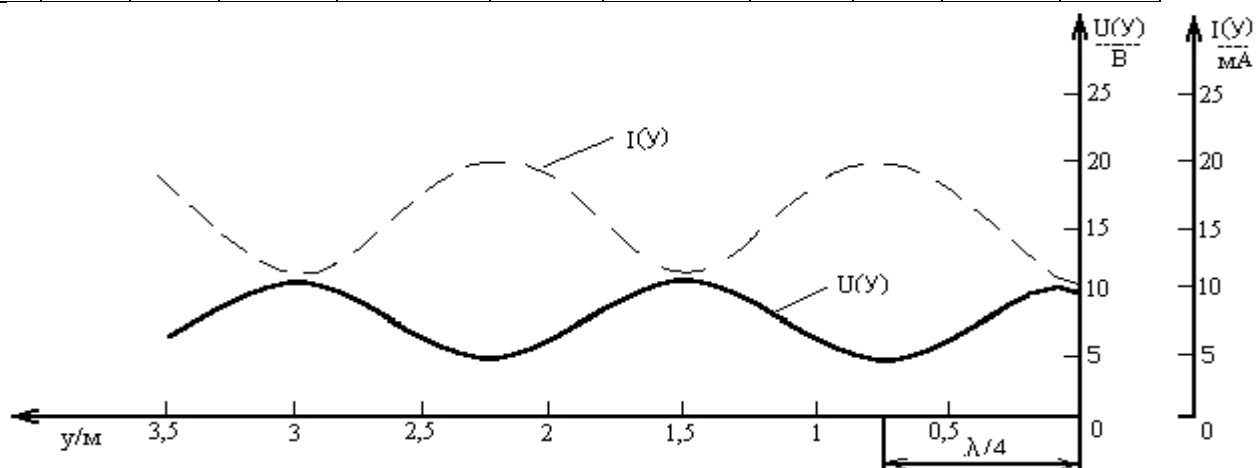
$$R_{\text{вх}}(y) = \frac{mZ_B}{m^2 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = \frac{0.5 \cdot 470}{0.5^2 \cdot \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = \frac{235}{0.25 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y}$$

$$X_{\text{вх}}(y) = \frac{0.5Z_B(m^2 - 1)\sin 2\beta y}{m^2 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = \frac{-176.25 \cdot \sin 2\beta y}{0.25 \cdot \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y}.$$

10. Расчеты, необходимые для построения графиков, представлены в таблице 5.8

Таблица 5.8

$y(\lambda)$	$y, \text{ м}$	βy	$\cos^2 \beta y$	$m^2 \cos^2 \beta y$	$\sin^2 \beta y$	$m^2 \sin^2 \beta y$	$U(y), \text{ В}$	$I(y), \text{ мА}$	$R_{\text{вх}}(y), \text{ Ом}$	$X_{\text{вх}}(y), \text{ Ом}$
0	0	0	1	0,25	0	0	10	11	940	0
$\frac{1}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.15	$0,1\pi$	0.905	0.226	0.095	0.024	9.635	12	731	-322
$\frac{2}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.3	$0,2\pi$	0.655	0.164	0.345	0.086	8.607	15	462	-329
$\frac{3}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.45	$0,3\pi$	0.345	0.086	0.655	0.164	7.135	18	317	-226
$\frac{4}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.6	$0,4\pi$	0.095	0.024	0.905	0.226	5.671	21	253	-112
$\frac{\lambda}{4}$	0.75	$0,5\pi$	0	0	1	0.25	5	21	235	0



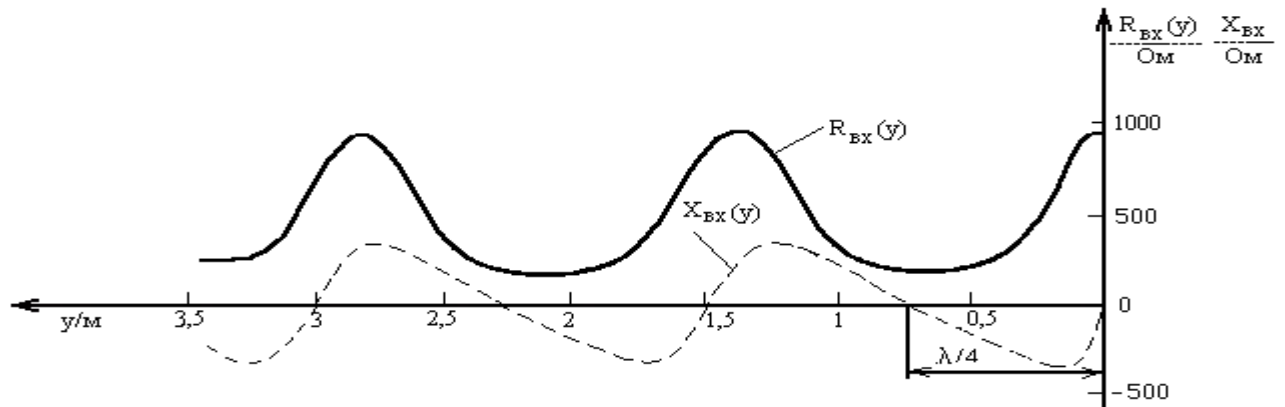


Рис. 5.31. Графики $U(y)$, $I(y)$, $R_{BX}(y)$, $X_{BX}(y)$ в режиме смешанных волн при $Z_H > Z_B$.

12. Коэффициент бегущей волны $k_{бв} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{U(\lambda/4)}{U(0)} = \frac{5}{10} = 0.5$

13. Коэффициент стоячей волны $k_{св} = \frac{U_{\max}}{U_{\min}} = \frac{10}{2} = 2$

Задание № 2. Линия без потерь, параметры которой $L_{\Pi}=1.57$ мкГн/м, $C_{\Pi}=7.1$ пФ/м и длина $\ell = 3.5$ м, нагружена на активное сопротивление $R_H = n_2 Z_B = 0.5 Z_B$ (табл. 5.7). Напряжение на нагрузке $U_{m2} = 14.14$ В, частота $f = 100$ МГц. Определить напряжение и ток в начале линии и входное сопротивление линии. Рассчитать и начертить графики изменения действующих значений напряжения U и тока I , активной R_{BX} и реактивной X_{BX} составляющих входного сопротивления нагруженной линии

Решение

1. Волновое сопротивление $Z_B = \sqrt{\frac{L_{\Pi}}{C_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{1.57 \cdot 10^{-6}}{7.1 \cdot 10^{-12}}} = 470$ Ом.

2. Коэффициент фазы $\beta = \omega \sqrt{L_{\Pi} C_{\Pi}} = 2\pi \cdot 10^8 \cdot \sqrt{1.57 \cdot 10^{-6} \cdot 7.1 \cdot 10^{-12}} = 2.1$ рад/м.

3. Сопротивление нагрузки $R_H = n_2 Z_B = 0.5 \cdot 470 = 235$ Ом.

4. Ток в нагрузке $I_2 = \frac{U_2}{R_H} = \frac{U_{m2} e^{j\psi_2}}{\sqrt{2} \cdot R_H} = \frac{14.14 \cdot e^{j^0}}{\sqrt{2} \cdot R_H} = \frac{14.14 \cdot e^{j^0}}{\sqrt{2} \cdot 0.5 \cdot 470} = 0.042$ А = 42 мА.

5. Комплексные напряжение и ток в начале линии

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 \cos \beta \ell + j I_2 Z_B \sin \beta \ell = 10 \cos (2.1 \cdot 3.5) + j 0.042 \cdot 470 \sin (2.1 \cdot 3.5) = 4.83 + j 17.5 = 18.2 e^{j 75^0} \text{ В.}$$

$$\underline{I}_1 = I_2 \cos \beta \ell + j \frac{U_2}{Z_B} \sin \beta \ell = 0.042 \cos (2.1 \cdot 3.5) + j \frac{10}{470} \sin (2.1 \cdot 3.5) = 0.021 + j 0.019 = 0.028 e^{j 42^0} \text{ А.}$$

6. Входное сопротивление линии $Z_{BX} = Z_B \frac{Z_H \cos \beta \ell + j Z_B \sin \beta \ell}{Z_B \cos \beta \ell + j Z_H \sin \beta \ell} = 553 + j 351$ Ом.

7. Действующие значения напряжения и тока

$$U(y) = U_2 \sqrt{\cos^2 \beta y + m^2 \sin^2 \beta y} = 10 \sqrt{\cos^2 2.1 \cdot y + 4 \cdot \sin^2 2.1 \cdot y},$$

$$I(y) = \frac{I_2}{m} \sqrt{m^2 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = \frac{0.042}{2} \sqrt{4 \cdot \cos^2 2.1 \cdot y + \sin^2 2.1 \cdot y} = 0.02 \sqrt{4 \cdot \cos^2 2.1 \cdot y + \sin^2 2.1 \cdot y}$$

$$\text{Здесь } m = \frac{Z_B}{R_H} = \frac{470}{0.5 \cdot 470} = 2.$$

8. Активная и реактивная составляющие входного сопротивления

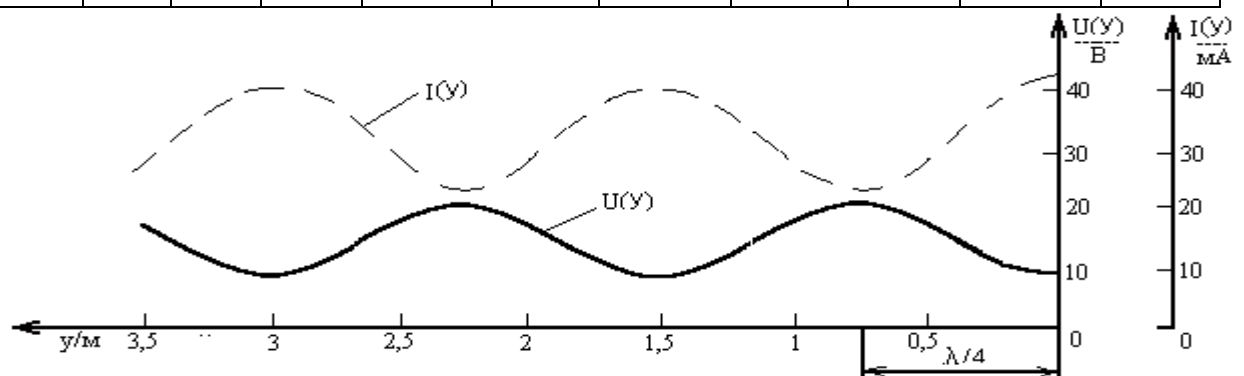
$$R_{\text{вх}}(y) = \frac{m \cdot Z_B}{m^2 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = \frac{940}{4 \cdot \cos^2 2.1 \cdot y + \sin^2 2.1 \cdot y},$$

$$X_{\text{вх}}(y) = \frac{0.5 Z_B (m^2 - 1) \sin 2\beta y}{m^2 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = \frac{705 \cdot \sin 2\beta y}{4 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y}.$$

9. Результаты расчетов, необходимые для построения графиков, представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9

$y(\lambda)$	$y, \text{ м}$	βy	$\cos^2 \beta y$	$m^2 \cos^2 \beta y$	$\sin^2 \beta y$	$m^2 \sin^2 \beta y$	$U(y), \text{ В}$	$I(y), \text{ мА}$	$R_{\text{вх}}(y), \text{ Ом}$	$X_{\text{вх}}(y), \text{ Ом}$
0	0	0	1	4	0	0	10	43	235	0
$\frac{1}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.15	$0,1\pi$	0.905	3.618	0.095	1.382	11.342	41	253	116
$\frac{2}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.3	$0,2\pi$	0.655	2.618	0.345	1.382	14.271	37	317	226
$\frac{3}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.45	$0,3\pi$	0.345	1.382	0.655	2.618	17.215	30	461	329
$\frac{4}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.6	$0,4\pi$	0.095	0.382	0.905	3.618	19.271	24	730	322
$\frac{\lambda}{4}$	0.75	$0,5\pi$	0	0	1	4	20	21	940	0



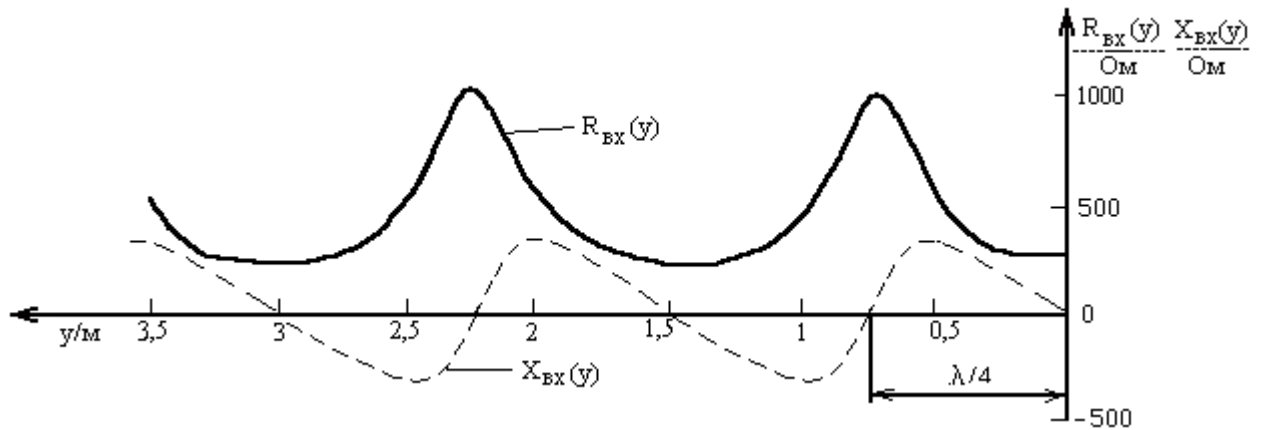


Рис5.32. Графики $U(y)$, $I(y)$, $R_{BX}(y)$, $X_{BX}(y)$ в режиме смешанных волн при $Z_H < Z_B$.

11. Коэффициент бегущей волны $\kappa_{бв} = \frac{U_{\min}}{U_{\max}} = \frac{U_2}{U(\lambda/4)} = \frac{10}{20} = 0.5$.

12. Коэффициент стоячей волны $\kappa_{св} = \frac{1}{\kappa_{бв}} = 2$.

Задание № 3. Клистронный СВЧ генератор подключен на входе длинной линия без потерь, параметры которой $L_n=1.57$ мкГн/м, $C_n=7.1$ пФ/м и длина $\ell = 3.5$ м, линия нагружена на активное сопротивление $R_n = n_1 Z_B$ (табл. 5.7). Напряжение на нагрузке $U_{m2} = 14.14$ В, частота $f = 100$ МГц. На расстоянии $y_0=1.5$ м от нагрузки к линии подсоединен короткозамкнутый шлейф с волновым сопротивлением Z_B и длиной $\ell_{ш}=\lambda/8$. Определить напряжение и ток в начале линии.

Решение

1. Сопротивление участка линии в месте подключения шлейфа $Z_{BX}(y_0 = 1.5\text{ м})$ (рис.5.33)

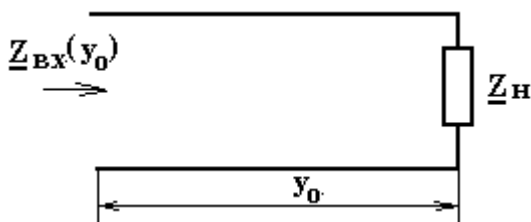


Рис.5.33



Рис.5.34

$$Z_{BX}(y_0) = Z_B \frac{Z_H \cos \beta y_0 + Z_B \sin \beta y_0}{Z_B \cos \beta y_0 + j Z_H \sin \beta y_0} = 470 \frac{940 \cdot \cos(2.1 \cdot 1.5) + j \cdot 470 \cdot \sin(2.1 \cdot 1.5)}{40 \cdot \cos(2.1 \cdot 1.5) + j \cdot 940 \sin(2.1 \cdot 1.5)} = 939.8 - j11.85 \text{ Ом.}$$

Здесь $Z_B = 470$ Ом, $\beta = 2.1$ рад/м получены на основании расчетов в задании № 1.

