



**Некоммерческое
акционерное
общество**

**АЛМАТИНСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ЭНЕРГЕТИКИ И
СВЯЗИ ИМЕНИ
ГУМАРБЕКА
ДАУКЕЕВА**

Кафедра электротехники

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания и задания к выполнению курсовой работы
для студентов, обучающихся по образовательной программе
6В07108 – «Автоматизация и управление»

Алматы 2022

Составители: Баймаганов А.С., Креслина С.Ю., Аршабекова А.Т. ТООЭ.
Методические указания и задания к выполнению курсовой работы для студентов, обучающихся по образовательной программе 6В07108 – «Автоматизация и управление» – Алматы: АУЭС, 2022. – 29 с.

Методические указания к выполнению курсовой работы содержат три задания по основным разделам дисциплины ТООЭ.

Каждая задача содержит задание и методические указания. Студент получает индивидуальный набор исходных данных, который выбирается по двум последним цифрам номера транскрипта и по первой букве фамилии.

Методическая разработка предназначена для студентов, обучающихся по образовательной программе 6В07108 – «Автоматизация и управление».

Ил. – 14, табл. – 10, библиограф. – 6 назв.

Рецензент: магистр, ст. преп. каф. «АУ»

Л.Н. Рудакова

Печатается по плану издания некоммерческого акционерного общества «Алматинский университет энергетики и связи» на 2022 г.

© НАО «Алматинский университет энергетики и связи», 2022 г.

Содержание

Введение	4
1 Задача № 1. Расчёт линейной электрической цепи синусоидального тока	5
1.1 Задание.....	5
1.2 Варианты исходных данных	5
1.3 Методические указания	8
2 Задача № 2. Расчёт переходных процессов	12
2.1 Задание.....	12
2.2 Варианты исходных данных	12
2.3 Методические указания	14
3 Задача № 3. Применение теории четырёхполюсников	21
3.1 Задание.....	21
3.2 Варианты исходных данных	21
3.3 Методические указания	24
Приложение А	28
Список литературы	29

Введение

Методические указания и задания к выполнению курсовой работы являются составной частью комплекса методической литературы по дисциплине: «Теоретические основы электротехники» по образовательной программе БВ07108 – «Автоматизация и управление».

Курсовая работа содержит три задания по основным разделам дисциплины ТОЭ: «Методы расчёта линейных электрических цепей однофазного синусоидального тока», «Методы расчёта переходных процессов в линейных электрических цепях» и «Применение теории четырёхполюсников к расчёту режимов линейных электрических цепей однофазного синусоидального тока».

Каждое задание имеет несколько вариантов исходных данных. Вариант исходных данных студент выбирает по последней и предпоследней цифрам своего номера транскрипта, а также по первой букве фамилии, с учётом года поступления (чётный или нечётный).

Каждое задание студенты получают, выполняют и сдают по отдельности, в соответствии с графиком выдачи и приёма заданий, который приведен в Силлабусе дисциплины.

Правила выполнения и оформления отчетов по заданиям курсовой работы

Каждый студент самостоятельно готовит отчет по отдельным заданиям курсовой работы. При выполнении и оформлении отчёта максимально использовать компьютерные приложения, такие как Word, Excel, SMath Studio и т. д.

Отчет должен содержать титульный лист и следующие разделы:

- исходные данные, схемы исследуемых цепей;
- задание;
- необходимые расчеты и графики;
- выводы по результатам работы;
- список использованной литературы.

Отчёты оформляются и сдаются в электронном виде в приложении Word, размер листа А4 (210×297 мм). При отправке файла в «Учебный портал» можно использовать формат PDF. Преподаватель может попросить и распечатанный вариант отчёта.

Примерная форма титульного листа приведена в Приложении А.

1 Задача № 1. Расчёт линейной электрической цепи синусоидального тока

Цель выполнения задания: приобрести навыки расчёта линейных электрических цепей различными методами с применением комплексных чисел, а также построения векторных и топографических диаграмм.

1.1 Задание

Для схемы своего варианта с заданными параметрами выполнить:

1. Записать систему уравнений для расчёта токов во всех ветвях по законам Кирхгофа в дифференциальной и комплексной формах.
2. Записать систему уравнений в комплексной форме по методу контурных токов и дополнительные уравнения для расчёта токов во всех ветвях по найденным контурным токам.
3. Записать систему уравнений в комплексной форме по методу узловых потенциалов и дополнительные уравнения для расчёта токов во всех ветвях по закону Ома для участка цепи.
4. Записать уравнение баланса комплексных мощностей источников и нагрузки.
5. Рассчитать комплексные значения токов во всех ветвях методом, указанным в таблице 1.1, проверить результаты расчёта подстановкой в уравнение баланса мощностей.
6. Рассчитать комплексные значения напряжений на элементах первой ветви;
7. Рассчитать потенциалы всех точек между элементами первой ветви, приняв потенциал одного из узлов, к которым подключена ветвь, равным нулю.
8. Построить топографическую диаграмму напряжений на элементах первой ветви, совместив её с векторной диаграммой тока \dot{I}_1 .
9. По топографической диаграмме найти комплексное значение напряжения, приложенного к ветви.

1.2 Варианты исходных данных

Вариант исходных данных студент выбирает по последней и предпоследней цифрам номера транскрипта, а также по первой букве фамилии, с учётом года поступления (чётный или нечётный).

Таблица 1.1 – Варианты данных по последней цифре номера транскрипта

Год поступления	Последняя цифра номера транскрипта									
	Чётный	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Нечётный	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Схема №	1.10	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9
Метод расчёта	МКТ	МУП	МКТ	МУП	МКТ	МУП	МКТ	МУП	МКТ	МУП
$R_1, \text{ Ом}$	50	45	35	25	20	75	60	40	55	70
$R_2, \text{ Ом}$	75	70	60	55	50	45	40	35	25	20
$X_{L3}, \text{ Ом}$	50	20	10	30	40	35	25	15	45	55
$X_{L4}, \text{ Ом}$	15	45	35	55	25	10	50	40	30	20
$X_{C3}, \text{ Ом}$	70	60	50	40	30	20	75	55	45	35
$X_{C4}, \text{ Ом}$	25	35	45	55	15	20	40	30	50	60

Таблица 1.2 – Варианты данных по предпоследней цифре номера транскрипта

Год поступления	Предпоследняя цифра номера транскрипта									
	Чётный	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Нечётный	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$R_3, \text{ Ом}$	40	50	60	70	80	90	45	55	65	30
$X_{L1}, \text{ Ом}$	15	20	25	30	10	35	45	40	55	50
$X_{L2}, \text{ Ом}$	55	45	35	25	15	50	40	30	20	10
$X_{C1}, \text{ Ом}$	10	20	15	25	30	40	35	45	50	55
$X_{C2}, \text{ Ом}$	65	15	40	45	10	15	20	25	30	35

Таблица 1.3 – Варианты данных по первой букве фамилии

Год поступления	Первая буква фамилии									
	Чётный	А, Б, В	Г, Д, Е	Ж, З, И, О	К, Л, М, Ё	Н, О, П, Қ	Р, С, Т, Ў	У, Ф, Х, У	Ч, Ш, Щ, Ф	Э, Ю, Ц, Џ
Нечётный	Я, Э, Ё	Э, Ю, Ц, Џ	Ч, Ш, Щ, Ф	У, Ф, Х, У	Р, С, Т, Ў	Н, О, П, Қ	К, Л, М, Ё	Ж, З, И, О	Г, Д, Е	А, Б, В
$E_1, \text{ В}$	10	15	20	25	30	45	40	45	50	55
φ_{E1}	30°	45°	60°	90°	-90°	-30°	-60°	-45°	180°	0°
$E_4, \text{ В}$	75	70	60	55	50	45	40	35	25	20
φ_{E4}	180°	0°	-30°	-45°	30°	60°	45°	30°	60°	-60°
$E_5, \text{ В}$	25	40	35	50	15	10	45	20	55	30
φ_{E5}	-30°	-45°	-60°	-90°	180°	0°	60°	30°	90°	30°
$J, \text{ А}$	0,15	0,20	0,10	0,30	0,22	0,17	0,25	0,35	0,12	0,33
φ_j	0°	30°	45°	-30°	60°	60°	30°	60°	-90°	90°