2. Сопротивление короткозамкнутого шлейфа длиной $\ell_{ш}$ (рис.5.14)

$$Z_{ш} = j \cdot Z_B \operatorname{tg}(\beta \cdot \frac{\lambda}{8}) = j \cdot Z_B \cdot \operatorname{tg}(\frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\lambda}{8}) = j \cdot Z_B \operatorname{tg} \frac{\pi}{4} = j 470 \text{ Ом.}$$

3. Эквивалентное сопротивление участка линии и шлейфа в месте их подключения ($y_o = 1.5\text{м}$)

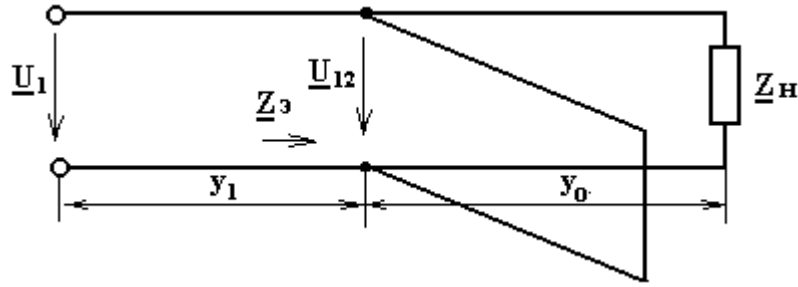


Рис.5.35

$$\underline{Z}_{\text{э}} = \frac{\underline{Z}_{\text{вх}}(y_o) \cdot \underline{Z}_{\text{ш}}}{\underline{Z}_{\text{вх}}(y_o) + \underline{Z}_{\text{ш}}} = \frac{(939.8 - j11.85) \cdot j470}{939.8 - j11.85 + j470} = 190 + j377 \text{ Ом.}$$

4. Напряжение на сопротивлении $\underline{Z}_{\text{э}}$ (рис.5.35)

$$\begin{aligned} \underline{U}_{21} &= \underline{U}_2 \cos \beta y_o + j I_2 \underline{Z}_B \sin \beta y_o = \underline{U}_2 \cos \beta y_o + j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_H} \underline{Z}_B \sin \beta y_o = \underline{U}_2 \cos \beta y_o + j \frac{\underline{U}_2}{2 \underline{Z}_B} \underline{Z}_B \sin \beta y_o = \\ &= 10 \cos (2.1 \cdot 1.5) + j \frac{10}{2} \sin (2.1 \cdot 1.5) = -9.998 - j 0.042 = 10 e^{-j180^\circ} \text{ В} \end{aligned}$$

5. Ток I_{21} в эквивалентном сопротивлении $\underline{Z}_{\text{э}}$

$$I_{21} = \frac{\underline{U}_{21}}{\underline{Z}_{\text{э}}} = \frac{10 e^{-j180^\circ}}{190 + j377} = -0.011 + j 0.021 = 0.024 e^{j117^\circ} \text{ мА.}$$

6. Входное сопротивление линии (сопротивление в начале линии)
($y_1 = \ell - y_o = 3.5 - 1.5 = 2\text{м}$)

$$\underline{Z}_{\text{вх}}(y_1) = \underline{Z}_B \frac{\underline{Z}_{\text{э}} \cos \beta y_1 + j \underline{Z}_B \sin \beta y_1}{\underline{Z}_B \cos \beta y_1 + j \underline{Z}_{\text{э}} \sin \beta y_1} = 470 \frac{(190 + j377) \cdot \cos (2.1 \cdot 2) + j 470 \sin (2.1 \cdot 2)}{470 \cos (2.1 \cdot 2) + j (190 + j377)} = 1131 - j 937 \text{ Ом.}$$

7. Напряжение в начале линии

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_{21} \cos \beta_1 y_1 + j I_{21} \underline{Z}_B \sin \beta y_1 = 13.543 + j 4.414 = 14.24 e^{j18^\circ} \text{ В.}$$

8. Ток в начале линии

$$I_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_{\text{вх}}(y_1)} = \frac{14.24 e^{j18^\circ}}{1131 - j 937} = 5.18 \cdot 10^{-3} + j 8.199 \cdot 10^{-3} \text{ А} = 9.7 e^{j57.7^\circ} \text{ мА.}$$

14. Расчет согласующих устройств в длинных линиях

Учебные вопросы:

1. Расчет согласующего отрезка длинной линии.
2. Расчет согласующего четвертьволнового трансформатора.

задание курсантам для подготовки к занятию

1.Изучить:

1. Никулин В. И. Теория электрических цепей. – М.: РИОР, 2016, с. 218-222.
2. Бакалов В.П., Воробийченко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 300-303.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с. 253.

2.Ответить на вопросы:

1. При каких условиях в длинной линии создается режим бегущих волн?
2. При каких условиях в длинной линии создается режим смешанных волн?
3. Запишите систему уравнений распределения комплексных тока и напряжения в длинной линии без потерь в режиме смешанных волн при отсчете расстояния от нагрузки.
4. Запишите выражение для расчета входного сопротивления длинной линии без потерь.
5. Назовите способы согласования длинной линии с нагрузкой.
6. Пояните алгоритм расчета согласующего четвертьволнового трансформатора.
7. Пояните алгоритм расчета шлейфа Татаринова.
8. Качественно изобразите график распределения входного сопротивления длинной линии без потерь в режиме короткого замыкания

3.Проанализировать решение задач

№ 9.37, № 9.38 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1982. - с. 278-282)

В ходе практического занятия выполнить задания:

Задание 1. Линию без потерь с параметрами L_{π} , C_{π} (табл. 5.7) требуется согласовать с активной нагрузкой $R_n = n_1 Z_v$ с помощью короткозамкнутого шлейфа. Определить

минимальную длину шлейфа $\ell_{ш}$ и место его включения. Рассчитать и построить графики распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии. Заданы напряжение на сопротивлении нагрузки U_2 и частота f (табл.5.7).

Задание 2. Линию без потерь с параметрами $L_{п}$, $C_{п}$ (табл. 5.7) требуется согласовать с активной нагрузкой $R_{н} = n_2 Z_{в}$ с помощью короткозамкнутого или разомкнутого шлейфа. Определить минимальную длину шлейфа $\ell_{ш}$ и место его включения. Рассчитать и построить графики распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии. Заданы напряжение на сопротивлении нагрузки U_2 и частота f (табл.5.7).

Задание 3. Двухпроводная линия выполнена из медного провода диаметром d (табл. 5.10). Расстояние между проводами a . Требуется согласовать линию с активной нагрузкой $R_{н} = n_1 \cdot Z_{в}$ с помощью четвертьволнового трансформатора (четвертьволновой вставки). Рассчитать и построить графики распределения $U(y)$, $I(y)$. Заданы напряжение на сопротивлении нагрузки U_2 и частота f (табл.5.7).

Задание 4. Двухпроводная линия выполнена из медного провода диаметром d (табл. 5.10). Расстояние между проводами a . Требуется согласовать линию с активной нагрузкой $R_{н} = n_2 \cdot Z_{в}$ с помощью четвертьволнового трансформатора (четвертьволновой вставки). Рассчитать и построить графики распределения $U(y)$, $I(y)$. Заданы напряжение на сопротивлении нагрузки U_2 и частота f (табл.5.7).

Таблица 5.10

вариант №	а _л , см	d, мм	ℓ , м	U _{m2} , В	f ₁ , МГц	n ₁	n ₂
0	20	4	3.5	14.14	100	2	0.5
1	15	3	6	28.28	30	1.5	0.4
2	24	4	5	10	50	3	0.25
3	16	4	7	30	40	2.5	0.3
4	25	5	8	40	60	2.7	0.35
5	18	3	9	50	70	3	0.4
6	28	4	10	60	80	1.6	0.45
7	21	3	8	70	90	2.8	0.5
8	14	2	6	80	100	1.9	0.25
9	12	3	4	90	90	2.4	0.2
10	22	2	5	10	80	2	0.5
11	20	4	8	12	70	1.5	0.4
12	15	3	9	14	60	3	0.25
13	24	4	10	18	50	2.5	0.3
14	16	4	3	20	40	2.7	0.35
15	25	5	12	24	30	3	0.4
16	18	3	15	28	20	1.6	0.45
17	28	4	15	28	20	2.8	0.5
18	21	3	10	32	20	1.9	0.25
19	14	2	8	34	30	2.4	0.2
20	12	3	6	38	40	2	0.5
21	22	2	5	40	50	1.5	0.4
22	20	4	10	50	60	3	0.25
23	15	3	7	60	70	2.5	0.3
24	24	4	4	10	80	2.7	0.35
25	16	4	3	15	90	3	0.4
26	25	5	4	20	100	1.6	0.45
27	18	3	5	25	150	2.8	0.5
28	28	4	3	30	200	1.9	0.25
29	21	3	8	35	30	2.4	0.2
30	14	2	6	40	50	2	0.5
31	12	3	5	30	30	1.5	0.4
32	22	2	3	35	90	3	0.25
33	20	4	4	28	120	2.5	0.3
34	15	3	4	14	150	2.7	0.35
35	24	4	3	28	200	3	0.4
36	16	4	4	10	80	1.6	0.45
37	25	5	3	15	90	2.8	0.5
38	18	3	4	20	100	1.9	0.25
39	28	4	5	25	150	2.4	0.2
40	21	3	3	30	200	2	0.5
41	17	3	6	26	30	1.5	0.35
42	26	4	5	12	50	3	0.26
43	18	4	7	35	40	2.5	0.32
44	27	5	8	42	60	2.7	0.33
45	19	3	9	52	70	3	0.42
46	26	4	10	66	80	1.6	0.47

47	23	3	8	74	90	2.8	0.58
48	16	2	6	88	100	1.9	0.29
49	14	3	4	92	90	2.4	0.23
50	24	2	5	20	80	2	0.52

Пример выполнения заданий (вариант №0)

Задание №1. Линию без потерь, параметры которой $L_{\Pi}=1.57$ мкГн/м, $C_{\Pi}=7.1$ пФ/м и длина $\ell = 3.5$ м (табл. 5.7), требуется согласовать с чисто активной нагрузкой $R_H = n_1 Z_B = 2Z_B$ с помощью короткозамкнутого шлейфа. Напряжение на нагрузке задано $U_{m2} = 14.14$ В, частота $f = 100$ МГц (табл.5.7). Определить минимальную длину шлейфа $\ell_{ш}$ и место его включения. Рассчитать и построить графики распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии.

Решение

1. Волновое сопротивление линии $Z_B = \sqrt{\frac{L_{\Pi}}{C_{\Pi}}} = \sqrt{\frac{1.57 \cdot 10^{-6}}{7.1 \cdot 10^{-12}}} = 470$ Ом.

2. Коэффициент фазы $\beta = \omega \sqrt{L_{\Pi} C_{\Pi}} = 2\pi \cdot 10^8 \sqrt{1.57 \cdot 10^{-6} \cdot 7.1 \cdot 10^{-12}} = 2.1$ рад/м.

3. Сопротивление нагрузки $R_H = n_1 Z_B = 2 \cdot 470 = 940$ Ом.

4. Длина участка линии y_0 , определяющая место присоединения шлейфа (рис. 5.36), определяется выражением [3]

$$y_0 = \frac{1}{\beta} \arctg \sqrt{\frac{R_H}{Z_B}} = \frac{1}{2.1} \arctg \sqrt{\frac{940}{470}} = \frac{1}{2.1} \arctg \sqrt{2} = 0.456 \text{ м.}$$

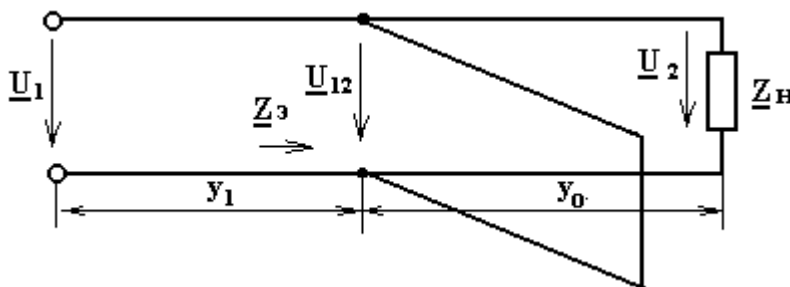


Рис.5.36

5. Минимальная длина шлейфа с волновым сопротивлением Z_B определяется выражением [3]

$$\ell_{ш} = \frac{1}{\beta} \arctg \frac{\sqrt{R_H \cdot Z_B}}{R_H - Z_B} = \frac{1}{2.1} \arctg \frac{\sqrt{940 \cdot 470}}{940 - 470} = \frac{1}{2.1} \arctg \sqrt{2} = 0.456 \text{ м.}$$

6. Комплексное напряжение на нагрузке $\underline{U}_2 = \frac{U_{m2}}{\sqrt{2}} e^{j\psi} = \frac{14.14}{\sqrt{2}} e^{j0} = 10$ В.

7. Комплексный ток в нагрузке $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{R_H} = \frac{10}{940} = 0.011$ А.

8. Коэффициент $m = \frac{Z_B}{R_H} = \frac{470}{940} = 0.5$

9. Действующие ток и напряжение на участке «нагрузка - место присоединения шлейфа»

$$\underline{U}(y) = U_2 \sqrt{\cos^2 \beta y + m^2 \sin^2 \beta y} = 10 \sqrt{\cos^2 2.1y + 0.25 \sin^2 2.1y}$$

$$I(y) = \frac{I_2}{m} \sqrt{m^2 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = 0,022 \sqrt{0.025 \cos^2 2.1y + \sin^2 2.1y}$$

10. Действующее напряжение в месте подключения шлейфа

$$U(y_0) = U_{12} = U_2 \sqrt{\cos^2 \beta y_0 + m^2 \sin^2 \beta y_0} = 10 \sqrt{\cos^2 2.1 \cdot 0.456 + 0.25 \cdot \sin^2 2.1 \cdot 0.456} = 7.07 \text{ В}$$

11. Эквивалентное сопротивление $\underline{Z}_3$ линии и шлейфа в месте подключения шлейфа

$$\underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_{ш} \cdot \underline{Z}(y_0)}{\underline{Z}_{ш} + \underline{Z}(y_0)} = \frac{j665(313 - j222)}{j665 + 313 - j222} = 470 \quad \text{Ом},$$

$$\text{где } \underline{Z}_{ш} = jZ_B \operatorname{tg} \beta \ell_m = j470 \cdot \operatorname{tg} 2.1 \cdot 0.456 = j665 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}(y_0) = \underline{Z}_B \frac{R_H \cos \beta y_0 + jZ_B \sin \beta y_0}{Z_B \cos \beta y_0 + jR_H \sin \beta y_0} = 313 - j222 \quad \text{Ом}.$$

12. Действующий ток в эквивалентном сопротивлении $\underline{Z}_3$

$$I_{21} =$$

$$\frac{U(y_0)}{Z_3} = \frac{7.07}{470} = 0.015 \quad \text{А}.$$

13. На участке от места подключения шлейфа до начала линии $U(y) = U_{12}$ и $I(y) = I_{21}$

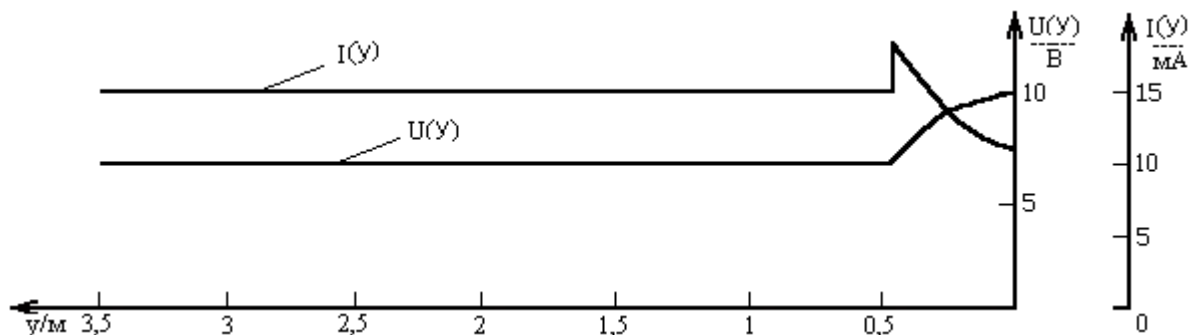


Рис .5.37. Графики распределения $U(y)$ и $I(y)$ вдоль линии, согласованной с нагрузкой ($\underline{Z}_H > \underline{Z}_B$) при помощи короткозамкнутого шлейфа

Графики $U(y)$ и $I(y)$ на участке y_0 (от нагрузки до места подключения шлейфа) построены по результатам расчетов, представленных в таблице 5.8. На участке от места подключения шлейфа до начала линии графики $U(y)$ и $I(y)$ - прямые параллельные оси y . На этом участке нагрузка и линия согласованы, в линии устанавливается режим бегущих волн.

Задание №2. Линию без потерь, параметры которой $L_{\pi}=1.57$ мкГн/м, $C_{\pi}=7.1$ пФ/м и длина $\ell = 3.5$ м (табл. 5.7) требуется согласовать с чисто активной нагрузкой $R_H = n_2 Z_B$ с

помощью короткозамкнутого или разомкнутого шлейфа. Напряжение на нагрузке задано $U_{m2} = 14.14$ В, частота $f = 100$ МГц (табл.5.7). Определить минимальную длину шлейфа $\ell_{ш}$ и место его включения. Рассчитать и построить графики распределения действующих значений напряжения и тока вдоль линии.