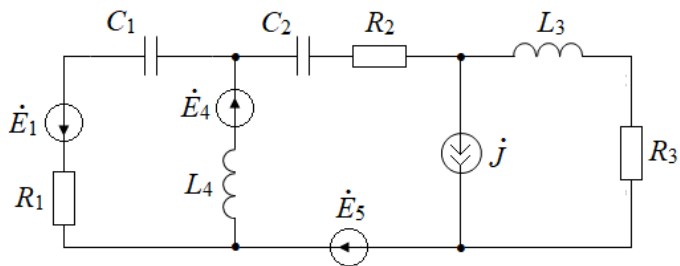


Схема 1.1

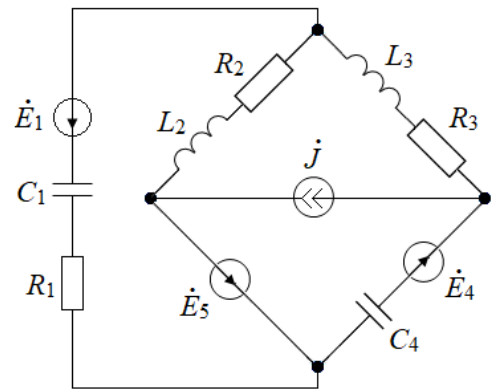


Схема 1.2

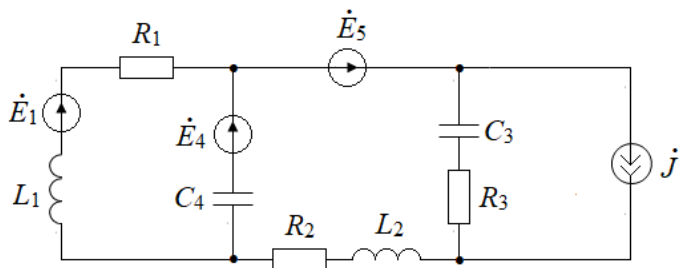


Схема 1.3

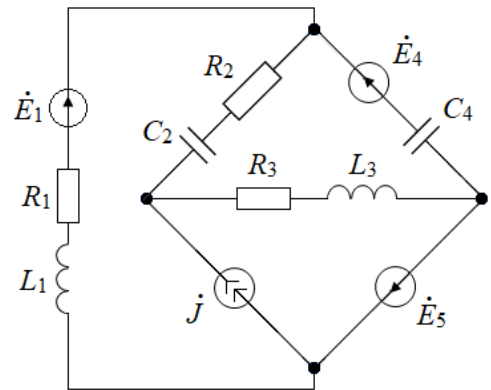


Схема 1.4

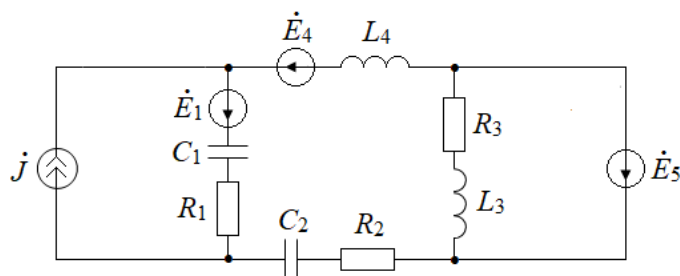


Схема 1.5

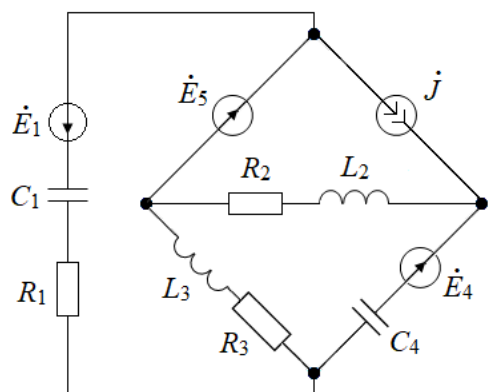


Схема 1.6

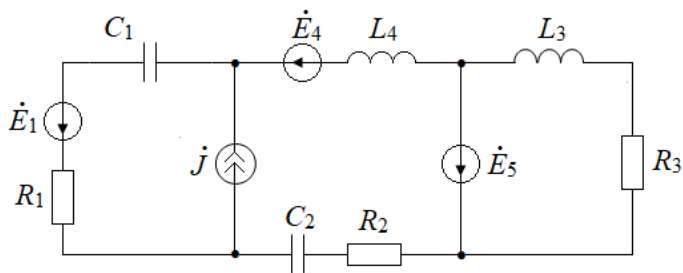


Схема 1.7

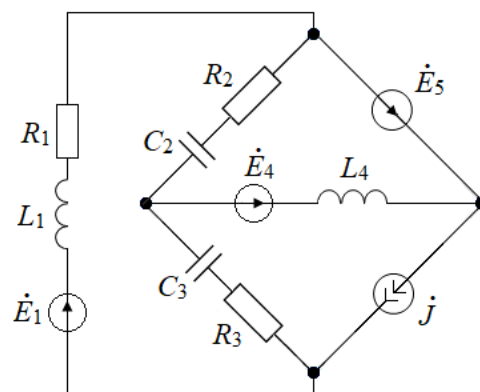


Схема 1.8

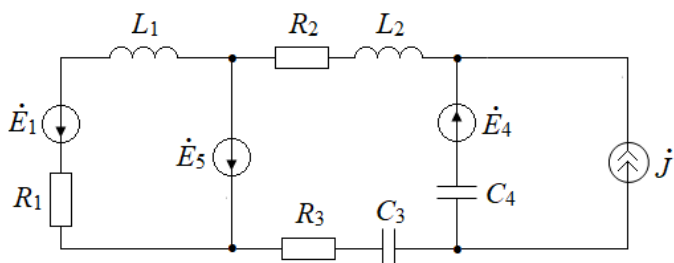


Схема 1.9

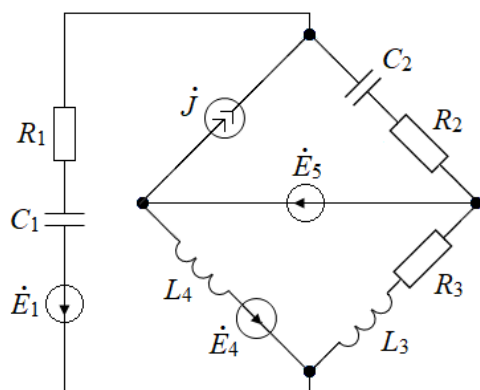


Схема 1.10

Рисунок 1.1 – Варианты схем синусоидального тока

1.3 Методические указания

Рассмотрим пример расчета комплексных действующих значений токов и напряжений на элементах схемы, представленной на рисунке 1.2, а).

Исходные данные:

$$\begin{aligned} \dot{E}_1 &= 50 \cdot e^{j30^\circ} \text{ В}, \dot{E}_3 = 40 \cdot e^{-j30^\circ} \text{ В}, \dot{E}_5 = 30 \cdot e^{j60^\circ} \text{ В}, j = 0.16 \cdot e^{-j45^\circ} \text{ А}; \\ R_1 &= 30 \text{ Ом}, R_2 = 40 \text{ Ом}, R_4 = 50 \text{ Ом}, X_{L_1} = 40 \text{ Ом}, X_{L_3} = 45 \text{ Ом}, \\ X_{L_4} &= 25 \text{ Ом}, X_{C_1} = 10 \text{ Ом}, X_{C_2} = 20 \text{ Ом}. \end{aligned}$$

Сначала пронумеруем узлы и выберем произвольно направления токов в ветвях схемы, как показано на рисунке 1.2, а), а также, направления обхода трёх независимых контуров схемы, как показано на рисунке 1.2, б). *Направления токов* нужны, чтобы определять знак токов ветвей при записи уравнений *по первому закону Кирхгофа*, а *направления обхода контуров* нужны чтобы определять знак напряжений на элементах схемы при записи уравнений *по второму закону Кирхгофа*.

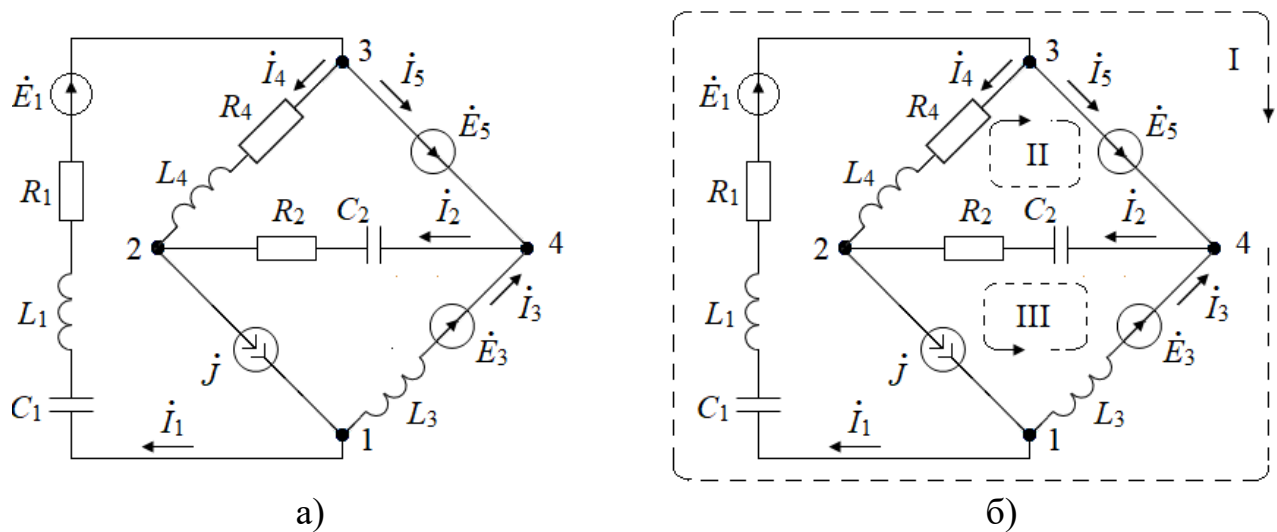


Рисунок 1.2 – Направления токов в ветвях и направления обхода контуров

Системы уравнений для расчёта токов во всех ветвях схемы по законам Кирхгофа в дифференциальной и в комплексной формах записи:

$$\left\{ \begin{array}{l} j - i_1 - i_3 = 0 \\ i_2 + i_4 - j = 0 \\ i_1 - i_4 - i_5 = 0 \\ \frac{1}{C_1} \int i_1 dt + L_1 \frac{di_1}{dt} + i_1 \cdot R_1 - L_3 \frac{di_3}{dt} = e_1 + e_5 - e_3 \\ \frac{1}{C_2} \int i_2 dt + i_2 \cdot R_2 - L_4 \frac{di_4}{dt} - i_4 \cdot R_4 = e_5 \end{array} \right. \quad \text{и} \quad \left\{ \begin{array}{l} j - i_1 - i_3 = 0 \\ i_2 + i_4 - j = 0 \\ i_1 - i_4 - i_5 = 0 \\ i_1 \cdot \underline{Z}_1 - i_3 \cdot \underline{Z}_3 = \dot{E}_1 + \dot{E}_5 - \dot{E}_3 \\ i_2 \cdot \underline{Z}_2 - i_4 \cdot \underline{Z}_4 = \dot{E}_5 \end{array} \right.$$

где комплексные сопротивления ветвей схемы:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + jX_{L_1} - jX_{C_1} = 30 + j30 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - jX_{C_2} = 40 - j20 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_3 = jX_{L_3} = j45 \text{ Ом},$$

$$\underline{Z}_4 = R_4 + jX_{L_4} = 50 + j25 \text{ Ом},$$

Рассмотрим расчёт методом контурных токов (МКТ). Сначала выберем направления контурных токов, как показано на рисунке 1.3, а). Важно помнить, что через ветвь с источником тока желательно провести только один контурный ток в направлении источника тока. В этом случае контурный ток будет известен, это значит, что для него не надо писать уравнение, и он равен по величине току источника тока. Для двух неизвестных контурных токов: \dot{I}_{11} , который проходит по внешнему контуру схемы, и \dot{I}_{22} – по внутреннему контуру, запишем систему уравнений в комплексной форме по методу

контурных токов в общем виде и с подстановкой числовых значений:

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} \cdot (\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3) + \dot{I}_{22} \cdot 0 = \dot{E}_1 + \dot{E}_5 - \dot{E}_3 + \underline{J} \cdot \underline{Z}_3 \\ \dot{I}_{11} \cdot 0 + \dot{I}_{22} \cdot (\underline{Z}_2 + \underline{Z}_4) = \dot{E}_5 - \underline{J} \underline{Z}_2 \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} \dot{I}_{11}(30 + j75) = 81.32e^{j69.3^\circ} \\ \dot{I}_{22}(90 + j5) = 35.16e^{j68.8^\circ} \end{cases}$$

Решение системы уравнений по МКТ даёт комплексные действующие значения контурных токов: $\dot{I}_{11} = 1.007e^{j1.1^\circ}$ А и $\dot{I}_{22} = 0.39e^{j65.6^\circ}$ А.