Решение

1. Волновое сопротивление линии $Z_B = \sqrt{\frac{L_{II}}{C_{II}}} = \sqrt{\frac{1.57 \cdot 10^{-7}}{7.1 \cdot 10^{-12}}} = 470$ Ом..

2. Коэффициент фазы $\beta = \omega \sqrt{L_{II} C_{II}} = 2.1 \frac{\text{рад}}{\text{м}}$.

3. Сопротивление нагрузки $R_H = n_2 Z_B = 0.5 \cdot 470 = 235$ Ом.

4. Коэффициент $m = \frac{Z_B}{R_H} = 2$

5. Величина сопротивление шлейфа, необходимая для компенсации реактивной составляющей входного сопротивления нагруженной линии $X_{вх}(y_0)$ в месте подключения шлейфа, определяется выражением [3] $X_{ш} = Z_B \cdot \frac{\sqrt{m}}{1-m} = -664.68$ Ом

6. Минимальная длина разомкнутого шлейфа $\ell_{ш} =$

$$\frac{1}{\beta} \arctg \frac{Z_B}{|X_{ш}|} = \frac{1}{2.1} \arctg \frac{470}{664.68} = 0.294 \text{ м}$$

7. Минимальная длина короткозамкнутого шлейфа

$$\ell_{шкз} = \frac{\lambda}{4} + \ell_{ш} = \frac{c}{f \cdot 4} + \ell_{ш} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^8 \cdot 4} + 0.294 = 1.044 \text{ м.}$$

Здесь $c = 3 \cdot 10^8$ м/с - скорость света.

8. Длина участка линии, определяющая место присоединения шлейфа

$$y_0 = \frac{1}{\beta} \arctg \sqrt{\frac{R_H}{Z_B}} = \frac{1}{2.1} \arctg \sqrt{\frac{235}{470}} = 0.294 \text{ м.}$$

9. Комплексное напряжение на нагрузке $\underline{U}_2 = \frac{U_{m2}}{\sqrt{2}} e^{j\phi} = 10$ В.

10. Комплексный ток в нагрузке $\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{R_H} = \frac{10}{235} = 0.043$ А.

11. Действующие напряжение и ток вдоль участка «нагрузка - место присоединения шлейфа»

$$U(y) = U_2 \sqrt{\cos^2 \beta y + m^2 \sin^2 \beta y} = 10 \sqrt{\cos^2 2.1y + 4 \sin^2 2.1y}$$

$$I(y) = \frac{I_2}{m} \sqrt{m^2 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = 0.011 \sqrt{4 \cos^2 2.1y + \sin^2 2.1y}$$

12. Действующее напряжение в месте подключения шлейфа

$$U(y_0) = 10 \sqrt{\cos^2 2.1 \cdot 0.294 + 4 \sin^2 2.1 \cdot 0.294} = 14.14 \text{ В.}$$

13. Эквивалентное сопротивление $\underline{Z}_3$ линии и шлейфа в месте их подключения

$$\underline{Z}_3 = \frac{\underline{Z}_{ш} \cdot \underline{Z}(y_0)}{\underline{Z}_{ш} + \underline{Z}(y_0)} = \frac{-j665(313 + j222)}{-j665 + 313 + j222} = 470 \text{ Ом,}$$

$$\text{где } \underline{Z}_{ш} = -jZ_B \operatorname{ctg} \beta \ell_{ш} = j470 \cdot \operatorname{ctg} 2.1 \cdot 0.294 = -j665 \text{ Ом,}$$

$$\underline{Z}(y_0) = \underline{Z}_B \frac{R_H \cos \beta y_0 + jZ_B \sin \beta y_0}{Z_B \cos \beta y_0 + jR_H \sin \beta y_0} = 313 + j222 \text{ Ом.}$$

14. Действующий ток в эквивалентном сопротивлении $\underline{Z}_3$, $I(y_0) = \frac{U(y_0)}{|\underline{Z}_3|} = \frac{14.14}{470} = 0.03$

А.

15. На участке от места подключения шлейфа до начала линии $U(y) = U(y_0)$ и $I(y) = I(y_0)$

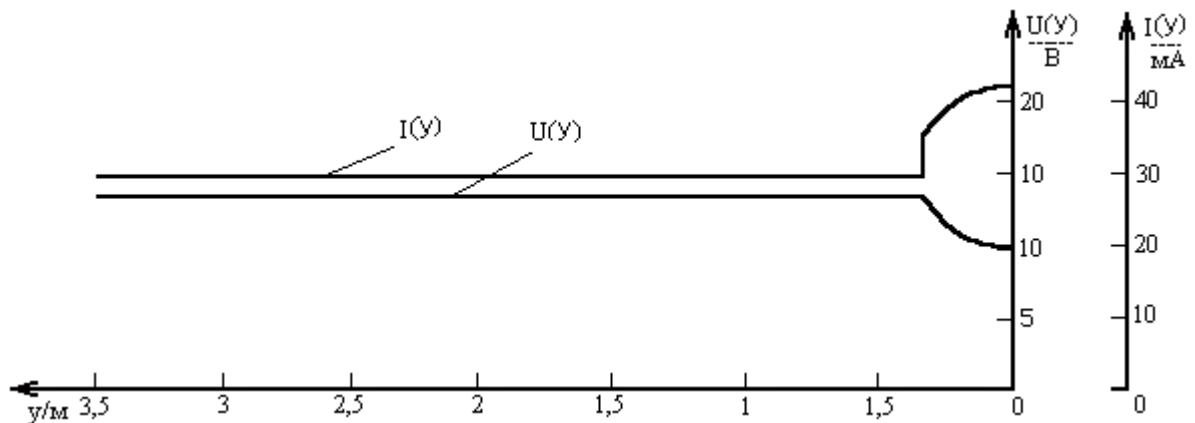


Рис.5.38. Графики распределения $U(y)$ и $I(y)$ вдоль линии, согласованной с нагрузкой

($\underline{Z}_H < \underline{Z}_B$) при помощи разомкнутого шлейфа

Графики $U(y)$ и $I(y)$ на участке от нагрузки до места подключения разомкнутого шлейфа построены с учетом расчетов, представленных в таблице 5.9. На участке от места подключения шлейфа до начала линии графики $U(y)$ и $I(y)$ — прямые, параллельные оси y . На этом участке нагрузка и линия согласованы.

Задание №3. Двухпроводная линия выполнена из медного провода диаметром $d = 4$ мм (табл. 5.10). Расстояние между проводами $a_L = 20$ см. Требуется согласовать линию с активной нагрузкой $R_H = n_1 \cdot Z_B = 2Z_B$ с помощью четвертьволнового трансформатора

(вставки). Напряжение на нагрузке задано $U_{m2} = 14.14$ В, частота $f = 100$ МГц (табл.5.10).
Рассчитать и построить графики распределения $U(y)$, $I(y)$.

Решение

1. Волновое сопротивление двухпроводной линии без потерь [1]

$$Z_B = 120 \ln \frac{2a_{\text{л}}}{d} = 120 \ln \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^{-3}} = 553 \text{ Ом.}$$

2. Сопротивление нагрузки $Z_H = R_H = n_1 \cdot Z_B = 2 \cdot 553 = 1105 \text{ Ом.}$

3. Для согласования линии с нагрузкой при помощи четвертьволновой вставки необходимо обеспечить [1] $Z_{\text{вТ}} = \sqrt{Z_B \cdot R_H} = \sqrt{553 \cdot 2 \cdot 553} = 782 \text{ Ом.}$

4. При заданном диаметре провода $d = 4 \cdot 10^{-3}$ мм расстояние между проводами трансформатора

$$a_T = \frac{d}{2} e^{\frac{Z_{\text{вТ}}}{120}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2} e^{\frac{782}{120}} = 1.347 \text{ м (рис.5.39)}$$

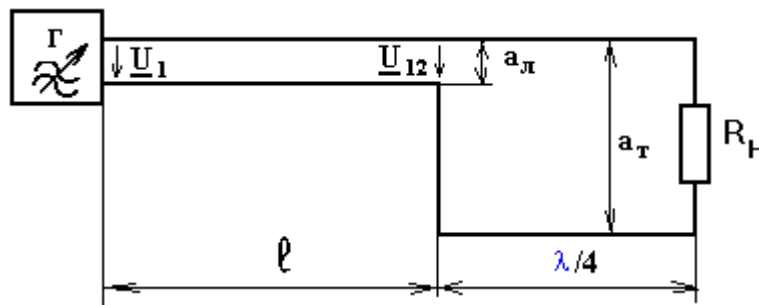


Рис. 5.39

5. Длина волны [3] $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^8} = 3 \text{ м}$ и коэффициент фазы $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = 2.1 \text{ рад/м.}$

6. Напряжение и ток в нагрузке $\underline{U}_2 = \frac{U_{m2}}{\sqrt{2}} e^{j\psi} = \frac{14.14}{\sqrt{2}} e^{j^0} = 10 \text{ В}$,

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{Z_H} = \frac{10}{1105} = 9 \text{ А.}$$

7. Напряжение и ток на входе трансформатора

$$\underline{U}_{21} = \underline{U}_2 \cos\left(\beta \cdot \frac{\lambda}{4}\right) + j \underline{I}_2 Z_{\text{вТ}} \sin\left(\beta \cdot \frac{\lambda}{4}\right) = \underline{U}_2 \cos \frac{\pi}{2} + j \underline{I}_2 \cdot Z_{\text{вТ}} \sin \frac{\pi}{2} = j \cdot 7.07 \text{ В,}$$

$$\underline{I}_{21} = \underline{I}_2 \cos\left(\beta \cdot \frac{\lambda}{4}\right) + j \frac{\underline{U}_2}{Z_{\text{вТ}}} \sin\left(\beta \cdot \frac{\lambda}{4}\right) = \underline{I}_2 \cos \frac{\pi}{2} + j \frac{\underline{U}_2}{Z_{\text{вТ}}} \sin \frac{\pi}{2} = j \cdot 0.013 \text{ А.}$$

8. Действующие напряжение и ток в линии на участке «вход трансформатора – начало линии»

$$U(y) = |U_{21}| = 7.07 \text{ В}, \quad I(y) = |I_{21}| = 0.013 \text{ мА}.$$

9. Действующие напряжение и ток вдоль четвертьволнового трансформатора

$$U(y) = U_2 \sqrt{\cos^2 \beta y + m^2 \sin^2 \beta y} = 10 \sqrt{\cos^2 2.1 y + 0.5 \sin^2 2.1 y},$$

$$I(y) = \frac{I_2}{m} \sqrt{m^2 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = \sqrt{0.5 \cos^2 2.1 y + \sin^2 2.1 y}. \quad \text{Здесь}$$

$$m = \frac{Z_{\text{ВТ}}}{R_{\text{н}}} = \frac{782}{1105} = 0.707.$$

10. Результаты расчетов $U(y)$ и $I(y)$ представлены в таблице 5.11.

Таблица 5.11

$y(\lambda)$	$y, \text{ м}$	βy	$\cos^2 \beta y$	$m^2 \cos^2 \beta y$	$\sin^2 \beta y$	$m^2 \sin^2 \beta y$	$U(y), \text{ В}$	$I(y), \text{ мА}$
0	0	0	1	0.5	0	0	10	9
$\frac{1}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.15	0.1π	0.905	0.452	0.095	0.048	9.8	9.5
$\frac{2}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.3	0.2π	0.655	0.327	0.345	0.173	9.1	10.5
$\frac{3}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.45	0.3π	0.345	0.173	0.655	0.327	8.2	11.6
$\frac{4}{5} \cdot \frac{\lambda}{4}$	0.6	0.4π	0.095	0.048	0.905	0.452	7.4	12.5
$\lambda / 4$	0.75	0.5π	0	0	1	0.5	7.07	13

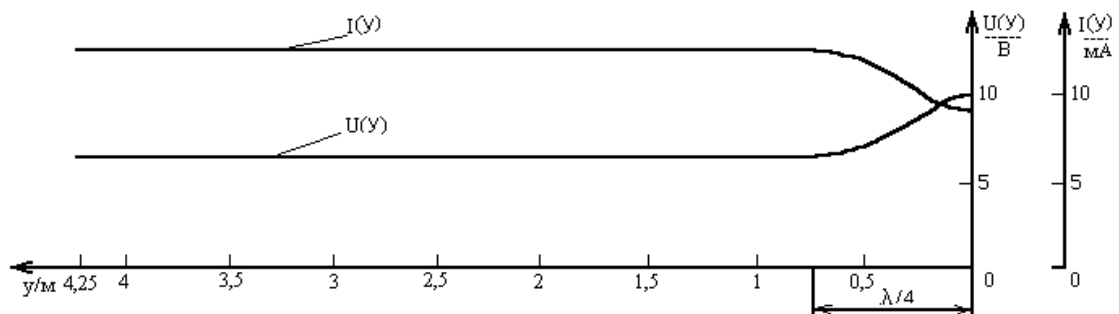


Рис.5.40. Графики распределения $U(y)$ и $I(y)$ вдоль линии, согласованной с нагрузкой ($Z_{\text{н}} > Z_{\text{в}}$) при помощи четвертьволнового трансформатора

Задание №4. Двухпроводная линия выполнена из медного провода диаметром $d = 4 \text{ мм}$ (табл. 5.10). Расстояние между проводами $a_{\text{л}} = 20 \text{ см}$. Требуется согласовать линию с активной нагрузкой $R_{\text{н}} = n_2 Z_{\text{в}} = 0.5 Z_{\text{в}}$ с помощью четвертьволнового трансформатора (вставки). Напряжение на нагрузке задано $U_{\text{м2}} = 14.14 \text{ В}$, частота $f = 100 \text{ МГц}$ (табл.5.10). Рассчитать и построить графики распределения $U(y)$, $I(y)$.

Решение

1. Волновое сопротивление линии без потерь

$$\underline{Z}_B = 120 \ln \frac{2 \cdot a_{\text{л}}}{d} = 120 \ln \frac{2 \cdot 20 \cdot 10^{-2}}{4 \cdot 10^{-3}} = 553 \text{ Ом.}$$

2. Сопротивление нагрузки $\underline{Z}_H = R_H = n_2 \underline{Z}_B = 0.5 \cdot 553 = 276 \text{ Ом.}$

3. Для согласования линии с нагрузкой необходимо обеспечить $\underline{Z}_{\text{ВТ}} = \sqrt{\underline{Z}_B \cdot R_H} = 391 \text{ Ом.}$

4. При заданном диаметре $d = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ требуемое расстояние между проводами

трансформатора
$$a_T = \frac{d}{2} e^{\frac{\underline{Z}_{\text{ВТ}}}{120}} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{2} e^{276/120} = 0.052 \text{ м (рис.5.41)}$$

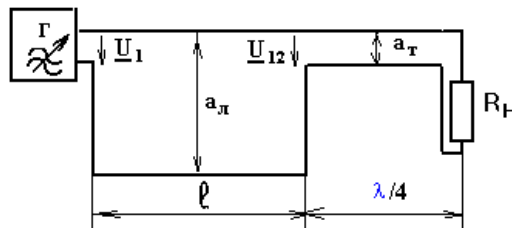


Рис.5.41

5. Длина волны [3] $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{10^8} = 3 \text{ м}$ и коэффициент фазы $\beta = \frac{2\pi}{\lambda} = 2.1 \text{ рад/м.}$

6. Напряжение и ток в нагрузке $\underline{U}_2 = \frac{U_{m2}}{\sqrt{2}} e^{j\psi} = \frac{14.14}{\sqrt{2}} e^{j0} = 10 \text{ В,}$

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_H} = \frac{10}{276} = 0.036 \text{ А.}$$

7. Напряжение и ток на входе трансформатора

$$\underline{U}_{21} = \underline{U}_2 \cos\left(\beta \frac{\lambda}{4}\right) + j \underline{I}_2 \underline{Z}_{\text{ВТ}} \sin\left(\beta \frac{\lambda}{4}\right) = j 14.14 \text{ В,}$$

$$\underline{I}_{21} = \underline{I}_2 \cos\left(\beta \frac{\lambda}{4}\right) + j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_{\text{ВТ}}} \sin\left(\beta \frac{\lambda}{4}\right) = j 0.026 \text{ мА.}$$

8. Действующие напряжение и ток в линии на участке «вход трансформатора - начало линии»

$$U(y) = |U_{21}| = 14.14 \text{ В, } I(y) = |I_{21}| = 0.026 \text{ А.}$$

9. Действующие напряжение и ток вдоль четвертьволнового трансформатора

$$U(y) = U_2 \sqrt{\cos^2 \beta y + m^2 \sin^2 \beta y} = 10 \sqrt{\cos^2 2.1 y + 2 \sin^2 2.1 y}$$

$$I(y) = \frac{I_2}{m} \sqrt{m^2 \cos^2 \beta y + \sin^2 \beta y} = \frac{0.036}{1.41} \sqrt{2 \cdot \cos^2 2.1 y + \sin^2 2.1 y}. \quad \text{Здесь}$$

$$m = \frac{Z_{\text{вТ}}}{R_{\text{н}}} = 1.41.$$

10. Результаты расчетов $U(y)$ и $I(y)$ представлены в таблице 5.12.

Таблица 5.12

у, м	βy	$\cos^2 \beta y$	$m^2 \cos^2 \beta y$	$\sin^2 \beta y$	$m^2 \sin^2 \beta y$	$U(y)$, В	$I(y)$, мА
0	0	1	2	0	0	10	36
0.15	0.1π	0.905	1.81	0.095	0.19	10.5	35
0.3	0.2π	0.655	1.31	0.345	0.69	11.6	33
0.45	0.3π	0.345	0.69	0.655	1.31	12.9	30
0.6	0.4π	0.095	0.19	0.905	1.81	13.8	27
0.75	0.5π	0	0	1	2	14.14	26

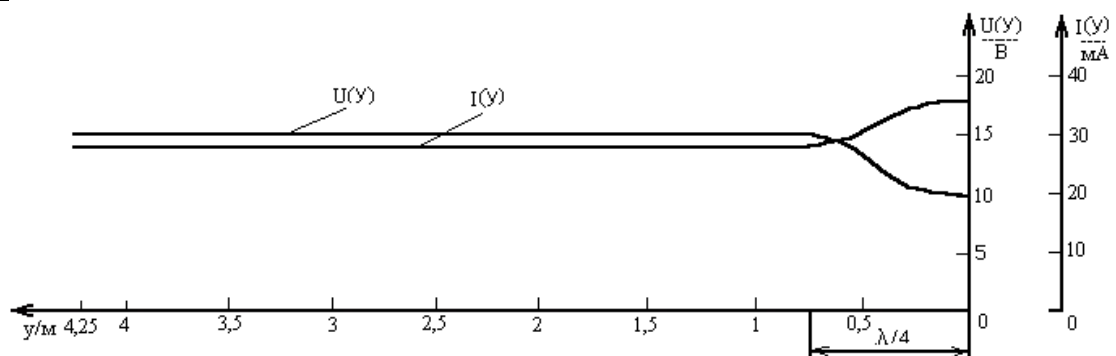


Рис. 5.42. Графики распределения $U(y)$ и $I(y)$ вдоль линии, согласованной с нагрузкой ($Z_{\text{н}} < Z_{\text{в}}$) при помощи четвертьволнового трансформатора

15. Анализ частотных характеристик пассивных LC-фильтров типа "к"

Учебные вопросы:

1. Анализ условий фильтрации пассивных LC-фильтров.
2. Анализ частотных характеристик фильтров нижних частот типа "к".
3. Анализ частотных характеристик фильтров верхних частот типа "к".

задание курсантам для подготовки к занятию

1.Изучить:

1. Никулин В. И. Теория электрических цепей. – М.: РИОР, 2016, с. 181-188.
2. Бакалов В.П., Воробийченко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 368-370.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982. - с. 348-349.

2.Ответить на вопросы:

1. Что такое электрический фильтр?
2. Изобразите основные схемы замещения пассивных LC-фильтров.
3. Сформулируйте условия фильтрации пассивных LC-фильтров.
4. Каким образом можно определить полосу пропускания пассивных LC-фильтров?
5. Каким образом можно определить частоты среза полосы пропускания? Поясните на примере фильтра нижних частот типа "к"
6. Каким образом можно определить частотную характеристику ослабления пассивных LC-фильтров? Поясните на примере фильтра нижних частот типа "к".
7. Каким образом можно определить фазо-частотную характеристику пассивных LC-фильтров? Поясните на примере фильтра нижних частот типа "к".
8. Каким образом можно определить характеристические сопротивления пассивных LC-фильтров? Поясните на примере фильтра нижних частот типа "к".

3.Проанализировать решение задач

№ 12.3, 12.9 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. М.: Высшая школа, 1982. - с.360-362,364-266)

В ходе практического занятия выполнить задания:

Задание 1. Определить к какому типу по полосе пропускания относится электрический LC-фильтр, вычислить граничные частоты, по результатам расчетов

построить графики $X_1(\omega)$, $-4X_2(\omega)$ и качественно график $A_c(\omega)$, если известны схема и значения элементов L_1 , L_2 , C_1 , C_2 электрического фильтра (таблица 7.1).

Задание 2. Определить элементы фильтра нижних частот типа "к", для которого заданы номинальное характеристическое сопротивление R_c , частота среза f_c (табл. 7.2). Рассчитать и построить графики зависимостей постоянной ослабления A_c , постоянной фазы B_c и характеристического сопротивления Z_c от частоты. Для двух значений сопротивления нагрузки

$R_n=R_c$, $R_n = nR_c$ (табл. 7.2) рассчитать и построить график $A(\omega) = 20 \lg \frac{U_1(\omega)}{U_2(\omega)}$

Задание 3. Определить элементы фильтра верхних частот типа "к", для которого заданы номинальное характеристическое сопротивление которого R_c , частота среза (таблица 7.2). Рассчитать и построить графики зависимостей постоянной ослабления A_c , постоянной фазы B_c и характеристического сопротивления от частоты. Для двух значений сопротивления нагрузки $R_n=R_c$, $R_n = nR_c$ (таблица 7.2) рассчитать и построить график

$$A(\omega) = 20 \lg \frac{U_1(\omega)}{U_2(\omega)}$$

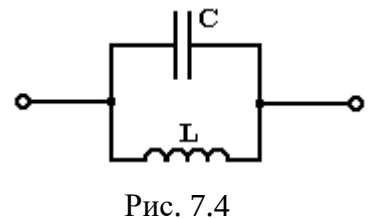
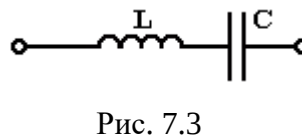
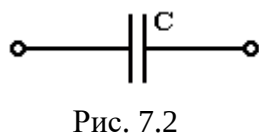
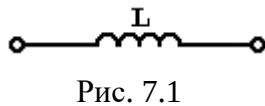


Таблица 7.1

Вариант №	X ₁			X ₂			Схема фильтра
	рис.№	L ₁ , мГн	C ₁ ,мкф	рис.№	L ₂ , мГн	C ₂ , мкф	
0	7.1	250	-	7.3	50	0.2	Т
1	7.3	60	0.25	7.1	300	-	П
2	7.2	-	0.3	7.3	80	0.22	Т
3	7.3	40	0.3	7.2	0.1	-	П
4	7.1	300	-	7.4	10	1	Т
5	7.4	20	4	7.1	500	-	П
6	7.2	-	0.2	7.4	30	0.5	Т
7	7.4	20	2	7.2	0.4	-	П
8	7.3	80	0.4	7.4	60	0.2	Т
9	7..4	40	1	7.3	60	0.2	П
10	7.1	50	-	7.2	-	0.4	Т
11	7.3	60	0.25	7.1	300	-	П
12	7.2	-	0.3	7.3	80	0.22	Т
13	7.3	40	0.3	7.2	0.1	-	П
14	7.1	300	-	7.4	10	1	Т
15	7.4	20	4	7.1	500	-	П
16	7.2	-	0.2	7.4	30	0.5	Т
17	7.4	20	2	7.2	0.4	-	П
18	7.3	80	0.4	7.4	60	0.2	Т
19	7..4	40	1	7.3	60	0.2	П
20	7.1	50	-	7.2	-	0.4	Т
21	7.3	60	0.25	7.1	300	-	П
22	7.2	-	0.3	7.3	80	0.22	Т
23	7.3	40	0.3	7.2	0.1	-	П
24	7.1	300	-	7.4	10	1	Т
25	7.4	20	4	7.1	500	-	П
26	7.2	-	0.2	7.4	30	0.5	Т
27	7.4	20	2	7.2	0.4	-	П
28	7.3	80	0.4	7.4	60	0.2	Т
29	7..4	40	1	7.3	60	0.2	П
30	7.1	50	-	7.2	-	0.4	Т
31	7.3	60	0.25	7.1	300	-	П
32	7.2	-	0.3	7.3	80	0.22	Т
33	7.3	40	0.3	7.2	0.1	-	П
34	7.1	300	-	7.4	10	1	Т
35	7.4	20	4	7.1	500	-	П
36	7.2	-	0.2	7.4	30	0.5	Т
37	7.4	20	2	7.2	0.4	-	П
38	7.3	80	0.4	7.4	60	0.2	Т
39	7..4	40	1	7.3	60	0.2	П
40	7.1	50	-	7.2	-	0.4	Т
41	7.3	60	0.25	7.1	300	-	П
42	7.2	-	0.3	7.3	80	0.22	Т
43	7.3	40	0.3	7.2	0.1	-	П
44	7.1	300	-	7.4	10	1	Т
45	7.4	20	4	7.1	500	-	П

46	7.2	-	0.2	7.4	30	0.5	Т
47	7.4	20	2	7.2	0.4	-	П
48	7.3	80	0.4	7.4	60	0.2	Т

Таблица 7.2

Вариант №	R _c , Ом	f _c , Гц	Схема	n
0	500	3000	Т	0.8
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
34	900	4000	Т	1.5
35	1000	5000	П	1.2
36	1500	1500	Т	0.7
37	550	3500	П	0.65
38	650	2500	Т	0.5
39	750	4500	П	1.25
40	850	5500	Т	1.4
41	600	2500	П	0.6
42	700	2000	Т	0.9

43	800	1000	П	2
44	900	4000	Т	1.5
45	1000	5000	П	1.2
46	1500	1500	Т	0.7
47	550	3500	П	0.65
48	650	2500	Т	0.5
49	750	4500	П	1.25

Пример выполнения заданий (вариант № 0)

II. **Задание № 1.** Определить к какому типу по полосе пропускания относится электрический LC-фильтр, вычислить граничные частоты, по результатам расчетов построить графики $X_1(\omega)$, $-4X_2(\omega)$ и качественно график $A_c(\omega)$, если известны, схемы и значения элементов электрического фильтра (таблица 7.1) $L_1 = 250$ мГн, $L_2 = 50$ мГн, $C_2 = 0.2$ мкф.

III. **Решение**

1. Изобразим схему заданного фильтра (рис. 7.5)

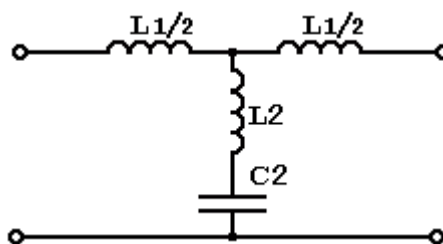


Рис. 7.5. Схема фильтра

2. Сопротивления фильтра определяются выражениями $x_1(\omega) = \omega L_1$, $x_2 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}$

3. Находим граничные частоты из условий:

3.1.
$$X_1(\omega) = 0 \Rightarrow \omega_{c1} L_1 = 0 \Rightarrow \omega_{c1} = 0$$

3.2
$$X_1(\omega) = -4X_2(\omega)$$

$$\omega_{c2} L_1 = -4\left(\omega_{c2} L_2 - \frac{1}{\omega_{c2} C_2}\right) \Rightarrow \omega_{c2} L_1 = -4\omega_{c2} L_2 + \frac{4}{\omega_{c2} C_2} \Rightarrow \omega_{c2} L_1 + 4\omega_{c2} L_2 = \frac{4}{\omega_{c2} C_2} \Rightarrow$$

$$\omega_{c2}^2 = \frac{4}{C_2(L_1 + 4L_2)} \Rightarrow \omega_{c2} = \frac{2}{\sqrt{C_2(L_1 + 4L_2)}} = \frac{2}{\sqrt{0.2 \cdot 10^{-6}(250 + 50) \cdot 10^{-3}}} = 6.667 \text{ C}^{-1}$$

4. Результаты расчетов $X_1(\omega)$, $-4X_2(\omega)$ представим в таблице 7.3

Таблица 7.3

$\omega \cdot 10^3$ рад/с	0	2	4	0	8	10	12	14	16	18	20
X_1 , кОм	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
X_2 , кОм	$-\infty$	-2.4	-1.1	-0.5	-0.2	0	0.2	0.3	0.5	0.6	0.7

$-4X_2, \text{ кОм}$	∞	9.6	4.2	2.1	0.9	0	-0.7	-1.4	-1.95	-2.5	-3
----------------------	----------	-----	-----	-----	-----	---	------	------	-------	------	----

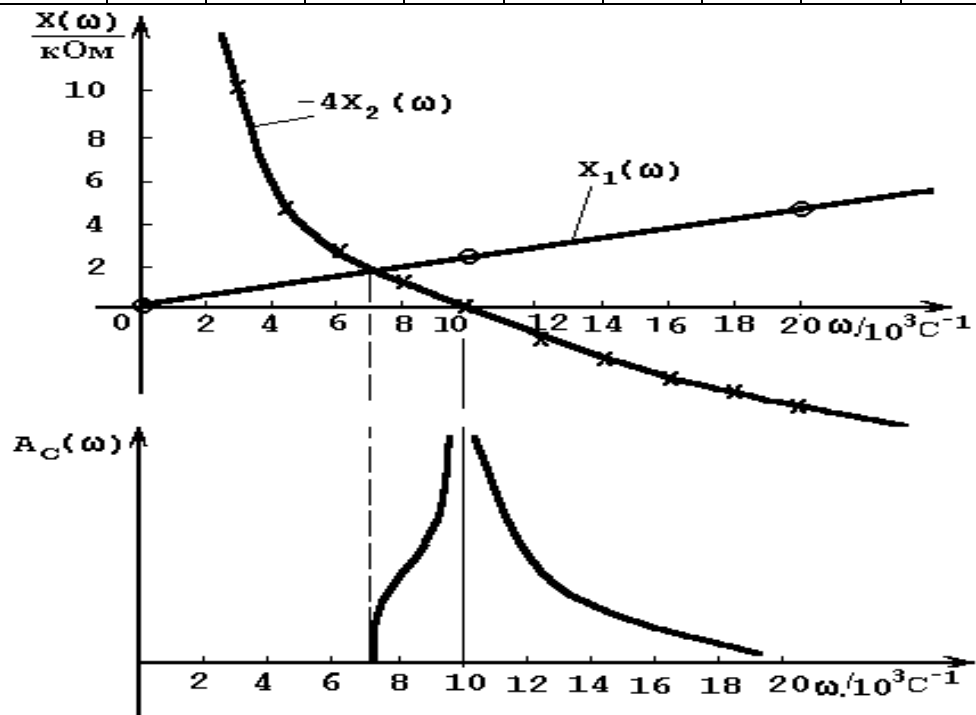


Рис.7.6. Графики $X_1(\omega)$, $-4X_2(\omega)$ и $A_c(\omega)$

Задание №2. Определить элементы фильтра нижних частот типа "к", номинальное характеристическое сопротивление которого $R_c = 500 \text{ Ом}$, а частота среза $f_c = 300 \text{ Гц}$ (табл. 7.2). Рассчитать и построить графики зависимостей постоянной ослабления A_c , постоянной фазы B_c и характеристического сопротивления от частоты. Рассчитать и построить график $A(\omega) = 20 \lg \frac{U_1(\omega)}{U_2(\omega)}$ для двух значений сопротивления нагрузки $R_n = R_c$, $R_n = nR_c$ (табл. 7.2).

IV. Решение

1. Изобразим схему фильтра нижних частот (рис.7.7)

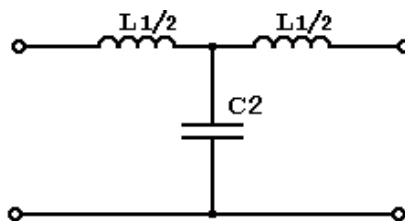


Рис.7.7. Схема фильтра нижних частот

2. Определяем величины индуктивности и емкости фильтра:

$$L_1 = \frac{R_c}{\pi f_c} = \frac{500}{\pi \cdot 3000} = 0.053 \text{ Гн}, \quad C_2 = \frac{1}{\pi f_c R_c} = \frac{1}{\pi \cdot 3000 \cdot 500} = 0.212 \text{ мкф}.$$

3. Расчет постоянной ослабления $A_c(\omega)$ проведем по формуле

$$A_c(\omega) = 2 \operatorname{arch} \sqrt{\frac{x_1(\omega)}{4x_2(\omega)}} = 2 \operatorname{arch} \sqrt{\frac{\omega L_1 \cdot \omega C_2}{4}} = 2 \operatorname{arch} \frac{\omega}{\omega_c} = 2 \operatorname{arch} \frac{f}{f_c} =$$

$$= 2 \ln \left(\frac{f}{f_c} + \sqrt{\left(\frac{f}{f_c} \right)^2 - 1} \right) = 2 \ln \left(\Omega + \sqrt{\Omega^2 - 1} \right)$$

$$\text{Здесь } \Omega = \frac{\omega}{\omega_c} = \frac{2\pi f}{2\pi f_c} = \frac{f}{f_c}$$

Результаты расчета представим в таблице 7.4.