Токи в ветвях схемы найдём как алгебраическую сумму контурных токов, протекающих по каждой из ветвей схемы:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 = \dot{I}_{11} = 1.007e^{j1.1^\circ} \text{ А}, \quad \dot{I}_2 = \underline{J} + \dot{I}_{22} = 0.366e^{j41.4^\circ} \text{ А}, \quad \dot{I}_3 = \underline{J} - \dot{I}_{11} = 0.903e^{-j171.6^\circ} \text{ А}, \\ \dot{I}_4 = -\dot{I}_{22} = 0.390 \cdot e^{j-114.4^\circ} \text{ А}, \quad \dot{I}_5 = \dot{I}_{11} + \dot{I}_{22} = 1.226 \cdot e^{j17.8^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

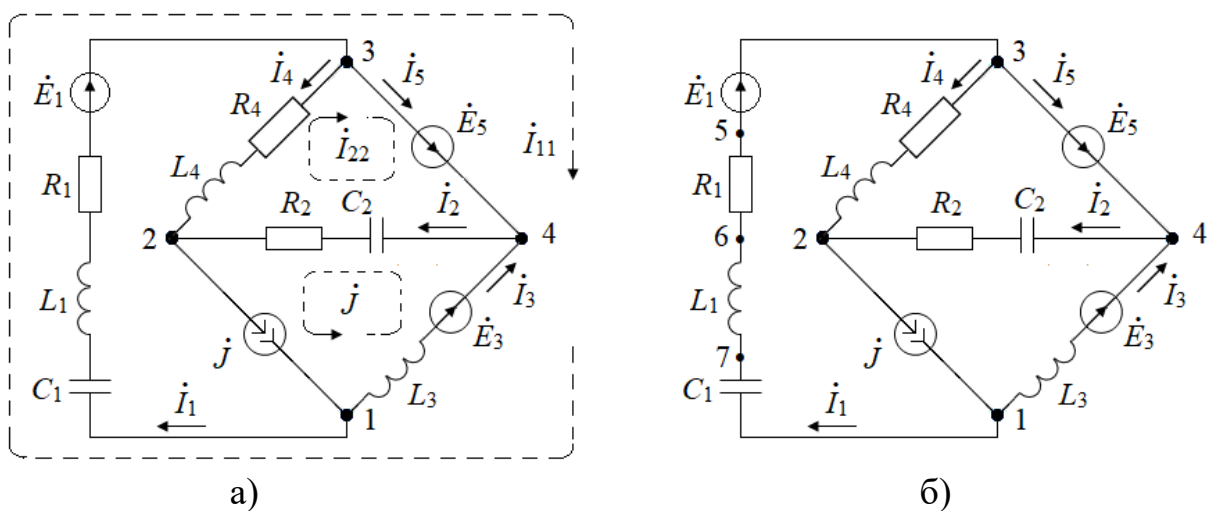


Рисунок 1.3 – Направления контурных токов и точки на первой ветви

Рассмотрим расчёт методом узловых потенциалов (МУП). Сначала выберем узел, потенциал которого примем равным нулю. Пятая ветвь состоит только из идеального источника напряжения с ЭДС \dot{E}_5 , сопротивление этой ветви равно нулю, поэтому удобно *принять равным нулю (заземлить)* потенциал одного из узлов, к которым присоединена эта ветвь, это узлы 3 и 4. Примем $\dot{\phi}_3 = 0$, тогда потенциал другого узла $\dot{\phi}_4 = \dot{\phi}_3 + \dot{E}_5 = 30e^{j60^\circ}$ В.

Для расчёта неизвестных потенциалов $\dot{\phi}_1$ и $\dot{\phi}_2$ запишем систему уравнений по методу узловых потенциалов в общем виде и с подстановкой числовых значений: $\dot{\phi}_1 = 14.85e^{j157^\circ}$ В, $\dot{\phi}_2 = 21.80e^{j92^\circ}$ В

$$\begin{cases} \dot{\phi}_1(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_3) - \dot{\phi}_2 \cdot 0 = \underline{J} - \dot{E}_1 \cdot \underline{Y}_1 - \dot{E}_3 \cdot \underline{Y}_3 + \dot{\phi}_4 \cdot \underline{Y}_3 \\ \dot{\phi}_1 \cdot 0 + \dot{\phi}_2(\underline{Y}_2 + \underline{Y}_4) = -\underline{J} + \dot{\phi}_4 \cdot \underline{Y}_2 \end{cases} \quad \text{и} \quad \begin{cases} \dot{\phi}_1 \cdot 0.0423e^{-j66.8^\circ} = 0.6284e^{j90.3^\circ} \\ \dot{\phi}_2 \cdot 0.0361e^{j3.18^\circ} = 0.7861e^{j95.3^\circ} \end{cases}$$

где комплексные проводимости ветвей схемы найдём по формулам:

$$\underline{Y}_1 = 1/\underline{Z}_1 = 0.0167 - j0.0167, \quad \underline{Y}_2 = 1/\underline{Z}_2 = 0.02 + j0.01, \quad \underline{Y}_3 = 1/\underline{Z}_3, \quad \underline{Y}_4 = 1/\underline{Z}_4.$$

Решение системы уравнений по МУП даёт комплексные действующие значения потенциалов первого и второго узлов схемы: $\dot{\varphi}_1 = 14.85e^{j157^\circ}$ В и $\dot{\varphi}_2 = 21.80e^{j92^\circ}$ В.

Далее рассчитаем комплексные действующие значения токов во всех ветвях схемы по закону Ома для участка цепи, за исключением тока \dot{I}_5 . Ток \dot{I}_5 в ветви без сопротивления с идеальным источником напряжения с ЭДС \dot{E}_5 найдём из уравнения по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_3 + \dot{E}_1) \cdot \underline{Y}_1 = 1.007 \cdot e^{j1.1^\circ} \text{ А}, & \dot{I}_2 &= (\dot{\varphi}_4 - \dot{\varphi}_2) \cdot \underline{Y}_2 = 0.366 \cdot e^{j41.4^\circ} \text{ А}, \\ \dot{I}_3 &= (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_4 + \dot{E}_3) \underline{Y}_3 = 0.9e^{-j172^\circ} \text{ А}, & \dot{I}_4 &= -\dot{\varphi}_2 \underline{Y}_4 = 0.39e^{j-114^\circ} \text{ А}, & \dot{I}_5 &= \dot{I}_1 - \dot{I}_4 = 1.23e^{j18^\circ} \text{ А}. \end{aligned}$$

Уравнение баланса мощностей источников и нагрузки: $\tilde{S}_{нагр} = \tilde{S}_{ист}$, где комплексные мощности источников и нагрузки рассчитаем по формулам:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{ист} &= \dot{E}_1 I_1^* + \dot{E}_3 I_3^* + \dot{E}_5 I_5^* + (\dot{\varphi}_1 - \dot{\varphi}_2) J^* = 43.369 + j68.242 \text{ ВА}; \\ \tilde{S}_{нагр} &= I_1^2 \underline{Z}_1 + I_2^2 \underline{Z}_2 + I_3^2 \underline{Z}_3 + I_4^2 \underline{Z}_4 = 43.368 + j68.243 \text{ ВА}. \end{aligned}$$

Рассмотрим построение топографической диаграммы потенциалов точек между элементами первой ветви, которые показаны на рисунке 1.3, б). Сначала рассчитаем потенциалы этих точек, приняв потенциал узла 3 равным нулю:

$$\begin{aligned} \dot{\varphi}_3 &= 0, & \dot{\varphi}_5 &= \dot{\varphi}_3 - \dot{E}_1 = -50e^{j30^\circ} \text{ В}, & \dot{\varphi}_6 &= \dot{\varphi}_5 + \dot{U}_{R1} = \dot{\varphi}_5 + 30.2e^{j1.1^\circ} = 27.72e^{-j118^\circ} \text{ В}, \\ \dot{\varphi}_7 &= \dot{\varphi}_6 + \dot{U}_{L1} = \dot{\varphi}_6 + 40.3e^{j91.1^\circ} = 21.06e^{j131^\circ} \text{ В}, & \dot{\varphi}_1 &= \dot{\varphi}_7 + \dot{I}_1 \cdot (-jX_{C1}) = 14.85e^{j157^\circ} \text{ В}. \end{aligned}$$

Затем выберем масштабы по напряжению $m_u = 5$ В/см и по току $m_i = 0,2$ А/см и построим топографическую диаграмму напряжений на элементах первой ветви, совмещённую с векторной диаграммой тока ветви \dot{I}_1 .

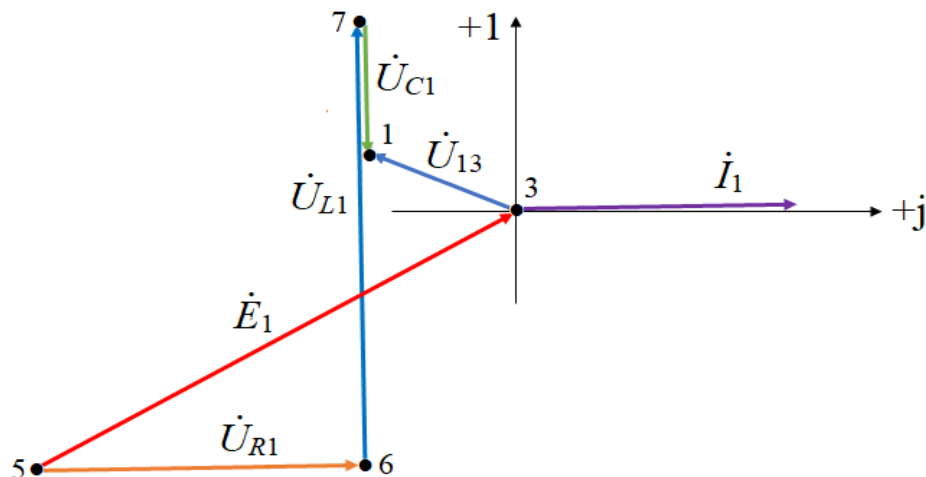


Рисунок 1.4 – Топографическая диаграмма потенциалов точек первой ветви

2 Задача № 2. Расчёт переходных процессов

Цель выполнения задания: приобрести навыки расчёта переходных процессов в линейных электрических цепях классическим и операторным методами.

2.1 Задание

Для схемы своего варианта с заданными параметрами рассчитать мгновенные значения тока в индуктивности или напряжения на ёмкости в переходном процессе двумя методами: классическим и операторным. Построить график мгновенных значений найденной функции времени.