Таблица 7.4

f, кГц	ω , крад/с	Ω	A_c , Нп	A_c , дБ	A_1 , Нп	A_1 , дБ	A_2 , Нп	A_2 , дБ	B_c , рад	$Z_{ст}$, Ом
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.5	3.14	0.17	0	0	0	-0.01	0	0.24	0.3	351
1	6.28	0.33	0	0	0	-0.19	0.1	0.62	0.7	344
1.5	9.42	0.5	0	0	-0.1	-0.9	0.1	0.53	1.0	331
2	12.57	0.67	0	0	-0.3	-2.51	-0.1	-0.6	1.4	312
2.5	15.71	0.83	0	0	-0.4	-3.87	-0.3	-2.5	2	286
3	18.85	1	0	0	0	0	0	0	3.1	250
3.5	21.99	1.17	1.14	9.89	0.6	5.65	0.7	6.1	3.1	j200
4	25.13	1.33	1.59	13.8	1.2	10.35	1.3	11.2	3.1	j118
4.5	28.27	1.5	1.92	16.7	1.6	14.2	1.8	15.3	3.1	j125
5	31.42	1.67	2.20	19.1	2	17.47	2.2	18.8	3.1	j220
5.5	34.56	1.83	2.43	21.1	2.3	20.32	2.5	21.7	3.1	j292
6	37.7	2	2.63	22.9	2.6	22.86	2.8	24.4	3.1	j353

4. Расчет постоянной фазы фильтра нижних частот.

$$4.1. \text{ В полосе пропускания } B_c = 2 \arcsin \sqrt{\frac{x_1(\omega)}{4x_2(\omega)}} = 2 \arcsin \frac{f}{f_c} = 2 \arcsin \Omega$$

4.2. В полосе задерживания $B_c = +\pi$.

Результаты расчета представлены в таблице 7.4.

5. Расчет характеристического сопротивления для Т-образной схемы проведем по

формуле $Z_T = R_c \sqrt{1 - \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} = R_c \cdot \sqrt{1 - \Omega^2}$. Результаты расчета представлены

в таблице 7.4.

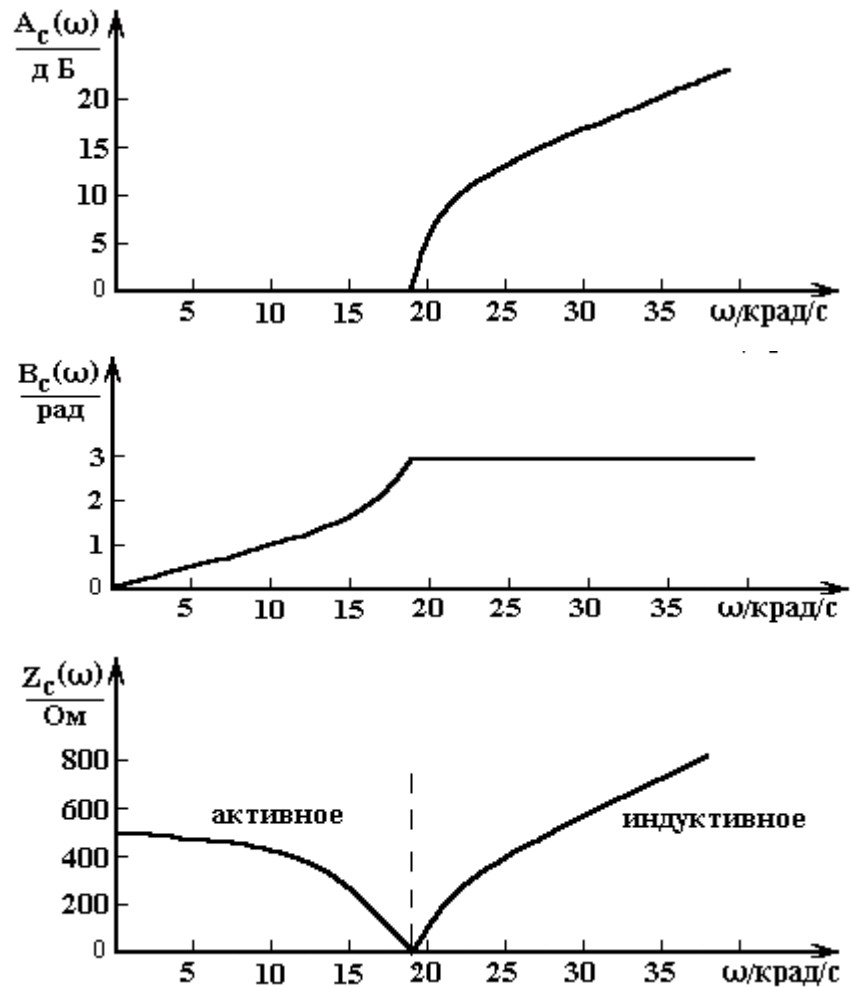


Рис.7.8. Графики $A_c(\omega)$, $B_c(\omega)$, $Z_c(\omega)$

6. Расчет ослабления напряжения в фильтре нижних частот при $R_H = R_c$.

6.1. Изобразим схему нагруженного фильтра (рис.7.9)

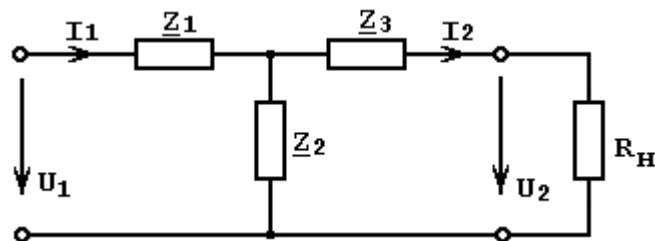


Рис.7.9. Схема нагруженного фильтра

6.2. Рассматривая фильтр как нагруженный четырехполюсник, можно записать

$$\text{уравнение} \quad \underline{U}_1 = \underline{A}_{11} \underline{U}_2 + \underline{A}_{12} \cdot \underline{I}_2 = \underline{U}_2 \left(\underline{A}_{11} + \underline{A}_{12} \cdot \frac{1}{R_H} \right).$$

Здесь $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{12}$ – первичные параметры четырехполюсника.

Для четырехполосника Т-образной схемы

$$\underline{A}_{11} = 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} = 1 + j \frac{\omega L_1}{2} \cdot j \omega C_2 = 1 - \frac{\omega^2 L_1 C_2}{2} = 1 - 2\Omega^2,$$

$$\begin{aligned} \underline{A}_{12} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} = j \frac{\omega L_1}{2} + j \frac{\omega L_1}{2} + \frac{j \omega L_1 \cdot j \omega L_1}{4} \cdot j \omega C_2 = 2j \omega L_1 - j \frac{\omega^2 L_1^2 \omega C_2}{4} = \\ &= j \omega L_1 \left(1 - \frac{\omega^2 L_1 C_2}{4} \right) = j \omega L_1 (1 - \Omega^2) \end{aligned}$$

$$\text{Здесь } \Omega^2 = \frac{\omega^2}{\omega_c^2}; \quad \omega_c^2 = \frac{4}{L_1 C_2}.$$

6.3. Ослабление напряжения определяем по формуле

$$\underline{A}_1(\omega) = 20 \lg \left| \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \right| = 20 \lg \left| \underline{A}_{11} + \frac{\underline{A}_{12}}{\underline{R}_H} \right| = 20 \lg \left| (1 - 2\Omega^2) - j \frac{\omega L_1}{\underline{R}_H} (1 - \Omega^2) \right|$$

Принимая во внимание, что $\underline{R}_H = R_c = \sqrt{\frac{L_1}{C_2}}$, можно записать $\frac{\omega L_1}{\underline{R}_H} = \frac{2\omega \sqrt{L_1 C_2}}{2} = 2\Omega$.

Тогда

$$\underline{A}_1(\omega) = 20 \lg \left[(1 - 2\Omega^2)^2 + 4\Omega^2 (1 - \Omega^2)^2 \right]^{\frac{1}{2}} = 10 \lg \left[(1 - 2\Omega^2)^2 + 4\Omega^2 (1 - \Omega^2)^2 \right]$$

Результаты расчетов $A(\omega)$ представим в таблице 7.4.

7. Расчет ослабления напряжения в фильтре нижних частот при $R_H = 0.8R_c$

проводим по формуле $\underline{A}_2(\omega) = 10 \lg \left[(1 - 2\Omega^2)^2 + \frac{4\Omega^2}{0.8^2} (1 - \Omega^2)^2 \right]$. Результаты расчетов

$\underline{A}_2(\omega)$ представлены в таблице 7.4.

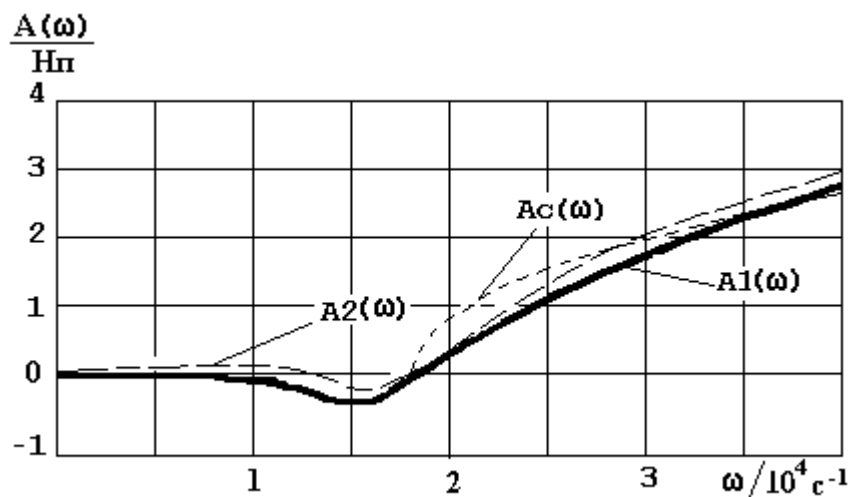


Рис. 7.10. Графики ослабления напряжения $A_1(\omega)$, $A_2(\omega)$ в фильтре нижних частот.

Задание №3. Определить элементы фильтра верхних частот типа "к", номинальное характеристическое сопротивление которого $R_c = 500$ Ом, а частота среза $f_c = 300$ Гц (табл. 7.2). Рассчитать и построить графики зависимостей постоянной ослабления A_c , постоянной фазы B_c и характеристического сопротивления от частоты. Рассчитать и построить график $A(\omega) = 20 \lg \frac{U_1(\omega)}{U_2(\omega)}$ для двух значений сопротивления нагрузки $R_n = R_c$, $R_n = nR_c$ (табл. 7.2).

Решение

1. Изобразим схему фильтра верхних частот типа "к" (рис.7.11)

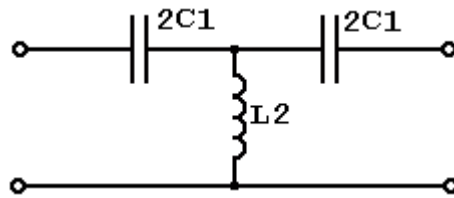


Рис.7.11. Схема фильтра верхних частот типа "к"

2. Выполним расчет емкостного и индуктивного элементов схемы

$$C_1 = \frac{1}{4\pi f_c \cdot R_c} = \frac{1}{4 \cdot 3.14 \cdot 3000 \cdot 500} = 5.305 \cdot 10^{-8} = 0.053 \text{ мкФ},$$

$$L_2 = \frac{R_c}{4\pi f_c} = \frac{500}{4 \cdot 3.14 \cdot 3000} = 0.013 \text{ Гн}.$$

3. Расчет постоянной ослабления фильтра при согласованной нагрузке.

3.1. В полосе пропускания $A_c(\omega) = 0$.

3.2. В полосе задерживания $A_c(\omega) = 2 \operatorname{arch} \frac{2\pi f_c}{2\pi f} = 2 \operatorname{arch} \Omega$

Здесь $\Omega = \frac{f_c}{f}$ - нормированная частота фильтра верхних частот.

4. Расчет постоянной фазы.

4.1. В полосе пропускания $B_c(\omega) = -2 \arcsin \frac{\omega_c}{\omega} = -2 \arcsin \Omega$

4.2. В полосе задерживания $B_c(\omega) = -\pi$ рад.

5. Характеристическое сопротивление ФВЧ типа "к" Т-схемы определяется

выражением $\underline{Z}_{CT}(\omega) = R_c \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^2} = R_c \sqrt{1 - \Omega^2}$. Результаты расчетов представлены в

табл. 7.5.

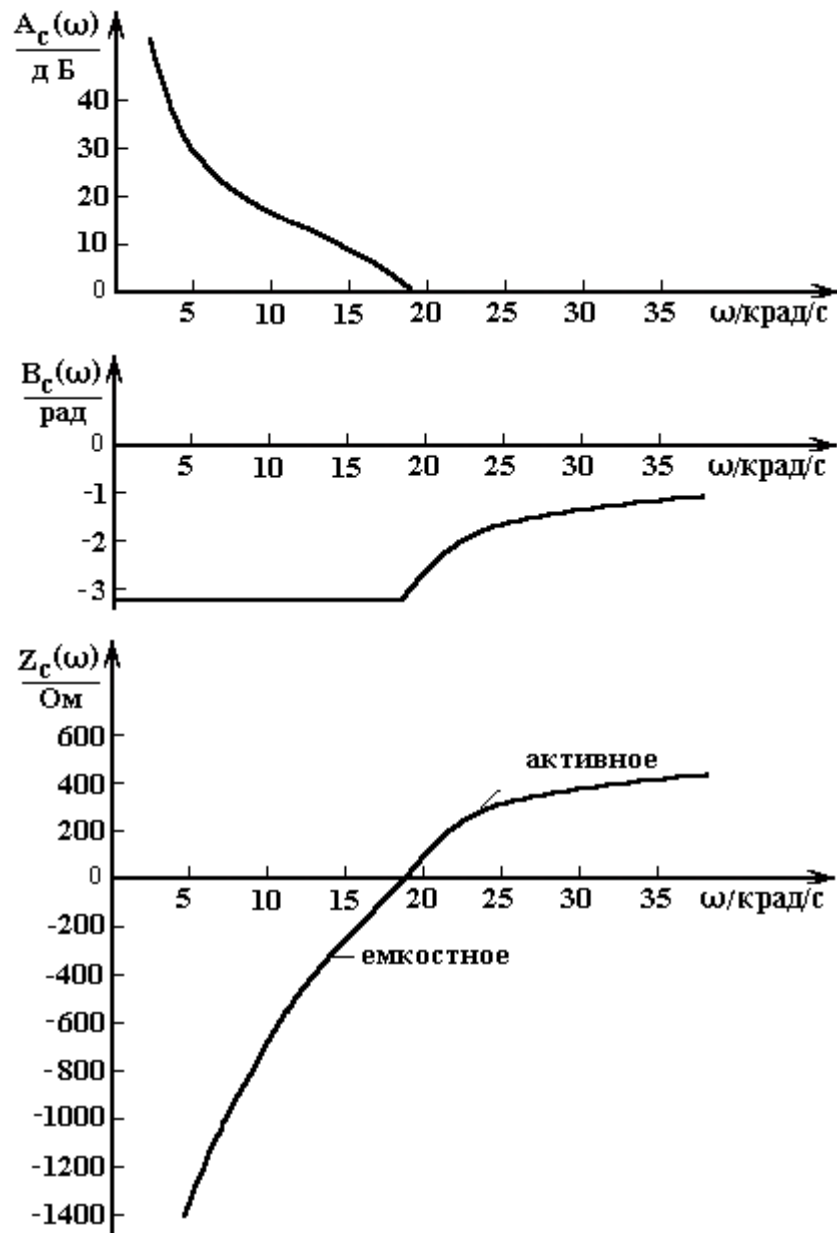


Рис. 7.12. Графики постоянных ослабления $A_c(\omega)$, фазы $B_c(\omega)$ и сопротивления $Z_c(\omega)$

6. Расчеты ослабления напряжения фильтром верхних частот типа "к".