2.2 Варианты исходных данных

Таблица 2.1 – Варианты данных по последней цифре номера транскрипта

Год поступления	Последняя цифра номера транскрипта									
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Чётный	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Нечётный	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Схема №	2.10	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
R_1 , Ом	140	10	12	9	120	15	20	100	150	10
L , мГн	5	10	27	15	22	12	17	7	25	20

Таблица 2.2 – Варианты данных по предпоследней цифре номера транскрипта

Год поступления	Предпоследняя цифра номера транскрипта									
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Чётный	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Нечётный	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R_2 , Ом	10	150	130	110	5	140	30	120	150	5
C , мкФ	1,5	2,0	2,5	3,0	1,0	0,75	1,25	2,25	1,75	2,75

Таблица 2.3 – Варианты данных по первой букве фамилии

Год поступления	Первая буква фамилии									
	А, Б, В	Г, Д, Е	Ж, З, И, Ё	К, Л, М, Ђ	Н, О, П, Қ	Р, С, Т, Ў	У, Ф, Х, Ү	Ч, Ш, Щ, Ф	Э, Ю, Ц, Ѓ	Я, Ә, І
Чётный	А, Б, В	Г, Д, Е	Ж, З, И, Ё	К, Л, М, Ђ	Н, О, П, Қ	Р, С, Т, Ў	У, Ф, Х, Ү	Ч, Ш, Щ, Ф	Э, Ю, Ц, Ѓ	Я, Ә, І
Нечётный	Я, Ә, І	Э, Ю, Ц, Ѓ	Ч, Ш, Щ, Ф	У, Ф, Х, Ү	Р, С, Т, Ў	Н, О, П, Қ	К, Л, М, Ђ	Ж, З, И, Ё	Г, Д, Е	А, Б, В
E_0 , В	90	75	65	70	60	45	40	45	50	55
R_3 , Ом	12	25	10	27	22	17	60	30	7	15
Найти	$u_C(t)$	$i_L(t)$	$u_C(t)$	$i_L(t)$	$u_C(t)$	$i_L(t)$	$u_C(t)$	$i_L(t)$	$u_C(t)$	$i_L(t)$

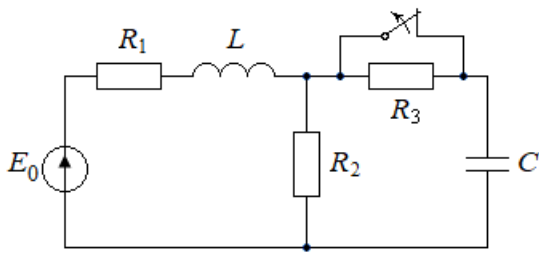


Схема 2.1

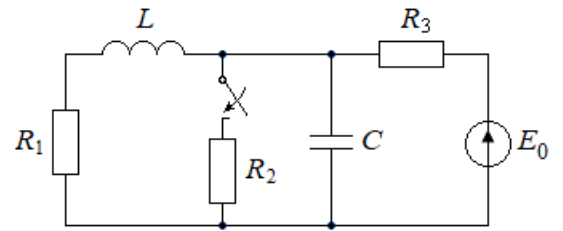


Схема 2.2

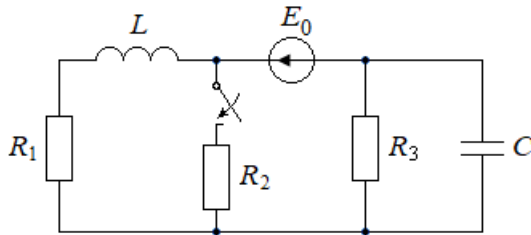


Схема 2.3

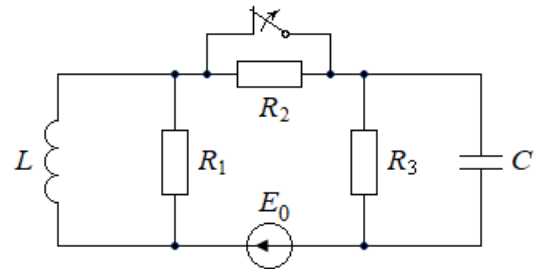


Схема 2.4

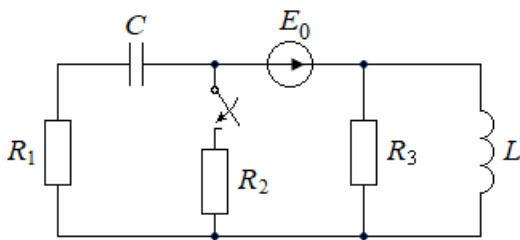


Схема 2.5

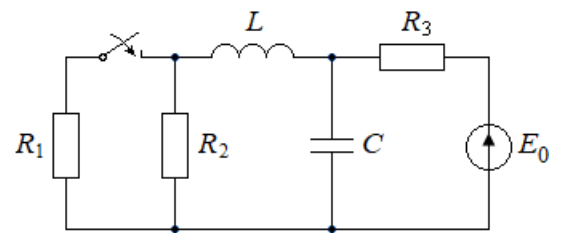


Схема 2.6

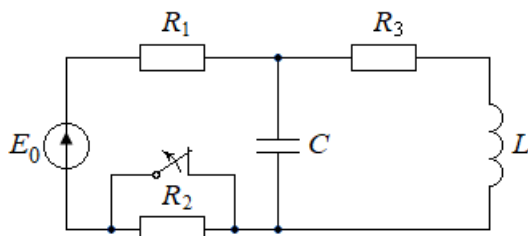


Схема 2.7

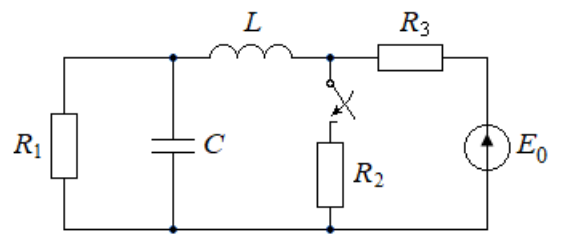


Схема 2.8

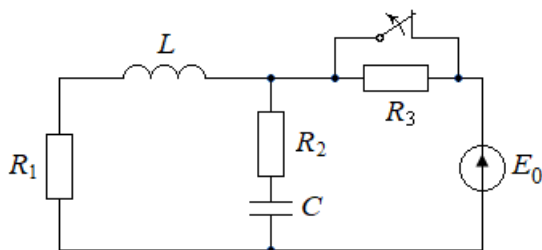


Схема 2.9

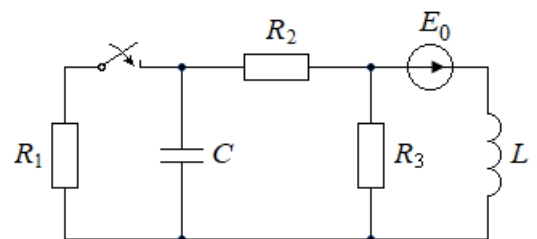


Схема 2.10

Рисунок 2.1 – Варианты схем для расчёта переходного процесса

2.3 Методические указания

Классический метод расчёта позволяет рассчитать функцию времени тока или напряжения в переходном процессе после коммутации в линейной электрической цепи. Рекомендуется следующий порядок расчёта:

1. Расчёт независимых начальных условий $i_L(0)$ и $u_C(0)$ по схеме до коммутации, при $t = 0-$.

2. Расчёт зависимых начальных условий $u_L(0)$, $i_C(0)$ и других по схеме после коммутации, при $t = 0+$. Для расчёта удобно использовать схему, в которой следует заменить конденсатор идеальным источником напряжения с ЭДС, равной $u_C(0)$, а индуктивность – идеальным источником тока с током $i_L(0)$.

3. Расчёт принужденной составляющей искомой функции времени по схеме после коммутации при $t = \infty$.

4. Составление характеристического уравнения цепи, например методом входного сопротивления $Z(p) = 0$, нахождение его корней и запись соответствующего выражения для свободной составляющей искомой функции времени (общее решение ОДУ).

5. Расчёт постоянных интегрирования A_1 и A_2 или A и Ψ .

Рассмотрим пример расчёта классическим методом тока в конденсаторе в переходном процессе, возникающем после коммутации (после размыкания ключа в рассматриваемом примере) в линейной электрической цепи, схема которой представлена на рисунке 2.2.

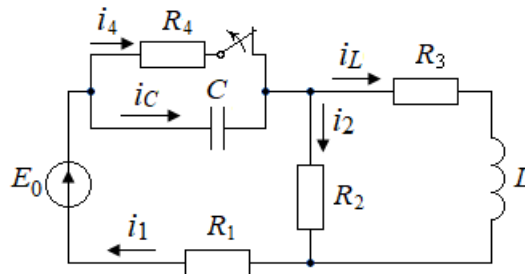


Рисунок 2.2 – Схема примера расчёта тока $i_C(t)$ в переходном процессе

Исходные данные: $E_0 = 100$ В, $L = 10$ мГн, $C = 45$ мкФ,
 $R_1 = 20$ Ом, $R_2 = 100$ Ом, $R_3 = 10$ Ом, $R_4 = 50$ Ом.

1. Расчёт независимых начальных условий $i_L(0)$ и $u_C(0)$ по схеме до коммутации, ключ ещё не разомкнулся, при $t = 0-$.

Составим систему уравнений по законам Кирхгофа:

$$\begin{cases} i_1 - i_C - i_4 = 0 \\ i_1 - i_2 - i_L = 0 \\ i_1 \cdot R_1 + i_4 \cdot R_4 + i_2 \cdot R_2 = E_0 \\ i_4 \cdot R_4 - u_C = 0 \\ i_L \cdot R_3 + u_L - i_2 \cdot R_2 = 0 \end{cases}$$

До коммутации в цепи установившийся режим, поэтому все токи и напряжения имеют такой же характер, как и источник, то есть постоянные, поэтому ток в ёмкости i_C и напряжение на индуктивности u_L равны нулю:

$$i_C = C \frac{du_C}{dt} = 0 \quad \text{так как} \quad u_C(t) = const;$$

$$u_L = L \frac{di_L}{dt} = 0 \quad \text{так как} \quad i_L(t) = const.$$

С учётом этого из системы уравнений можно рассчитать токи $i_1 = i_4$:

$$i_1 = i_4 = \frac{E_0}{R_1 + R_4 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{100}{79.09} = 1.2644 \text{ А}.$$

Ток в индуктивности $i_L(0)$ найдём по формуле разброса токов по двум параллельным ветвям:

$$i_L(0) = i_1 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 1.2644 \cdot \frac{100}{110} = 1.1494 \text{ А}.$$

Напряжение на ёмкости конденсатора $u_C(0)$:

$$u_C(0) = i_4 R_4 = 1.2644 \times 50 = 63.2184 \text{ В}.$$

2. Расчёт зависимых начальных условий $u_L(0)$, $i_C(0)$ и других по схеме после коммутации, при $t = 0+$.