6.1. Ослабление напряжения при $R_H = R_C = 500 \text{ Ом}$.

$$A_1(\omega) = 20 \lg \left| \frac{U_1(\omega)}{U_2(\omega)} \right| = 20 \lg \left(\underline{A}_{11} + \frac{\underline{A}_{12}}{R_H} \right)$$

Здесь $\underline{A}_{11}, \underline{A}_{12}$ - первичные параметры четырехполюсника.

$$\underline{A}_{11} = 1 + \frac{Z_1}{Z_2} = 1 + \frac{1}{j\omega 2C_1 \cdot j\omega L_2} = 1 - \frac{1}{\omega^2 2C_1 L_2} \cdot \frac{2}{2} = 1 - 2 \frac{\omega_c^2}{\omega^2} = 1 - 2\Omega^2$$

$$\underline{A}_{12} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_3 + \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{j\omega 2C_1} + \frac{1}{j\omega 2C_1} + \frac{1}{j\omega 2C_1 \cdot j\omega 2C_1 \cdot j\omega L_2} =$$

$$= j \frac{1}{\omega C_1 \omega^2 \cdot 4C_1 L_2} - j \frac{1}{\omega C_1} = j \frac{1}{\omega C_1} \left(\frac{\omega_c^2}{\omega^2} - 1 \right) = j \frac{1}{\omega C_1} (\Omega^2 - 1)$$

Принимая во внимание, что $R_H = R_C = \sqrt{\frac{L_2}{C_1}}$, определяем

$$\frac{\underline{A}_{12}}{R_H} = \frac{\underline{A}_{12}}{R_C} = j \frac{1}{\omega C_1 \sqrt{\frac{L_2}{C_1}}} \cdot (\Omega^2 - 1) = j \frac{2}{\omega 2 \sqrt{L_2 C_1}} (\Omega^2 - 1) = j 2 \frac{\omega_c}{\omega} (\Omega^2 - 1) = j 2 \Omega (\Omega^2 - 1)$$

Таким

образом

$$A_1(\omega) = 20 \lg \left| \left(1 - 2\Omega^2 \right) + j 2 \Omega (\Omega^2 - 1) \right| = 10 \lg \left(\left(1 - 2\Omega^2 \right)^2 + \left(2 \Omega (\Omega^2 - 1) \right)^2 \right)$$

Результаты расчетов $A_1(\omega)$ представлены в табл.7.5

6.2. Ослабление напряжения при $R_H = nR_C = 0.8R_C$

$$A_2(\omega) = 20 \lg \left| \left(\underline{A}_{11} + \frac{\underline{A}_{12}}{nR_C} \right) \right| = 10 \lg \left(\left(1 - 2\Omega^2 \right)^2 + \left(\frac{2}{0.8} \Omega (\Omega^2 - 1) \right)^2 \right)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 7.5.

Таблица 7.5

f, кГц	ω , крад/с	Ω	A_c , Нп	A_c , дБ	A_1 , Нп	A_1 , дБ	A_2 , Нп	A_2 , дБ	B_c , рад	$Z_{ст}$, Ом
0	0	∞	31.2	271	50.9	442.5	45.6	396	-3.14	∞
0.5	3.14	6	4.9	43	11.58	100.6	6.3	54.5	-3.14	1.46
1	6.28	3	3.5	30.6	9.5	82.5	4.1	35.9	-3.14	661
1.5	9.42	2	2.6	22.9	8.28	71.9	2.8	24.4	-3.14	353
2	12.57	1.5	1.9	16.7	7.42	64.4	1.8	15.3	-3.14	125
2.5	15.71	1.2	1.2	10.8	6.74	58.6	0.8	7.2	-3.14	187
3	18.85	1	0	0	6.19	53.8	0	0	-3.14	250
3.5	21.99	0.86	0	0	5.73	49.7	-0.3	-2.6	-2.06	281
4	25.13	0.75	0	0	5.32	46.2	-0.2	-1.6	-1.7	300
4.5	28.27	0.67	0	0	4.96	43.1	-0.1	-0.6	-1.46	312

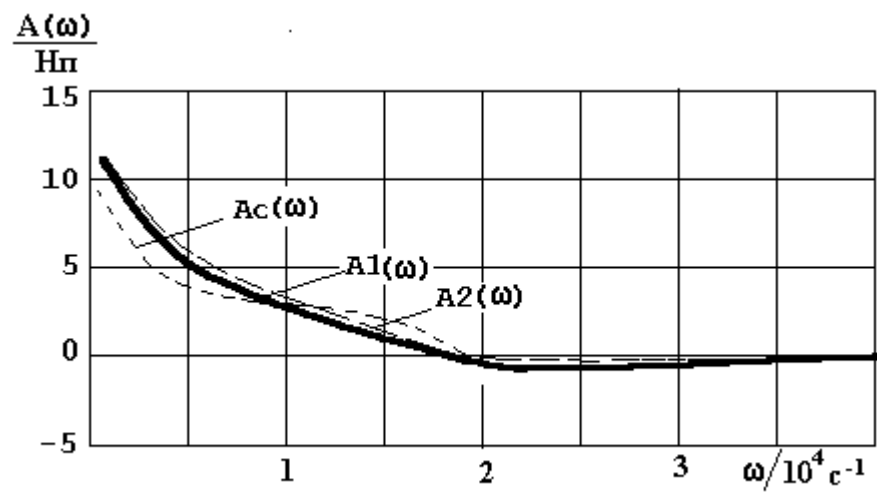


Рис.7.13. Графики $A_c(\omega)$, $A_1(\omega)$, $A_2(\omega)$ фильтра верхних частот.

16. Анализ частотных характеристик пассивных LC-фильтров типа "m"

Учебные вопросы:

1. Расчет элементов фильтра типа "m".
2. Построение частотных характеристик фильтра типа "m".

задание курсантам для подготовки к занятию

1.Изучить:

1. Никулин В. И. Теория электрических цепей. – М.: РИОР, 2016, с. 188-191.
2. Бакалов В.П., Воробьенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. - М.: Радио и связь, 1998, с. 368-371.
3. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982, с. 354-355.

2.Ответить на вопросы:

1. Что такое модифицированный электрический фильтр?
2. Изобразите схему и поясните порядок определения элементов последовательно-производного Г- образного звена фильтра нижних частот.
3. Изобразите схему и поясните порядок определения элементов параллельно-производного Г- образного звена фильтра нижних частот.
4. Сформулируйте условия фильтрации пассивных LC-фильтров.
5. Каким образом можно определить полосу пропускания пассивных LC-фильтров типа "m"?
6. Каким образом можно определить частоты среза полосы пропускания? Поясните на примере фильтра нижних частот типа "m".
7. Каким образом можно определить частотную характеристику ослабления пассивных LC-фильтров типа "m"? Поясните на примере фильтра нижних частот.
8. Каким образом можно определить фазочастотную характеристику пассивных LC-фильтров типа "m"? Поясните на примере фильтра нижних частот.
9. Каким образом можно определить характеристические сопротивления пассивных LC-фильтров типа "m"? Поясните на примере фильтра нижних частот.

3.Проанализировать решение задач

№ 12.3, 12.9 (Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982, с.360-362, 364-266)

В ходе практического занятия выполнить задания:

Задание №1. Фильтр нижних частот типа "m" имеет частоту среза f_c и номинальное характеристическое сопротивление R_c (табл. 7.7). Начертить схемы и определить элементы последовательно-производного и параллельно-производного Г-образных звеньев фильтра с заданным параметром m . Рассчитать и построить графики $A_c(\omega)$, $B_c(\omega)$ и $Z_{\text{пм}}(\omega)$.

Задание №2. Фильтр верхних частот типа "m" имеет частоту среза f_c и номинальное характеристическое сопротивление R_c , параметр m (табл.7.7). Начертить схемы и определить элементы последовательно-производного и параллельно-производного Г-образных звеньев ФВЧ типа "m". Рассчитать и построить графики $A_c(\omega)$, $B_c(\omega)$, $Z_{\text{пм}}(\omega)$, $Z_{\text{тм}}(\omega)$.

Задание №3. Сложный фильтр нижних частот имеет частоту среза f_c , его номинальное характеристическое сопротивление R_c (табл.7.7). Фильтр состоит из звена типа "к" и звена типа "m", соединенных каскадно на основе согласования характеристических сопротивлений. На входе и выходе фильтра характеристическое сопротивление должно иметь характер $Z_{\text{пм}}$. Требуется выбрать и начертить схему фильтра, рассчитать его элементы и построить график $A_c(\omega)$.

Таблица 7.6

Вариант №	R_c , Ом	f_c , Гц	Схема	m
0	500	3000	T	0.59
1	600	2500	П	0.6
2	700	2000	T	0.9
3	800	1000	П	0.4
4	900	4000	T	0.5
5	1000	5000	П	0.3
6	1500	1500	T	0.7
7	550	3500	П	0.65
8	650	2500	T	0.55
9	750	4500	П	0.53
10	850	2500	T	0.6
11	600	2000	П	0.7
12	750	1000	T	0.45
13	800	4000	П	0.54
14	950	5000	T	0.39
15	1050	1500	П	0.72
16	1500	3500	T	0.65
17	1550	2500	П	0.45
18	680	4500	T	0.49
19	750	5500	П	0.66
20	800	2500	T	0.39
21	750	2500	П	0.47
22	800	2000	T	0.51
23	950	1000	П	0.38
24	1050	4000	T	0.71
25	1500	5500	П	0.62
26	1550	1500	T	0.54
27	680	3500	П	0.50
28	750	2500	T	0.67
29	800	4500	П	0.49
30	600	5500	T	0.41
31	630	5500	П	0.53
32	700	1500	T	0.37
33	800	3500	П	0.72
34	900	2500	T	0.69
35	1000	4500	П	0.55
36	1500	5500	T	0.52
37	550	2500	П	0.6
38	650	2000	T	0.7
39	750	5500	П	0.4
40	850	2500	T	0.5
41	600	2000	П	0.3
42	630	1000	T	0.64
43	700	5500	П	0.60
44	800	2500	T	0.55
45	900	2000	П	0.56

46	1000	1000	Т	0.69
47	1500	4000	П	0.49
48	550	5000	Т	0.64
49	650	4500	П	0.5

Пример выполнения заданий (вариант № 0)

Задание №1. ФНЧ типа "м" имеет частоту среза $f_c = 3000$ Гц и номинальное характеристическое сопротивление $R_c = 500$ Ом (табл. 7.6). Начертить схемы и определить элементы последовательно-производного и параллельно-производного Г-образных звеньев фильтра, если параметр $m = 0.59$. Рассчитать и построить графики $A_c(\omega)$, $B_c(\omega)$ и $Z_{\text{пм}}(\omega)$.

Решение

1. Изобразим схему Г-образного полужвена последовательно – производного ФНЧ типа "м"

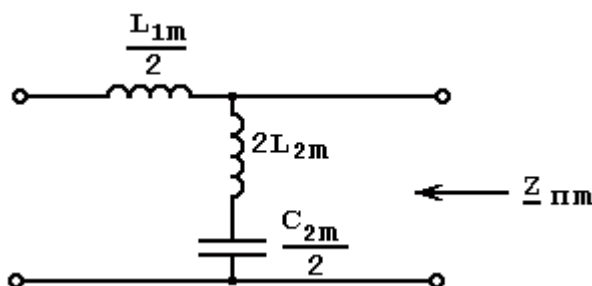


Рис. 7.14. Схема Г-образного полужвена последовательно – производного ФНЧ типа "м"

2. Определяем элементы ФНЧ-прототипа типа "к"

$$L_1 = \frac{R_c}{\pi f_c} = \frac{500}{3.14 \cdot 3000} = 0.053 \text{ Гн}, \quad C_2 = \frac{1}{\pi f_c R_c} = \frac{1}{3.14 \cdot 3000 \cdot 500} = 0.212 \text{ мкФ}.$$

3. Рассчитаем элементы Г-образного полужвена ФНЧ типа "м"

$$L_{1m} = m \cdot L_1 = 0.59 \cdot 0.053 = 0.031 \text{ Гн},$$

$$L_{2m} = \frac{1-m^2}{4m} \cdot L_1 = \frac{1-0.59^2}{4 \cdot 0.59} \cdot 0.053 = 0.015 \text{ Гн},$$

$$C_{2m} = mC_2 = 0.59 \cdot C_2 = 0.59 \cdot 0.212 \cdot 10^{-6} = 0.125 \text{ мкФ}.$$

4. Изобразим схему Г-образного полужвена параллельно-производного ФНЧ типа "м"

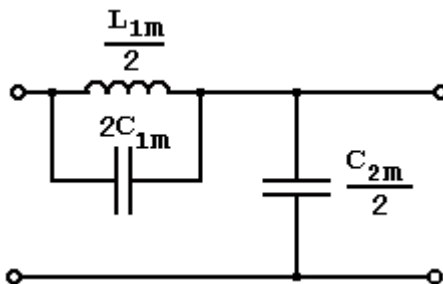


Рис. 7.15. Схема Г-образного полужвена параллельно-производного ФНЧ типа "м"

5. Рассчитаем элементы Г-образного полувзвена ФНЧ типа "м"

$$L_{1m} = m \cdot L_1 = 0.59 \cdot 0.053 = 0.031 \text{ Гн},$$

$$C_{1m} = \frac{1 - m^2}{4m} \cdot C_2 = \frac{1 - 0.59^2}{4 \cdot 0.59} \cdot 0.212 \cdot 10^{-6} = 0.059 \text{ мкФ},$$

$$C_{2m} = m \cdot C_2 = 0.59 \cdot 0.212 \cdot 10^{-6} = 0.125 \text{ мкФ}.$$

6. Находим частоты бесконечно большого ослабления звеньев ФНЧ типа "м"

$$f_{\infty} = \frac{f_c}{\sqrt{1 - m^2}} = \frac{3000}{\sqrt{1 - 0.59^2}} = 3716 \text{ Гц},$$

$$\omega_{\infty} = \frac{\omega_c}{\sqrt{1 - m^2}} = \frac{18850}{\sqrt{1 - 0.59^2}} = 23350 \text{ рад/с}.$$

7. Рассчитаем характеристическое ослабление звена ФНЧ типа "м"

7.1. При частотах $0 \leq f \leq f_c$ (полоса пропускания) $A_c = 0$.

7.2. При частотах $f_c < f < f_{\infty}$ $A_c = 2 \operatorname{arch} \frac{m\Omega}{\sqrt{|1 - (1 - m^2)\Omega^2|}}$

$$\text{Здесь } \Omega = \frac{\omega}{\omega_c} = \frac{2\pi f}{2\pi f_c} = \frac{f}{f_c}$$

7.3. При частотах $f > f_{\infty}$ $A_c = 2 \operatorname{arsh} \frac{m\Omega}{\sqrt{|1 - (1 - m^2)\Omega^2|}}$

7.4. Расчет может быть проведен также по формуле $A_c = \operatorname{arch} \left(1 + \frac{Z_{1m}}{2Z_{2m}} \right)$.

Результаты расчетов представлены в табл. 7.8.

Таблица 7.8

f, кГц	ω , крад/с	Ω	A_c , дБ	B_c , рад	$Z_{снм}$, Ом	$Z_{сгм}$, Ом
0	0	0	0	0	500	500
0.5	3.14	0.17	0	0.199	498	502
1	6.28	0.33	0	0.411	491	508
1.5	9.42	0.5	0	0.657	483	517
2	12.57	0.67	0	0.971	476	524
2.5	15.71	0.83	0	1.454	495	504
$f_c=3$	18.85	1	0	3.142	∞	0
3.5	21.99	1.17	23.45	3.142	-j93	j2687
$f_{\infty}=3.715$	23.35	1.23	∞	0	0	∞
4	25.13	1.33	25.80	0	j91	-j2751
4.5	28.27	1.5	18.66	0	j209	-j1193
5	31.42	1.67	16.40	0	j305	-j819
5.5	34.56	1.83	15.19	0	j389	-j643
6	37.7	2	14.44	0	j465	-j537

8. Рассчитаем характеристическую постоянную фазы B_c .

8.1. В полосе пропускания при $0 \leq f \leq f_c$ $B_c = 2 \arcsin \frac{m\Omega}{\sqrt{1 - (1 - m^2)\Omega^2}}$.

8.2. При частотах $f_c < f < f_\infty$ $B_c = \pi$.

8.3. При частотах $f \geq f_\infty$ $B_c = 0$

9. Характеристические сопротивления.

9.1. Для последовательно-производного звена $Z_{cпм} = R_c \frac{1 - (1 - m^2)\Omega^2}{\sqrt{1 - \Omega^2}}$

9.2. Для параллельно-производного звена $Z_{стм} = \frac{R_c \sqrt{1 - \Omega^2}}{1 - (1 - m^2)\Omega^2}$.

Результаты расчетов $Z_{cпм}$ и $Z_{стм}$ (рис. 7.16) представлены в таблице 7.8.