По законам коммутации ток в ветви с индуктивностью и напряжение на ёмкости в первый момент времени после коммутации имеют те же значения, что и в последний момент перед коммутацией, то есть не изменяются скачком:

$$i_L(0+) = i_L(0-) \quad \text{и} \quad u_C(0+) = u_C(0-).$$

Таким образом, на основании законов коммутации можно заменить конденсатор идеальным источником напряжения с ЭДС, равной $u_C(0)$, а индуктивность – идеальным источником тока с током, равным $i_L(0)$, получим схему, представленную на рисунке 2.3.

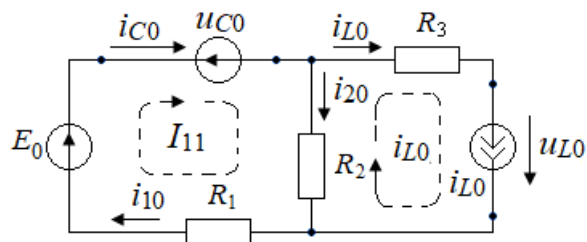


Рисунок 2.3 – Схема для расчёта зависимых начальных условий

Ток $i_C(0)$ можно найти методом контурных токов (направления контурных токов показаны на схеме) или решая систему уравнений по законам Кирхгофа:

$$\begin{cases} i_C(0) - i_2(0) - i_4(0) = 0 \\ i_C(0) \cdot R_1 + i_2(0) \cdot R_2 = E_0 - u_C(0). \\ i_L(0) \cdot R_3 + u_L(0) - i_2(0) \cdot R_2 = 0 \end{cases}$$

$$i_C(0) = \frac{E_0 - u_C(0) - i_L(0) \cdot R_2}{R_1 + R_2} = 1.2644 \text{ A};$$

$$i_2(0) = i_C(0) - i_L(0) = 0.1149 \text{ A} \quad \text{и} \quad u_L(0) = i_2(0) \cdot R_2 - i_L(0) \cdot R_3 = 0.$$

Первая производная тока в первый момент времени после коммутации:

$$\frac{di_C}{dt}(0) = \frac{E_0 - \frac{du_C}{dt}(0) - \frac{di_L}{dt}(0) \cdot R_2}{R_1 + R_2} = -4214.2644 \text{ A/c},$$

где:

$$\frac{du_C}{dt}(0) = \frac{i_C(0)}{C} = \frac{1.2644}{2.5 \cdot 10^{-6}} = 505750 \text{ В/с} \quad \text{и} \quad \frac{di_L}{dt}(0) = \frac{u_L(0)}{L} = 0.$$

3. Расчёт принужденной составляющей $i_{Cnp}(t)$ по схеме после коммутации при $t = \infty$.

В установившемся режиме все токи и напряжения имеют такой же характер, как и источник, то есть постоянные, поэтому ток в ёмкости i_{Cnp} равен нулю:

$$i_{Cnp} = C \frac{du_{Cnp}}{dt} = 0 \quad \text{так как} \quad u_{Cnp}(t) = const.$$

4. Составим характеристическое уравнение цепи методом входного сопротивления $Z(p) = 0$.

Для этого в схеме после коммутации источники заменим их внутренними сопротивлениями, то есть вместо ЭДС E_0 установим переключку, так как внутреннее сопротивление идеального источника напряжения равно нулю. Операторные сопротивления индуктивности и ёмкости получают из их комплексных сопротивлений путём замены множителя $j\omega$ на p :

$$X_L = j\omega \cdot L \Rightarrow p \cdot L \quad \text{и} \quad X_C = \frac{1}{j\omega \cdot C} \Rightarrow \frac{1}{p \cdot C}.$$

В полученной схеме разрывают любую ветвь, например ветвь с индуктивностью, как показано на рисунке 2.4, и входное операторное

сопротивление цепи $Z(p)$, найденное относительно выводов обрыва, приравнивают к нулю.

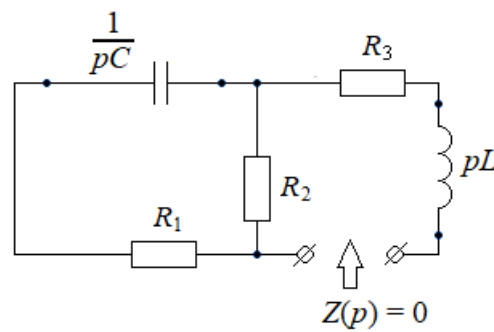


Рисунок 2.4 – Схема для составления характеристического уравнения $Z(p) = 0$

Таким образом получают характеристическое уравнение цепи:

$$Z(p) = p \cdot L + R_3 + \frac{R_2 \cdot \left(R_1 + \frac{1}{p \cdot C} \right)}{R_2 + R_1 + \frac{1}{p \cdot C}} = 0;$$

$$\Downarrow$$

$$p^2 LC(R_1 + R_2) + p[L + C(R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3)] + R_2 + R_3 = 0.$$

Корни характеристического уравнения получились комплексно-сопряжённые:

$$p_1 = -3000 + j5259.9113, \frac{1}{c} \quad \text{и} \quad p_2 = -3000 - j5259.9113, \frac{1}{c}.$$

В этом случае свободная составляющая тока $i_{C_{св}}(t)$ (общее решение ОДУ):

$$i_{C_{св}}(t) = A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega_{св} \cdot t + \psi), \quad \text{где} \quad \alpha = 3000 \frac{1}{c} \quad \text{и} \quad \omega_{св} = 5259.9 \frac{\text{рад}}{c}.$$

5. Расчёт постоянных интегрирования A и Ψ .

Для расчёта двух постоянных интегрирования необходимо составить систему двух уравнений:

$$\begin{cases} i_C(0) = 1.2644 \text{ A} \\ \frac{di_C}{dt}(0) = -4214.2644 \text{ A/c} \end{cases}$$

Выразим ток и его первую производную через неизвестные постоянные интегрирования. Ток в конденсаторе:

$$i_C(t) = i_{C_{np}}(t) + i_{C_{св}}(t) = A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega_{св} \cdot t + \psi) \quad \text{так как} \quad i_{C_{np}}(t) = 0;$$

$$i_C(0) = A \cdot \sin \psi.$$

Первая производная тока в конденсаторе:

$$\frac{di_C}{dt}(t) = -\alpha \cdot A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \sin(\omega_{c\phi} \cdot t + \psi) + \omega_{c\phi} \cdot A \cdot e^{-\alpha t} \cdot \cos(\omega_{c\phi} \cdot t + \psi);$$

$$\frac{di_C}{dt}(0) = -\alpha \cdot A \cdot \sin \psi + \omega_{c\phi} \cdot A \cdot \cos \psi.$$

Подставим полученные выражения в систему двух уравнений и решив её, найдём постоянные интегрирования A и Ψ :

$$\begin{cases} A \cdot \sin \psi = 1.2644 \text{ A} \\ -\alpha \cdot A \cdot \sin \psi + \omega_{c\phi} \cdot A \cdot \cos \psi = -4214.2644 \text{ A/c} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} A \cdot \sin \psi = 1.2644 \text{ A} \\ A \cdot \cos \psi = -0.0801 \text{ A} \end{cases}$$

Постоянные интегрирования A и Ψ :

$$A = \sqrt{(A \cdot \sin \psi)^2 + (A \cdot \cos \psi)^2} = \sqrt{(1.2644)^2 + (-0.0801)^2} = 1.2669 \text{ A};$$

$$\psi = \arccos\left(\frac{A \cdot \cos \psi}{A}\right) = \arccos\left(\frac{-0.0801}{1.2669}\right) = 93.62^\circ.$$

Результат расчёта классическим методом, ток в конденсаторе в переходном процессе после коммутации:

$$i_C(t) = 1.2669 \cdot e^{-3000t} \cdot \sin(5259.9113 \cdot t + 93.62^\circ), \text{ A}.$$

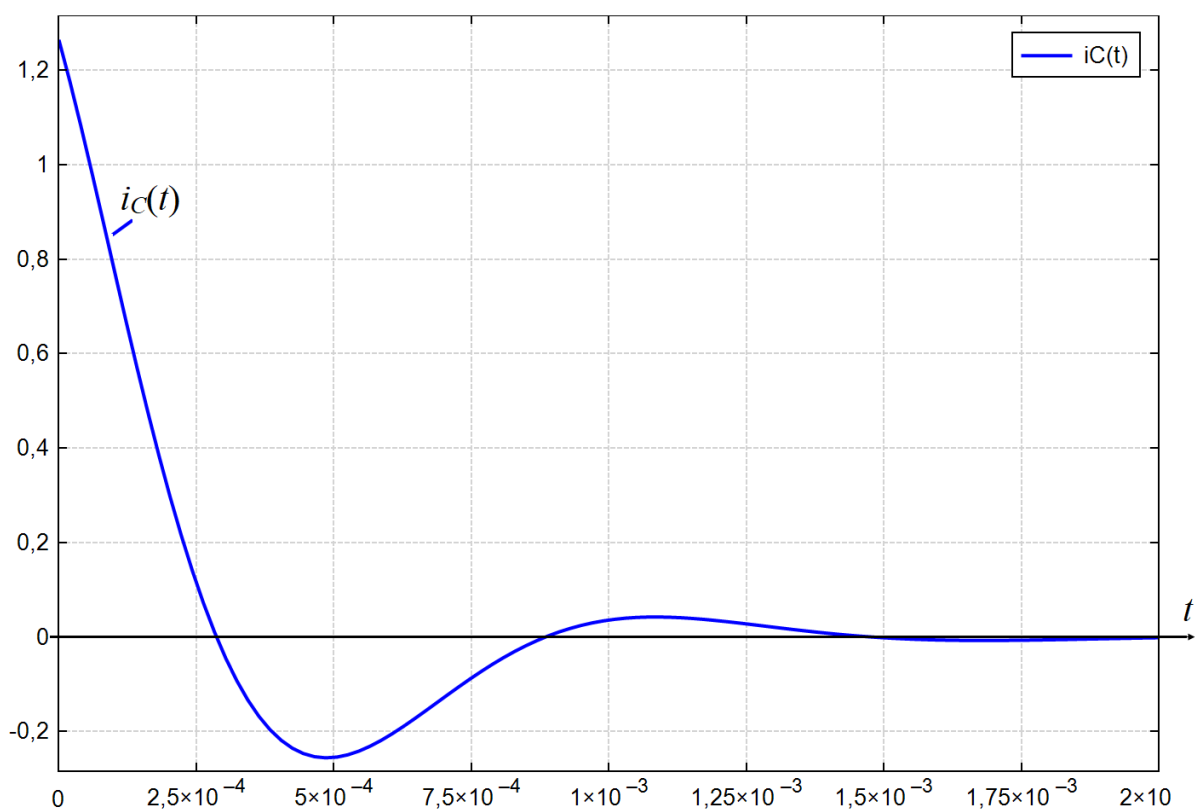


Рисунок 2.5 – График тока в конденсаторе в переходном процессе

Операторный метод позволяет применить методы расчёта установившихся режимов к расчёту изображения тока или напряжения в переходном процессе после коммутации в линейной электрической цепи.

Рекомендуется следующий порядок расчёта:

1. Расчёт независимых начальных условий $i_L(0)$ и $u_C(0)$ по схеме до коммутации, при $t = 0-$.
2. Составление операторной схемы замещения цепи и определение изображения искомого тока или напряжения.
3. Нахождение оригинала искомого тока или напряжения.

Рассмотрим пример расчёта операторным методом тока в конденсаторе в переходном процессе в цепи, схема которой представлена на рисунке 2.2.

1. Первый пункт расчёта такой же, как и в классическом методе, будем использовать найденные там начальные условия:

$$i_L(0) = 1.1494 \text{ А} \text{ и } u_C(0) = 63.2184 \text{ В}.$$

2. Составим операторную схему замещения цепи, схема приведена на рисунке 2.6.

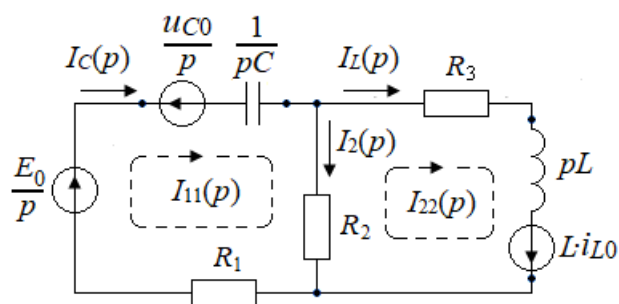


Рисунок 2.6 – Операторная схема замещения цепи

Определим изображение тока в конденсаторе в переходном процессе методом контурных токов. Система уравнений по МКТ:

$$\begin{cases} I_{11}(p) \cdot \left(R_2 + R_1 + \frac{1}{p \cdot C} \right) - I_{22}(p) \cdot R_2 = \frac{E_0}{p} - \frac{u_C(0)}{p} \\ -I_{11}(p) \cdot R_2 + I_{22}(p) \cdot (R_2 + R_3 + p \cdot L) = L \cdot i_L(0) \end{cases}$$

Изображение первого контурного тока:

$$I_{11}(p) = \frac{C \cdot [pL \cdot (E_0 - u_C(0) + R_2 \cdot i_L(0)) + (E_0 - u_C(0))(R_2 + R_3)]}{p^2 LC \cdot (R_2 + R_1) + p \cdot [L + C \cdot (R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3)] + R_2 + R_3} = \frac{F_1(p)}{F_2(p)}$$

Изображение тока в конденсаторе:

$$I_C(p) = I_{11}(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)},$$

где:

$$F_1(p) = C \cdot [pL \cdot (E_0 - u_C(0) + R_2 \cdot i_L(0)) + (E_0 - u_C(0))(R_2 + R_3)];$$

$$F_2(p) = p^2 LC \cdot (R_2 + R_1) + p \cdot [L + C \cdot (R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3)] + R_2 + R_3.$$

3. Найдём оригинал тока в конденсаторе. Для этого применим теорему разложения. Сначала найдём корни уравнения $F_2(p) = 0$, которое является аналогом характеристического уравнения классического метода:

$$p^2 LC \cdot (R_2 + R_1) + p \cdot [L + C \cdot (R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3)] + R_2 + R_3 = 0;$$

$$p^2 \cdot 3 \cdot 10^{-6} + p \cdot 0.018 + 110 = 0;$$

$$p_1 = -3000 + j5259.9113 \quad \text{и} \quad p_2 = -3000 - j5259.9113;$$

$$\alpha = 3000 \frac{1}{c} \quad \text{и} \quad \omega_{ce} = 5259.9 \frac{pad}{c}.$$

По виду полученного в предыдущем пункте изображения тока $I_C(p)$ запишем его оригинал, то есть функцию $i_C(t)$:

$$i_C(t) = 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} \cdot e^{p_1 t} \right\} = 2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} \cdot e^{(-\alpha + j\omega_{ce})t} \right\};$$

$$i_C(t) = 2 \left| \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} \right| \cdot e^{-\alpha t} + \cos \left(\omega_{ce} t + \arg \left(\frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} \right) \right);$$

$$i_C(t) = 2 \left| \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} \right| \cdot e^{-\alpha t} + \sin \left(\omega_{ce} t + \arg \left(\frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} \right) + \frac{\pi}{2} \right).$$

После подстановки числовых значений получим:

$$F_1(p_1) = -0.0013 + j0.02; \quad F_2'(p_1) = \frac{dF_2(p)}{dp} = j0.0316; \quad \left| \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} \right| = 0.6335 \text{ A};$$

$$2 \cdot \left| \frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} \right| = 1.2669 \text{ A}; \quad \arg \left(\frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} \right) = 3.62^\circ \quad \arg \left(\frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} \right) + \frac{\pi}{2} = 93.62^\circ.$$

Выражение для функции времени тока в конденсаторе в переходном процессе:

$$i_C(t) = 1.2669 \cdot e^{-3000t} \cdot \sin(5259.9113 \cdot t + 93.62^\circ), \text{ A}.$$

Результаты расчёта классическим и операторным методами полностью совпадают. Оба метода имеют свои преимущества и недостатки.

График функции тока в конденсаторе $i_C(t)$ в переходном процессе представлен на рисунке 2.5.

3 Задача № 3. Применение теории четырёхполюсников

Цель выполнения задания: приобрести навыки расчёта параметров четырёхполюсника по заданной схеме, расчёта параметров эквивалентного четырёхполюсника при различных видах их соединения и расчёта комплексных мощностей источника и нагрузки в схеме с четырёхполюсником.

3.1 Задание

Даны два четырёхполюсника, для первого из них задана схема и значения сопротивлений, а для второго заданы параметры. Схемы первого четырёхполюсника, значения его сопротивлений, параметры второго четырёхполюсника, вид их соединения, напряжение U_2 и сопротивление нагрузки R_H заданы для каждого варианта в таблицах, приведённых ниже.

На входе эквивалентного четырёхполюсника подключен источник синусоидального напряжения (источник питания), а на выходе – активное сопротивление нагрузки R_H , как показано на рисунке 3.1.

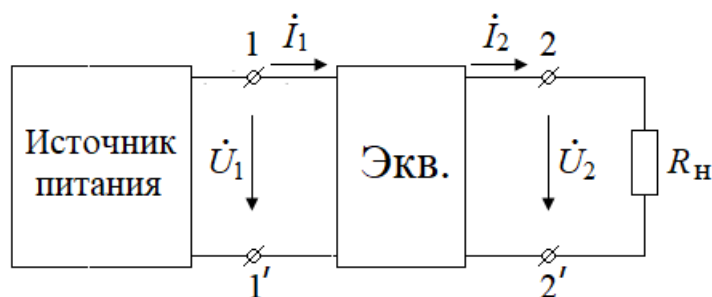


Рисунок 3.1 – Схема цепи с четырёхполюсником

Необходимо выполнить следующее:

1. Рассчитать параметры первого четырёхполюсника, необходимые при определении параметров эквивалентного четырёхполюсника в зависимости от вида соединения. Проверить результаты расчёта.
2. Нарисовать схему соединения двух четырёхполюсников согласно варианту и рассчитать параметры эквивалентного четырёхполюсника.
3. Рассчитать мощность источника и нагрузки в схеме на рисунке 3.1

3.2 Варианты исходных данных

Для вида соединения четырёхполюсников приняты следующие сокращения:

- Каскадное соединение – Каск.
- Последовательное соединение – Посл.
- Параллельное соединение – Парал.
- Последовательно-параллельное соединение – Посл.-парал.
- Параллельно-последовательное соединение – Парал.-посл.

Таблица 3.1 – Варианты данных по последней цифре номера транскрипта

Год поступления	Последняя цифра номера транскрипта									
	Чётный	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Нечётный	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вид соединения	Каск.	Посл.	Парал.	Посл.- парал.	Парал.- посл.	Каск.	Посл.	Парал.	Посл.- парал.	Парал.- посл.
$X_L, \text{Ом}$	15	10	16	18	12	10	20	24	25	14
$Z_{11}, \text{Ом}$		$20 - j3$					$15 + j10$			
$Z_{12}, \text{Ом}$		$j18$					-15			
$Z_{21}, \text{Ом}$		$-j18$					15			
$Z_{22}, \text{Ом}$		$j18$					$-15 + j20$			
$Y_{11}, 1/\text{Ом}$			$0.05 - j0.05$					$0.02 - j0.06$		
$Y_{12}, 1/\text{Ом}$			-0.05					$-0.04 + j0.02$		
$Y_{21}, 1/\text{Ом}$			0.05					$0.04 - j0.02$		
$Y_{22}, 1/\text{Ом}$			$-0.05 - j0.05$					$-0.08 - j0.06$		
$H_{11}, \text{Ом}$	$2 + j16$			$10 + j10$					$8 + j16$	
H_{12}	$0.8 + j0.4$			$0.5 + j0.5$					$0.2 + j0.4$	
H_{21}	$0.8 + j0.4$			$0.5 + j0.5$					$0.2 + j0.4$	
$H_{22}, 1/\text{Ом}$	$-0.08 - j0.04$			$-0.025 - j0.075$					$-0.02 - j0.04$	
$G_{11}, 1/\text{Ом}$					0.05	$0.04 - j0.08$				$0.05 - j0.05$
G_{12}					$0.5 - j0.5$	$0.2 - j0.4$				$0.5 - j0.5$
G_{21}					$0.5 - j0.5$	$0.2 - j0.4$				$0.5 - j0.5$
$G_{22}, \text{Ом}$					$-5 + j5$	$-4 + j8$				$-5 + j15$

Таблица 3.2 – Варианты данных по предпоследней цифре номера транскрипта

Год поступления	Предпоследняя цифра номера транскрипта									
	Чётный	9	8	7	6	5	4	3	2	1
Нечётный	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$X_C, \text{Ом}$	25	15	16	18	10	12	20	14	22	24
φ_{U2}	-30°	-45°	-60°	-90°	180°	0°	60°	30°	90°	30°