Задание №2. Фильтр верхних частот типа "m" имеет частоту среза $f_c = 3000$ Гц и номинальное характеристическое сопротивление $R_c = 500$ Ом, параметр $m = 0.59$ (табл.7.6). Начертить схемы и определить элементы последовательно-производного и параллельно-производного Г-образных звеньев ФВЧ типа "m". Рассчитать и построить графики $A_c(\omega)$, $B_c(\omega)$, $Z_{пм}(\omega)$, $Z_{тм}(\omega)$.

Решение

1. Изобразим схему Г-образного полувзена последовательно-производного ФВЧ типа "m" (рис.7.17)

2. Определим элементы ФНЧ-прототипа

$$C_1 = \frac{1}{4\pi f_c R_c} = \frac{1}{4 \cdot 3.14 \cdot 3000 \cdot 500} = 0.0053 \text{ мкФ}, \quad L_2 = \frac{R_c}{4\pi f_c} = \frac{500}{4 \cdot 3.14 \cdot 3000} = 0.013 \text{ Гн}$$

3. Рассчитываем элементы Г-образного полувзена последовательно-производного ФВЧ (рис. 7.17)

$$C_{1м} = \frac{C_1}{m} = 0.0586 \text{ мкФ}, \quad L_{2м} = \frac{L_2}{m} = 0.022 \text{ Гн}, \quad C_{2м} = \frac{4m}{1 - m^2} C_1 = 0.192 \text{ мкФ}.$$

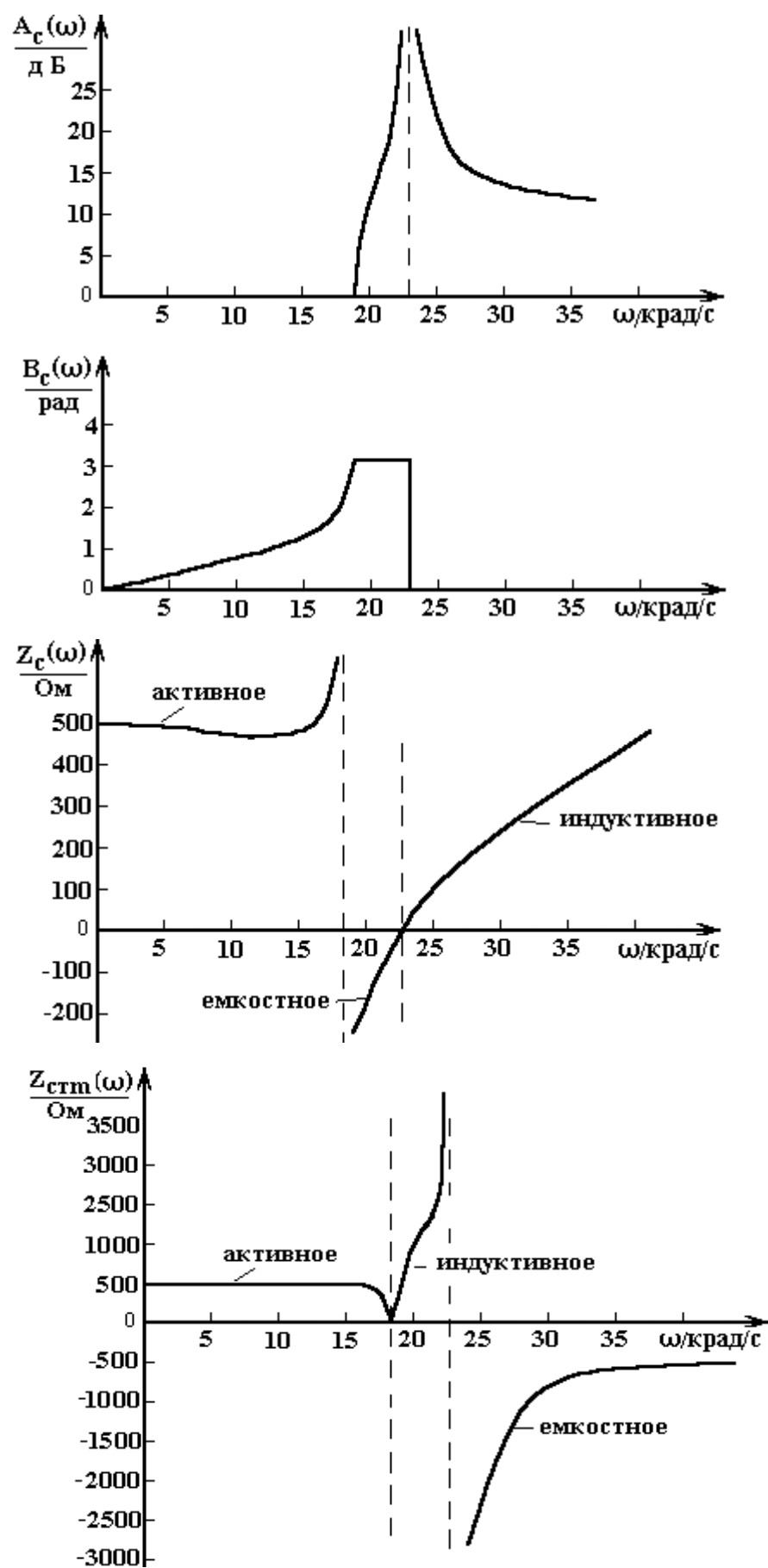


Рис. 7.16. Графики $A_c(\omega)$, $B_c(\omega)$, $Z_{cm}(\omega)$, $Z_{cim}(\omega)$ ФНЧ типа "m"

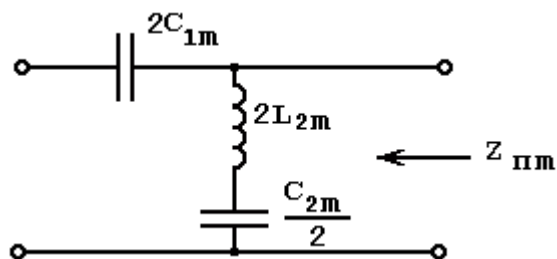


Рис. 7.17. схема Г- образного полузвена последовательно-производного ФВЧ типа "m"

4. Изобразим схему Г- образного звена параллельно-производного ФВЧ типа "m" (рис.7.18)

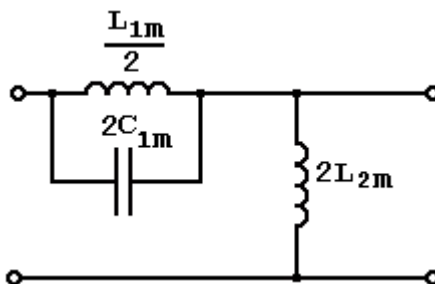


Рис. 7.18. Схема Г- образного звена параллельно-производного ФВЧ типа "m"

5. Рассчитываем элементы Г- образного полузвена параллельно-производного ФВЧ (рис.7.18)

$$C_{1m} = \frac{C_1}{m} = 0.09 \text{ мкФ}, \quad L_{1m} = \frac{4m}{1-m^2} \cdot L_2 = 0.048 \text{ Гн}, \quad C_{2m} = \frac{L_2}{m} = 0.022 \text{ Гн}.$$

6. Находим частоту бесконечно большого ослабления звеньев ФВЧ

$$f_\infty = f_c \cdot \sqrt{1-m^2} = 3000\sqrt{1-0.059^2} = 2422 \text{ Гц}, \quad \omega_\infty = 2\pi f_\infty = 15220 \text{ рад/с}$$

7. Рассчитываем характеристическое ослабление звеньев ФВЧ.

7.1. В полосе пропускания ($f_c \leq f \leq \infty$) $A_c = 0$

$$7.2. \text{ В полосе частот } f_\infty < f < f_c \quad A_c = 2\text{arch}\left(\frac{m\Omega}{|1-(1-m^2)\Omega^2|}\right)$$

$$7.3. \text{ В полосе частот } 0 \leq f < f_\infty \quad A_c = 2\text{arsh}\left(\frac{m\Omega}{|1-(1-m^2)\Omega^2|}\right)$$

7.4. Расчет A_c в полосе задерживания может быть проведен по формуле

$$A_c = \text{arch}\left(1 + \frac{Z_{1m}}{2Z_{2m}}\right)$$

Результаты расчетов представлены в таблице 7.9.

8. Рассчитываем характеристическую фазу B_c .

8.1. В полосе пропускания при $f_c \leq f < \infty$
$$B_c = 2 \arcsin \frac{m\Omega}{\sqrt{1 - (1 - m^2)\Omega^2}}$$

8.2. В полосе частот $f_\infty < f < f_c$ $B_c = -\pi$

8.3. В полосе частот $0 < f < f_\infty$ $B_c = 0$

Таблица 7.9

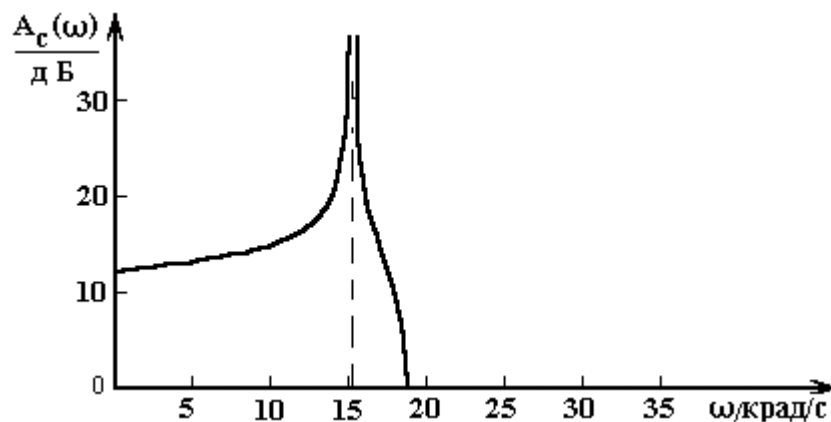
f, кГц	ω , крад/с	Ω	A_c , дБ	B_c , рад	$Z_{спп}$, Ом	$Z_{стп}$, Ом
0	0	0	11.77	0	$-j\infty$	0
0.5	3.14	0.17	12.00	0	-j1899	j131
1	6.28	0.33	12.76	0	-j860	j291
1.5	9.42	0.5	14.44	0	-j464	j538
2	12.57	0.67	18.67	0	-j209	j1198
$f_\infty=2.422$	15.22	1.24	∞	-3.142	0	∞
2.5	15.71	0.83	29.88	-3.142	j45	-j5390
$f_c=3$	18.85	1	0	-3.142	∞	0
3.5	21.99	1.17	0	-1.551	506	494
4	25.13	1.33	0	-1.178	479	522
4.5	28.27	1.5	0	-0.970	476	524
5	31.42	1.67	0	-0.832	478	522
5.5	34.56	1.83	0	-0.732	480	519
6	37.7	2	0	-0.656	483	517

9.1. Для последовательно-производного звена
$$Z_{пп} = R_c \frac{1 - (1 - m)^2 \Omega^2}{\sqrt{1 - \Omega^2}}$$

9.2. Для параллельно-производного звена
$$Z_{тп} = \frac{R(1 - \Omega^2)}{1 - (1 - m^2)\Omega^2}$$

Результаты расчетов $Z_{тп}$ и $Z_{пп}$ представлены в таблице 7.9.

10. Строим графики $A_c(\omega)$, $B_c(\omega)$, $Z_{пп}(\omega)$, $Z_{тп}(\omega)$ (рис.7.19)



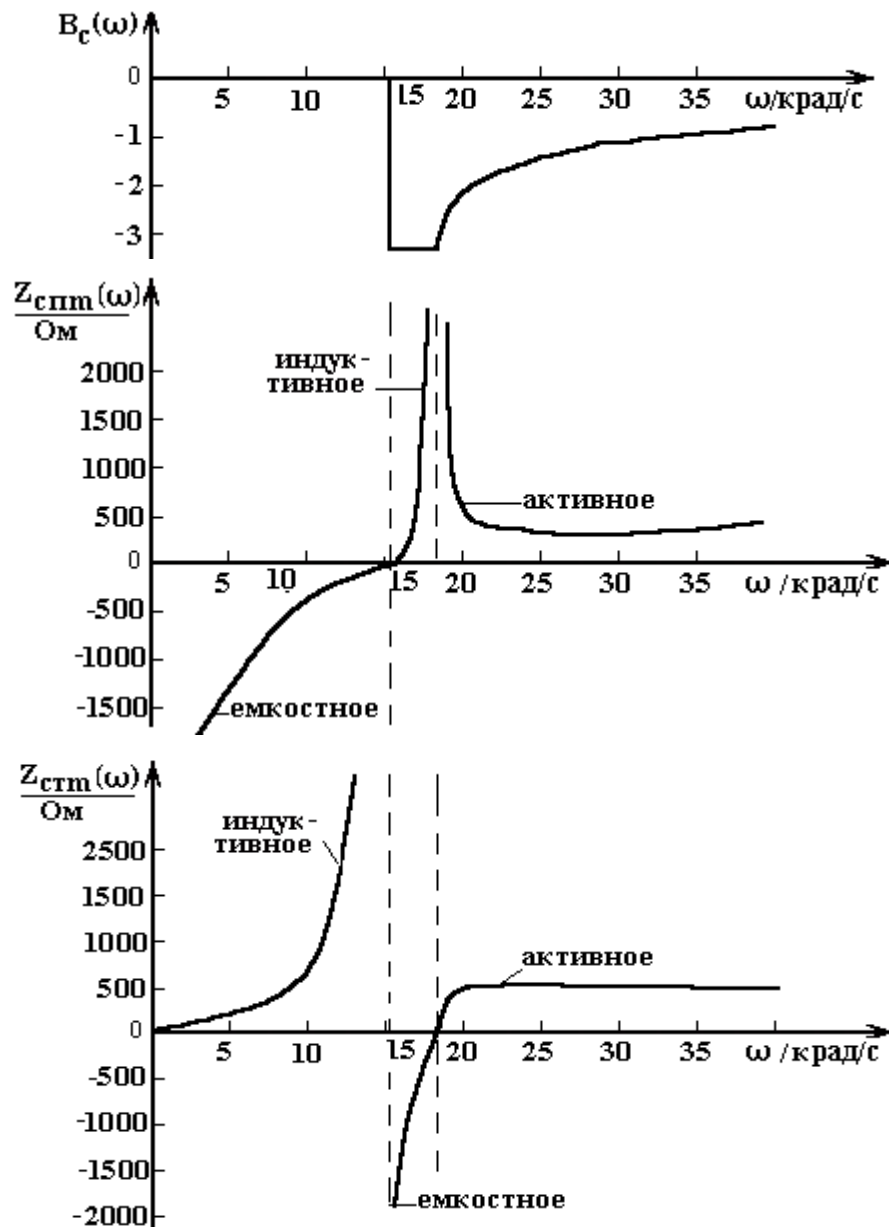


Рис.7.19. Графики $A_c(\omega)$, $B_c(\omega)$, $Z_{пп}(\omega)$, $Z_{тм}(\omega)$ ФВЧ типа "m"

Задание №3. Сложный фильтр нижних частот имеет частоту среза $f_c = 3000$ Гц, его номинальное характеристическое сопротивление $R_c = 500$ Ом (табл.7.7). Фильтр состоит из звена типа "к" и звена типа "m" ($m = 0.59$), соединенных каскадно на основе согласования характеристических сопротивлений. На входе и выходе фильтра характеристическое сопротивление должно иметь характер $Z_{пп}$. Требуется выбрать и начертить схему фильтра, рассчитать его элементы и построить график $A_c(\omega)$.

Решение

1. Составим схему сложного ФНЧ.

1.1. Так как по условию задачи на входе и выходе фильтра сопротивление имеет характер $Z_{пп}$, то сложный ФНЧ должен содержать 2 последовательно-производных полувзена типа m на входе и выходе (рис.7.20).

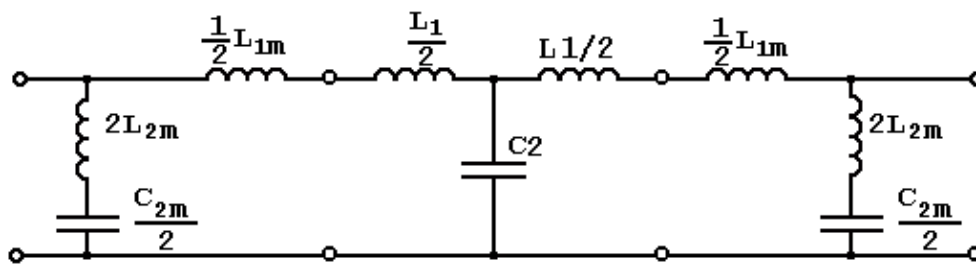


Рис. 7.20. Сложный ФНЧ

1.2. Упростим схему (рис.7.21)

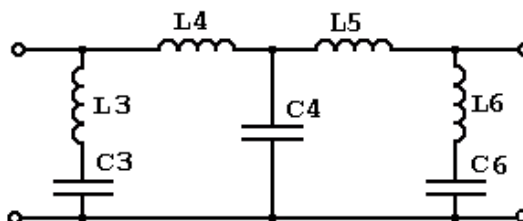


Рис. 7.21. Упрощенная схема сложного ФНЧ

2. Рассчитаем элементы сложного ФНЧ.