Таблица 3.3 – Варианты данных по первой букве фамилии

Год поступления	Первая буква фамилии									
	А, Б, В	Г, Д, Е	Ж, З, И, Ё	К, Л, М, Н	О, П, Қ	Р, С, Т, Ў	У, Ф, Х, Ү	Ч, Ш, Щ, Ф	Э, Ю, Ц, Џ	Я, Ә, І
Чётный	А, Б, В	Г, Д, Е	Ж, З, И, Ё	К, Л, М, Н	О, П, Қ	Р, С, Т, Ў	У, Ф, Х, Ү	Ч, Ш, Щ, Ф	Э, Ю, Ц, Џ	Я, Ә, І
Нечётный	Я, Ә, І	Э, Ю, Ц, Џ	Ч, Ш, Щ, Ф	У, Ф, Х, Ү	Р, С, Т, Ў	О, П, Қ	К, Л, М, Н	Ж, З, И, Ё	Г, Д, Е	А, Б, В
№ схемы I-го четырехпал.	2.10	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9
$U_2, В$	75	70	60	55	50	45	40	35	25	20
$R, Ом$	15	10	18	16	25	24	14	22	12	21
$R_{н}, Ом$	10	20	15	25	16	18	12	14	24	8

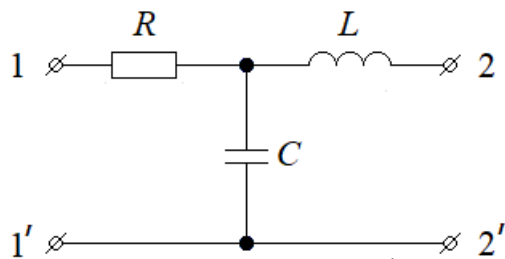


Схема 3.1

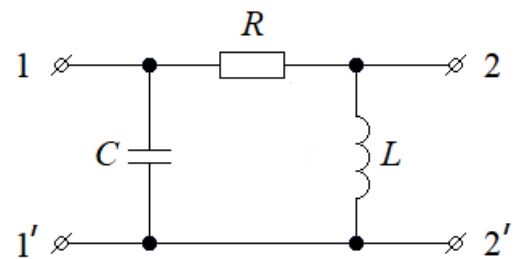


Схема 3.2

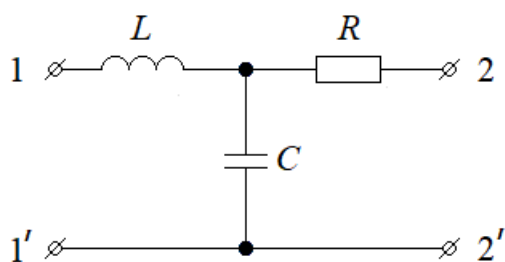


Схема 3.3

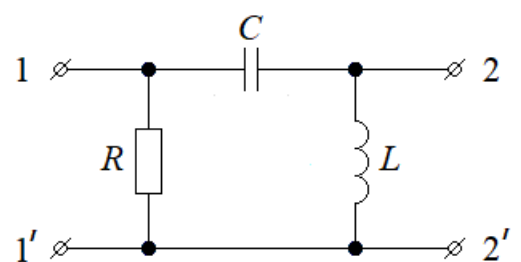


Схема 3.4

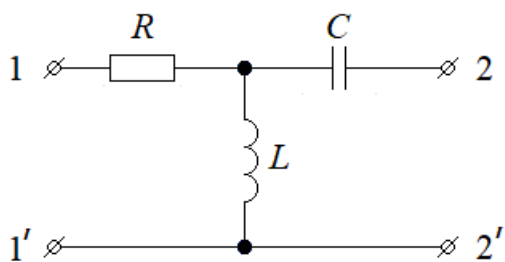


Схема 3.5

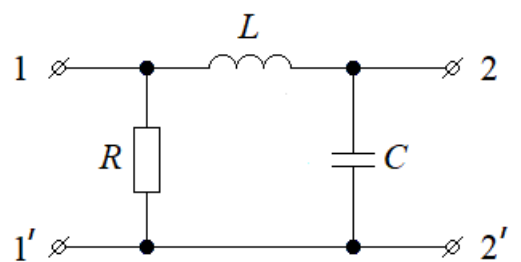


Схема 3.6

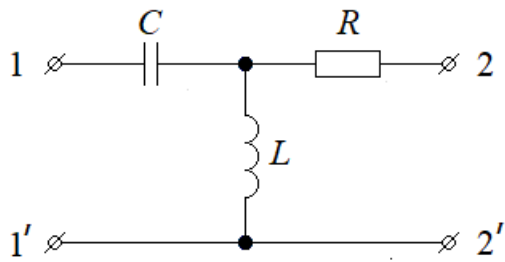


Схема 3.7

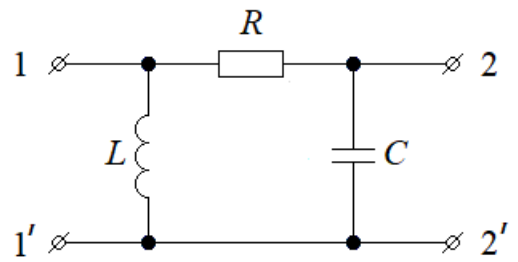


Схема 3.8

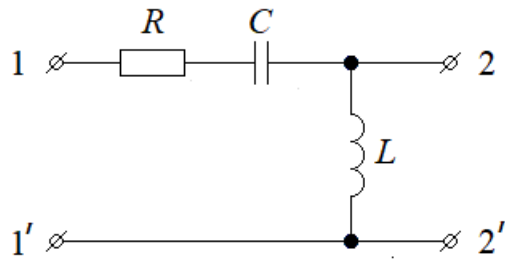


Схема 3.9

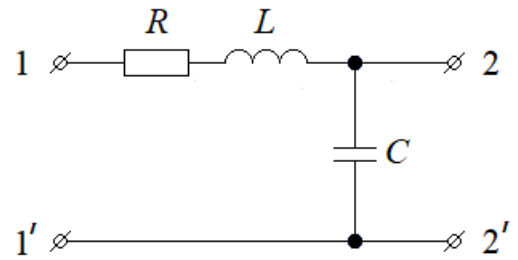


Схема 3.10

Рисунок 3.2 – Варианты схем первого четырёхполюсника

3.3 Методические указания

Рассмотрим расчёт A -параметров четырёхполюсника с использованием режимов холостого хода и короткого замыкания на примере Π -образной схемы, представленной на рисунке 3.3.

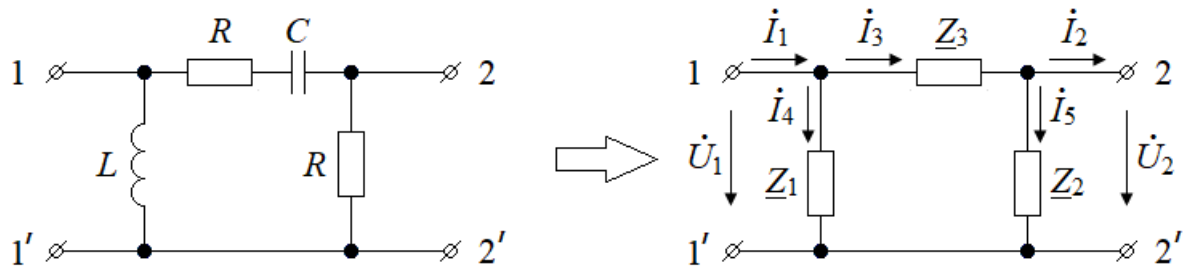


Рисунок 3.3 – Π -образная схема четырёхполюсника

Значения сопротивлений схемы известны: $R = 10 \text{ Ом}$, $X_L = 15 \text{ Ом}$, и $X_C = 12 \text{ Ом}$. Для удобства расчета обозначим:

$$\underline{Z}_1 = jX_L = j15 \text{ Ом}, \quad \underline{Z}_2 = R = 10 \text{ Ом} \quad \text{и} \quad \underline{Z}_3 = R - jX_C = 10 - j12 \text{ Ом}.$$

Система уравнений четырёхполюсника с A -параметрами (A -форма):

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{A}_{11} \cdot \dot{U}_2 + \underline{A}_{12} \cdot \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = \underline{A}_{21} \cdot \dot{U}_2 + \underline{A}_{22} \cdot \dot{I}_2 \end{cases}$$

В режиме холостого хода $\dot{I}_{2xx} = 0$ (выводы 2 и 2' разомкнуты) и в уравнениях отсутствуют вторые слагаемые, $\dot{I}_{3xx} = \dot{I}_{5xx}$, в результате получим:

$$\underline{A}_{11}^I = \frac{\dot{U}_{1xx}}{\dot{U}_{2xx}} = \frac{\dot{I}_{5xx} \cdot (\underline{Z}_3 + \underline{Z}_2)}{\dot{I}_{5xx} \cdot \underline{Z}_2} = 1 + \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_2} = 2 - 1.2j,$$

По формуле разброса тока по двум параллельным ветвям найдём выражения для тока \dot{I}_{5xx} , а затем для напряжения \dot{U}_{2xx} :

$$\dot{I}_{5xx} = \dot{I}_{1xx} \cdot \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} \quad \text{и} \quad \dot{U}_{2xx} = \dot{I}_{5xx} \cdot \underline{Z}_2.$$

Теперь можно найти параметр \underline{A}_{21} :

$$\underline{A}_{21}^I = \frac{\dot{I}_{1xx}}{\dot{U}_{2xx}} = \frac{\dot{I}_{1xx}}{\dot{I}_{1xx} \cdot \frac{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 \cdot \underline{Z}_2} = 0,02 - 0,1333j \text{ См.}$$

В режиме короткого замыкания $\dot{U}_{2кз} = 0$ (выводы 2 и 2' замкнуты) и в уравнениях отсутствуют первые слагаемые, $\dot{I}_{5кз} = 0$, $\dot{I}_{3кз} = \dot{I}_{2кз}$.

В результате получим:

$$\underline{A}_{12}^I = \frac{\dot{U}_{1кз}}{\dot{I}_{2кз}} = \frac{\dot{I}_{3кз} \cdot \underline{Z}_3}{\dot{I}_{2кз}} = \frac{\dot{I}_{2кз} \cdot \underline{Z}_3}{\dot{I}_{2кз}} = \underline{Z}_3 = 10 - 12j \text{ Ом,}$$

по формуле разброса тока: $\dot{I}_{2кз} = \dot{I}_{3кз} = \dot{I}_{1кз} \cdot \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}$, так как $\dot{I}_{5кз} = 0$,

$$\underline{A}_{22}^I = \frac{\dot{I}_{1кз}}{\dot{I}_{2кз}} = \frac{\dot{I}_{1кз}}{\dot{I}_{1кз} \cdot \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}} = 1 + \frac{\underline{Z}_3}{\underline{Z}_1} = 0,2 - 0,6667j.$$

Надо сделать проверку найденных числовых значений A -параметров подстановкой их в приведённое ниже уравнение, они должны удовлетворять соотношению:

$$\underline{A}_{11} \cdot \underline{A}_{22} - \underline{A}_{12} \cdot \underline{A}_{21} = 1.$$

Расчёт других параметров четырехполюсников, таких как \underline{Z} -, \underline{Y} -, \underline{H} - и \underline{G} -параметров, проводится аналогично, двумя способами, причём токи I_1 и I_2 направлены для этих форм внутрь четырехполюсника:

– путём составления уравнений по законам Кирхгофа для T -, P - или Γ -образной схем и приведения их к виду соответствующей формы (\underline{Z} -, \underline{Y} -, \underline{H} - или \underline{G} -формы);

– с использованием режимов прямого и обратного холостого хода и короткого замыкания.

Рассмотрим расчёт параметров эквивалентного четырехполюсника на примере четырехполюсника, полученного путем каскадного соединения двух четырехполюсников, как показано на рисунке 3.4.

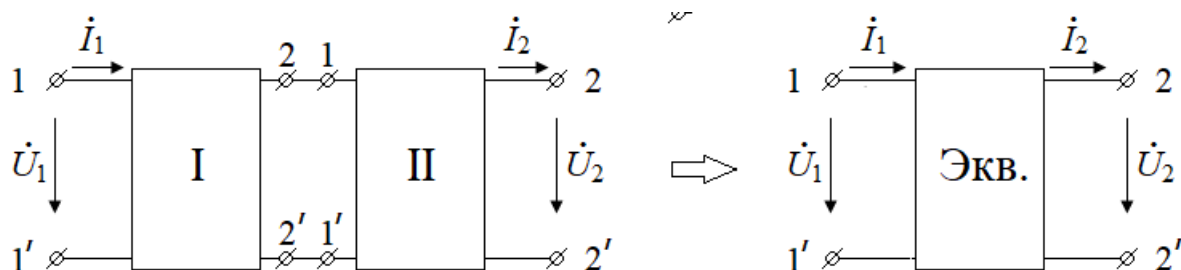


Рисунок 3.4 – Каскадное соединение двух четырехполюсников

В случае каскадного соединения находят матрицу A -параметров эквивалентного четырехполюсника как произведение матриц A -параметров включенных каскадно четырехполюсников.

В рассматриваемом задании первый четырехполюсник задан схемой и значением сопротивлений. Процедура определения A -параметров первого четырехполюсника рассмотрена выше. Для второго четырехполюсника заданы Y -параметры:

$$\underline{Y}_{11} = 0.05 - j0.015 \text{ См}, \quad \underline{Y}_{12} = -0.1 + j0.1 \text{ См}, \quad \underline{Y}_{21} = -0.1 + j0.1 \text{ См}, \quad \underline{Y}_{22} = 0.2 \text{ См}.$$

Таблица 3.4 – Таблица пересчёта коэффициентов четырехполюсника

	$\ \underline{Z}\ $	$\ \underline{Y}\ $	$\ \underline{H}\ $	$\ \underline{G}\ $
$\ \underline{A}\ $	$\left\ \begin{array}{cc} \underline{Z}_{11} & \underline{\Delta}_Z \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{21} \end{array} \right\ $	$\left\ \begin{array}{cc} -\underline{Y}_{22} & -1 \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{21} \end{array} \right\ $	$\left\ \begin{array}{cc} -\underline{\Delta}_H & -\underline{H}_{11} \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{21} \end{array} \right\ $	$\left\ \begin{array}{cc} 1 & \underline{G}_{22} \\ \underline{G}_{21} & \underline{G}_{21} \end{array} \right\ $
	$\left\ \begin{array}{cc} 1 & \underline{Z}_{22} \\ \underline{Z}_{21} & \underline{Z}_{21} \end{array} \right\ $	$\left\ \begin{array}{cc} -\underline{\Delta}_Y & -\underline{Y}_{11} \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{21} \end{array} \right\ $	$\left\ \begin{array}{cc} -\underline{H}_{22} & -1 \\ \underline{H}_{21} & \underline{H}_{21} \end{array} \right\ $	$\left\ \begin{array}{cc} \underline{G}_{11} & \underline{\Delta}_G \\ \underline{G}_{21} & \underline{G}_{21} \end{array} \right\ $

Пересчитаем Y -параметры в A -параметры, пользуясь таблицей пересчёта коэффициентов четырехполюсника (таблица 3.4).

$$\left\| \begin{array}{cc} \underline{A}_{11}^{\text{II}} & \underline{A}_{12}^{\text{II}} \\ \underline{A}_{21}^{\text{II}} & \underline{A}_{22}^{\text{II}} \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} -\underline{Y}_{22} & -1 \\ \underline{Y}_{21} & \underline{Y}_{21} \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} -0.2 & 1 \\ -0.1 + j0.1 & -0.1 + j0.1 \end{array} \right\| = \left\| \begin{array}{cc} 1 + j1 & 5 + j5 \\ 0.1 & 1 - j0.5 \end{array} \right\|.$$

$$\underline{A}_{11}^{\text{II}} = 1 + j1, \quad \underline{A}_{12}^{\text{II}} = 5 + j5, \text{ Ом}, \quad \underline{A}_{21}^{\text{II}} = 0.1 \text{ См}, \quad \underline{A}_{22}^{\text{II}} = 1 - j0.5.$$

Матрица A -параметров эквивалентного четырёхполюсника равна произведению одноименных матриц первого и второго четырехполюсников:

$$\|\underline{A}^{\text{экв}}\| = \|\underline{A}^{\text{I}}\| \times \|\underline{A}^{\text{II}}\| = \left\| \begin{array}{cc} 4.2 - j0.4 & 20 - j13 \\ 0.1733 - j0.18 & 0.6333 - j1.3333 \end{array} \right\|.$$

В случае других соединений матрицу параметров эквивалентного четырёхполюсника находят по следующим формулам:

– при параллельном соединении находят матрицу Y -параметров:

$$\|\underline{Y}^{\text{экв}}\| = \|\underline{Y}^{\text{I}}\| + \|\underline{Y}^{\text{II}}\|;$$

– при последовательном соединении находят матрицу Z -параметров:

$$\|\underline{Z}^{\text{экв}}\| = \|\underline{Z}^{\text{I}}\| + \|\underline{Z}^{\text{II}}\|;$$

– при последовательно-параллельном соединении находят матрицу H -параметров:

$$\|\underline{H}^{\text{экв}}\| = \|\underline{H}^{\text{I}}\| + \|\underline{H}^{\text{II}}\|;$$

– при параллельно-последовательном соединении находят матрицу G -параметров:

$$\|\underline{G}^{\text{экв}}\| = \|\underline{G}^{\text{I}}\| + \|\underline{G}^{\text{II}}\|.$$

При расчёте A -параметров токи I_1 и I_2 на входе и выходе четырёхполюсника направлены слева направо, от источника к нагрузке, как показано на рисунках 3.1, 3.3 и 3.4, а при расчёте Z -, Y -, H - или G -параметров ток I_2 направлен противоположно, к четырёхполюснику, его обозначают I'_2 .

Рассмотрим расчёт мощностей источника и нагрузки, между которыми включен эквивалентный четырёхполюсник, как показано на рисунке 3.1. Пусть даны напряжение $\dot{U}_2 = 50 \cdot e^{-j30^\circ}$ В и сопротивление нагрузки $R_n = 25$ Ом.

Сначала рассчитаем по закону Ома ток в сопротивлении нагрузки:

$$\dot{I}_2 = \dot{U}_2 / R_n = 50e^{-j30^\circ} / 25 = 2e^{-j30^\circ} \text{ А}$$

Затем используем систему уравнений четырёхполюсника A -формы для расчёта напряжения и тока источника питания:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \underline{A}_{11}^{\text{экв}} \cdot \dot{U}_2 + \underline{A}_{12}^{\text{экв}} \cdot \dot{I}_2 = (4.2 - j0.4) \cdot 50e^{-j30^\circ} + (20 - j13) \cdot 2e^{-j30^\circ} = 254.2e^{-j40.43^\circ} \text{ В} \\ \dot{I}_1 = \underline{A}_{21}^{\text{экв}} \cdot \dot{U}_2 + \underline{A}_{22}^{\text{экв}} \cdot \dot{I}_2 = (0.173 - j0.18)50e^{-j30^\circ} + (0.633 - j1.333)2e^{-j30^\circ} = 15.3e^{-j79.6^\circ} \text{ А} \end{cases}$$

Теперь можно рассчитать комплексные мощности источника и нагрузки:

$$\tilde{S}_{\text{ист}} = \dot{U}_1 \cdot \dot{I}_1^* = 254.2e^{-j40.43^\circ} \cdot 15.3e^{j79.6^\circ} = 3020 + j2459.7 \text{ ВА};$$

$$\tilde{S}_{\text{нагр}} = I_2^2 \cdot R_n = 2^2 \cdot 25 = 100 + j0 \text{ ВА}.$$

Приложение А

Некоммерческое акционерное общество
«АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ»
имени Гумарбека Даукеева

Кафедра электротехники

ОТЧЕТ
по курсовой работе, задание № _____

По дисциплине ТОЭ

На тему _____

Образовательная программа 6В07108 – «Автоматизация и управление»

Выполнил _____ Группа _____
(Ф.И.О. студента)

Проверил _____
(Ученая степень, звание, Ф.И.О. преподавателя)

_____ « _____ » _____ 202__ г.
(оценка) (подпись)

Алматы 202__

Список литературы

Основная:

1. ТОЭ. Электрические цепи: учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., исправ. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 701 с. – Серия: Бакалавр. Углубленный курс.

2. Прянишников В. А. ТОЭ: Курс лекций: Учебное пособие – 3-е изд., перераб. и доп. – СПб., 2012 – 368 с.

3. Атабеков Г. И. ТОЭ. Линейные электрические цепи: Учебное пособие. 7-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 592 с.

4. Аршидинов М. М., Денисенко В. И., Болдырева Л. П. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие. – АУЭС, Алматы, 2016. – 98 с.

Дополнительная:

5. Демирчян К. С., Нейман Л. Р., Коровкин Н. В., Чечурин В. Л. ТОЭ: В 3-х т. Учебник для вузов. – СПб.: Питер, 2003.

6. Шебес М. Р., Каблукова М. В. Задачник по теории линейных электрических цепей. – М.: Высшая школа, 1990. – 544 с.

Алиаскар Саинович Баймаганов
Светлана Юрьевна Креслина
Алма Тлендиевна Аршабекова

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Методические указания и задания к выполнению курсовой работы
для студентов, обучающихся по образовательной программе
6В07108 – «Автоматизация и управление»

Редактор:

Е. Б. Жанабаева

Специалист по стандартизации :

Ж.А.Ануарбек

Подписано в печать __. __. __.

Тираж 50 экз.

Объем 2,0 уч.-изд. л.

Формат 60×84 1/16

Бумага типографская № 1

Заказ __ Цена 1000 тг

Копировально-множительное бюро
некоммерческого акционерного общества
«Алматинский университет энергетики и связи»
050013 Алматы, Байтурсынова, 126/1