2.1. Элементы звена ФНЧ "к" определены в задании №1 $L_1 = 0.053$ Гн, $C_2 = 0.212$ мкФ.

2.2. Элементы последовательно-производных полузвеньев типа "m" определены при выполнении задания №1 п.3 $L_{1m} = 0.031$ Гн, $L_{2m} = 0.015$ Гн, $C_{2m} = 0.12$ мкФ

2.3. Рассчитываем элементы ФНЧ (рис. 7.21)

$$L_3 = 2L_{2m} = 2 \cdot 0.015 = 0.03 \text{ Гн}, \quad L_4 = \frac{1}{2}L_{1m} + \frac{L_1}{2} = \frac{1}{2} \cdot 0.031 + \frac{1}{2} \cdot 0.053 = 0.042 \text{ Гн},$$

$$C_4 = C_2 = 0.212 \text{ мкФ}, \quad L_5 = \frac{1}{2}L_{1m} + \frac{1}{2} \cdot 0.031 + \frac{1}{2} \cdot 0.053 = 0.042 \text{ Гн},$$

$$L_6 = 2L_{2m} = 2 \cdot 0.015 = 0.03 \text{ Гн}, \quad C_6 = \frac{1}{2}C_{2m} = \frac{1}{2} \cdot 0.125 = 0.0625 \text{ мкФ}.$$

3. Рассчитываем характеристическое ослабление сложного ФНЧ. Так как звенья соединены каскадно и условие согласования выполнено, то характеристическое ослабление сложного ФНЧ

$$A_c = 0.5A_{cm} + A_{ck} + 0.5A_{cm}$$

Здесь A_{cm} , A_{ck} – характеристические ослабления звеньев "m" (табл.7.9) и "к" (табл.7. 4).

Результаты расчетов представлены в табл. 7.10.

Таблица 7.10

f, кГц	ω , крад/с	Ω	A_{ck} , дБ	$0.5A_{cm}$, дБ	A_c , дБ
0	0	0	0	0	0
0.5	3.14	0.17	0	0	0
1	6.28	0.33	0	0	0

1.5	9.42	0.5	0	0	0
2	12.57	0.67	0	0	0
2.5	15.71	0.83	0	0	0
$f_c=3$	18.85	1	0	0	0
3.5	21.99	1.17	9.91	11.72	33.36
$f_\infty=3.716$	23.35	1.24	11.78	∞	∞
4	25.13	1.33	13.84	12.40	38.64
4.5	28.27	1.5	16.74	9.33	35.40
5	31.42	1.67	19.11	8.2	35.51
5.5	34.56	1.83	21.13	7.60	36.32
6	37.7	2	22.91	7.21	37.34

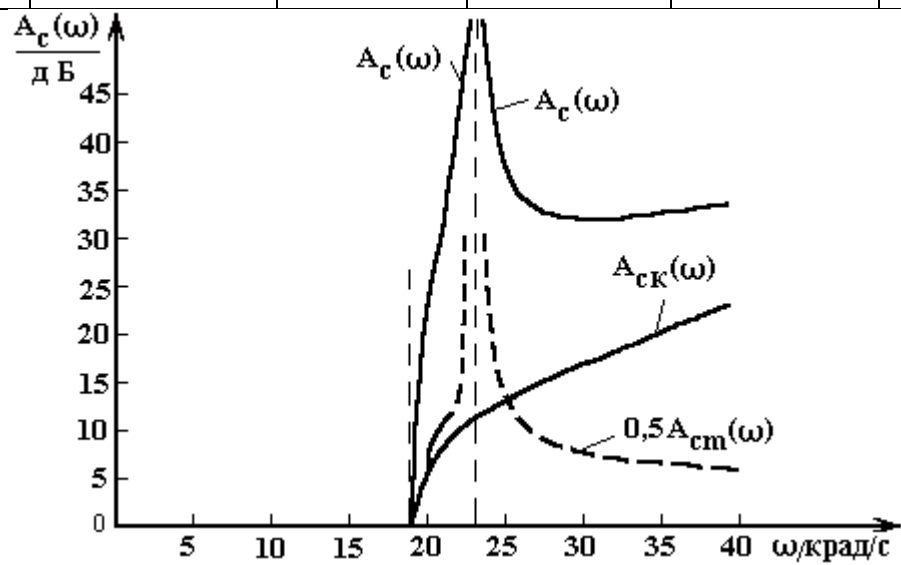


Рис. 7.22. График $A_c(\omega)$ сложного фильтра нижних частот.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крутов А.В. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 376 с. — 978-985-503-580-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67742.html>
2. Никулин В.И. Теория электрических цепей. - М.: РИОР, 2016
3. Попов В.П. Основы теории цепей. М.: Высшая школа, 2005
4. Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника.- М.: Энергоатомиздат, 1987.
5. 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
6. Немцов М.В. Электротехника и электроника: Учебник для вузов. - М.: МЭИ, 2003.
7. 6. Шебес М. Р. Задачник по теории линейных электрических цепей. - М.: Высшая школа, 1982.
8. Атабеков Г.И., Тимофеев А.Б., Хухриков С.С. Теоретические основы электротехники: Нелинейные цепи. - М.: Энергия, 1970, часть 2.
9. Черевко, А.И. Теоретические основы электротехники : учебно-методическое пособие / А.И. Черевко, М.Л. Ивлев ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова. - Архангельск : САФУ, 2015. - Ч. 2. - 94 с. : ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-261-01024-1 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=436290>
10. Рекус, Г.Г. Основы электротехники и электроники в задачах с решениями : учебное пособие / Г.Г. Рекус. - Москва : Директ-Медиа, 2014. - 344 с. - ISBN 978-5-4458-5752-5 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=233698>
11. Копылов, А.Ф. Основы теории электрических цепей: Основные понятия и определения. Методы расчета электрических цепей постоянного и переменного тока. Частотные характеристики R – L и R – C цепей : учебное пособие / А.Ф. Копылов, Ю.П. Саломатов, Г.К. Былкова ; Министерство образования и науки Российской Федерации, Сибирский Федеральный университет. - Красноярск : Сибирский федеральный университет, 2013. - Ч. 1. - 666 с. : схем., граф. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-7638-2507-7 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364029>

12. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник для вузов / Л. А. Бессонов. – 9-е изд., перераб. и доп. – М. : Гардарики, 1996. – 638 с. – ISBN 5-06-002160-2
 13. Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники : учебник для техникумов / Ф. Е. Евдокимов. – 8-е изд., стер. – М. : Высшая школа : Академия, 2001. – 496 с. : ил. – Гриф: Доп. МО. – Библиогр.: с. 492. – ISBN 5-06-003658-8
 14. 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
 15. Киреев, К. В. Теоретические основы электротехники : учеб. пособие / К. В. Киреев, В. М. Мякишев ; Самар. гос. техн. ун-т. – Самара : СГТУ, 2008. – 200 с. : ил. – Библиогр.: с. 198. – ISBN 978-5-7964-1081-3
 16. Прянишников, В. А. Теоретические основы электротехники.: Курс лекций / В. А. Прянишников. – 4-е изд. – СПб. : КОРОНА принт, 2004. – 368с. – Библиогр.: с. 366. – ISBN 5-7931-0104-7
- Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники: Учебник. Рек. МО РФ. – 9-е изд., стереотип. – М.:Изд. центр Академия,2004. – 560с. – (Среднее профессиональное образование). – с556.

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 «**Теоретические основы электротехники**»
для студентов направления подготовки /специальности
11.03.04 Электроника и нанoeлектроника
шифр и наименование направления подготовки/ специальности

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. Рекомендуемая литература	23

Введение

Целью самостоятельной работы студентов при изучении дисциплины «**Теоретические основы электротехники**» 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 «Теоретические основы электротехники»

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
3 семестр						
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-2 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2} ИД-6 _{ОПК-2} ИД-7 _{ОПК-2}	Компьютерное моделирование с использованием графических редакторов	Отчеты по лабораторным работам	Зачетное задание (контрольная точка), выполнение индивидуальных (групповых) заданий из лабораторных работ	10	2	12.00
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-2 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2} ИД-6 _{ОПК-2} ИД-7 _{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}	Самотестирование, подготовка к тестированию	Результаты контрольного компьютерного тестирования	Тестирование с помощью компьютерных тестовых заданий	2	1	3.00
Итого за семестр				22.00	5.00	27.00
4 семестр						
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-2 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2} ИД-6 _{ОПК-2} ИД-7 _{ОПК-2}	Компьютерное моделирование с использованием графических редакторов	Отчеты по лабораторным работам	Зачетное задание (контрольная точка), выполнение индивидуальных (групповых) заданий из лабораторных работ	1	1	2.00
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-2 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2} ИД-6 _{ОПК-2} ИД-7 _{ОПК-2}	Самостоятельное изучение литературы	Конспект	Собеседование, оценка ответов по вопросам заданных тем	4	1	5.00

ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1}	Самотестирование , подготовка к тестированию	Результаты контрольного компьютерного тестирования	Тестирование с помощью компьютерных тестовых заданий	1	1	2.00
Итого за семестр				15	3.00	18.00
ОПК-1 ИД-1 _{ОПК-1} ИД-2 _{ОПК-1} ИД-3 _{ОПК-1} ОПК-2 ИД-2 _{ОПК-2} ИД-5 _{ОПК-2} ИД-6 _{ОПК-2} ИД-7 _{ОПК-2}	Подготовка к экзамену	Экзамен	Оценка ответов по экзаменационны м билетам	35	1	36.00
Всего				62.50	9.50	72.00

2. План-график выполнения самостоятельной работы

Название контрольной точки Семестр 3	Срок сдачи	Номер недели учебного семестра	Вес в баллах
Методы анализа линейных электрических цепей		4	20
Линейные электрические цепи при гармонических воздействиях		8	20
Частотные и временные характеристики электрических цепей		15	15
Итого за семестр			55
Семестр 4			
Четырехполосники		4	20
Цепи с распределенными параметрами		8	20
Электрические фильтры		15	15
Итого за семестр			55

3. Контрольные точки и виды отчетности по ним

Название контрольной точки Семестр 3	Срок сдачи. Номер контрольной точки	Виды отчетности по итогам самостоятельной работы	Средства и технологии оценки
Методы анализа линейных электрических цепей		Собеседование, защита лабораторной работы	Собеседование, отчет письменный
Линейные электрические цепи при гармонических воздействиях		Собеседование, защита лабораторной работы	Собеседование, отчет письменный
Частотные и временные характеристики электрических цепей		Собеседование, защита лабораторной работы	Собеседование, отчет письменный
Семестр 4			

Четырехполюсники		Собеседование, защита лабораторной работы	Собеседование, отчет письменный
Цепи с распределенными параметрами		Собеседование, защита лабораторной работы	Собеседование, отчет письменный
Электрические фильтры		Собеседование, защита лабораторной работы	Собеседование, отчет письменный

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 рекомендуемые источники информации.

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 К ЭКЗАМЕНУ

Вопросы для проверки уровня обученности

Базовый уровень

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. Операторные 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. Расчет цепей при воздействии сигналов произвольной формы.
49. Нелинейные элементы, их характеристики
50. Уравнения электростатического и магнитостатического полей.
51. Электрические поля постоянных токов
52. Уравнения Максвелла для переменного электромагнитного поля.

Повышенный уровень

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. Критерий устойчивости Найквиста.
43. Последовательно-производные звенья фильтров типа «м».
44. Параллельно-производные звенья фильтров типа «м».
45. Частотные характеристики ФНЧ типа «м».
46. Частотные характеристики ФВЧ типа «м».
47. Условия фильтрации мостовых фильтров.
48. Схема и частотные характеристики активного RC- фильтра нижних частот второго порядка.
49. Схема и частотные характеристики активного RC- фильтра верхних частот второго порядка.
50. Схема и частотные характеристики полосового активного RC- фильтра.
51. Схема и частотные характеристики режекторного активного RC- фильтра.
52. Дискретное преобразование Лапласа.
53. Z- преобразование и его основные свойства.
54. Дискретные фильтры с бесконечной импульсной характеристикой.
55. Методы анализа нелинейных электрических цепей переменного тока.
56. Граничные условия на границе раздела двух диэлектриков, двух магнетиков.
57. Вектор Пойнтинга
58. Скин эффект

Практические задания для проверки уровня обученности

Базовый уровень

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. Первичные параметры четырехполюсников. Системы уравнений четырехполюсников.

Повышенный уровень

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.

Критерии оценивания компетенций

(в соответствии с результатами освоения дисциплины)

Критерии оценки для проверки уровня теоретической обученности:

Оценка «отлично» выставляется студенту, если он показал глубокое, прочное и аргументированное освоение программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт последовательно, четко и логически стройно, в полном исчерпывающем объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, не допущено при ответе ошибок

Оценка «хорошо» выставляется студенту, если он показал твердое знание программного учебного материала, при этом поставленный вопрос раскрыт грамотно и по существу, в достаточно полном объеме, основные категории, понятия и термины учебного курса формулировались правильно, допущены при ответе отдельные неточности или одна ошибка

Оценка «удовлетворительно» выставляется студенту, если он показал знание только основной части учебного материала без его частных деталей, при этом поставленный вопрос раскрыт с нарушением логической последовательности, не в полном объеме; были допущены неточные формулировки основных категорий, понятий и терминов учебного курса, а также ошибки (не более двух) или ряд незначительных неточностей, не исказивших существенно суть ответа.

Оценка «неудовлетворительно» выставляется студенту, который не знает значительной части программного материала, допускает существенные ошибки (более двух), существенно исказившие его суть. Оценка неудовлетворительно выставляется также, если отсутствует ответ на вопрос, либо студент отказался его сдавать.

Критерии оценки для проверки практической обученности:

оценка «отлично» выставляется, если он продемонстрировал высокое умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, свободно без затруднений справился с поставленной задачей, показав владение разносторонними приемами и навыками ее выполнения, не допустил ошибок и неточностей;

оценка «хорошо» выставляется, если он продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, справился с поставленной задачей, показав владение необходимыми приемами и навыками ее выполнения, при этом допустил не более одной ошибки;

оценка «удовлетворительно» выставляется, если он продемонстрировал посредственное умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, с трудом справился с поставленной задачей, при этом допустил не более двух ошибок;

оценка «неудовлетворительно» выставляется, если он не продемонстрировал умение применять полученные знания на практике через решение конкретной задачи, не справился с поставленной задачей или допустил при ее решении три и более серьезные ошибки.

7. Рекомендуемая литература

7.1. Основная литература:

- 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
- 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

7.2. Дополнительная литература:

- 1 Акулиничев, Ю. П. Теория и техника передачи информации Электронный ресурс : Учебное пособие / Ю. П. Акулиничев, А. С. Бернагдт. - Томск : Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Эль Контент, 2012. - 210 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-4332-0035-7
- 2 Вадутов, О. С. Математические основы обработки сигналов. Практикум Электронный ресурс : Учебное пособие / О. С. Вадутов. - Томск : Томский политехнический университет, 2014. - 102 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 2227-8397
- 3 Радиотехнические цепи и сигналы. Лабораторный практикум Электронный ресурс : Учебное пособие / В. Я. Баскей [и др.] ; ред. А. Н. Яковлев. - Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2014. - 113 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-7782-2395-0
- 4 Умняшкин, С. В. Основы теории цифровой обработки сигналов Электронный ресурс : Учебное пособие / С. В. Умняшкин. - Москва : Техносфера, 2018. - 528 с. - Книга находится в премиум-версии ЭБС IPR BOOKS. - ISBN 978-5-94836-508-4
- 5 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

7.3. Методическая литература:

- 1 Никулин В.И. Теоретические основы электротехники: Методические указания к лабораторным работам.- Ставрополь: СКФУ, 2022.
- 2 Никулин В.И. Теоретические основы электротехники: Методические указания к практическим занятиям. - Ставрополь: СКФУ, 2022.
- 3 Практическая электротехника: основы электротехники с использованием MATLAB/Simulink / В.М. Рябенский. - Архангельск : САФУ, 2014. - 414 с. - ISBN 978-5-261-00970-2

7.4. Интернет-ресурсы:

1. <http://catalog.ncstu.ru> – электронные каталоги Ассоциации электронных библиотек учебных заведений и организаций СКФО;
2. <http://window.edu.ru> – Информационная система "Единое окно доступа к образовательным ресурсам".
3. <http://www.vsy-electrotehnika.ru>
4. <http://www.ielectro.ru/products.html>: Новинки электротехники.