

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РФ
ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ
ФГБОУ ВПО КОСТРОМСКАЯ ГСХА

Кафедра
теоретических основ электротехники и автоматики

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Учебное пособие
для студентов направлений подготовки
35.03.06 «Агроинженерия»,
профиль «Электрооборудование и электротехнологии»,
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,
профиль «Электроснабжение»
очной и заочной форм обучения

КАРАБАЕВО
Костромская ГСХА
2014

ББК 31.21
УДК 621. 3. 01
Т 35

Составитель: доцент кафедры теоретических основ электротехники и автоматизации Костромской ГСХА *М.И. Мелешко.*

Рецензент: к.т.н., доцент, зав. кафедрой электрификации и автоматизации Нижегородского государственного инженерно-экономического института *В.Л. Осокин.*

Рекомендовано к изданию методической комиссией факультета электрификации и автоматизации сельского хозяйства, протокол № 10 от 02 декабря 2014 г.

Т 35 Теоретические основы электротехники : учебное пособие для студентов направлений подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения / сост. М.И. Мелешко. — Караваево : Костромская ГСХА, 2014. — 49 с.

Издание содержит программу курса «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ), задания для расчетно-графических и курсовой работ по ТОЭ, вопросы для самоаттестации, а также методические указания и алгоритмы выполнения заданий.

Учебное пособие предназначено для самостоятельной работы студентов направлений подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения.

ББК 31.21
УДК 621. 3. 01

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	4
Содержание дисциплины. Введение	6
<i>Расчетно-графическое задание №1</i> Расчет сложной цепи постоянного тока.....	11
<i>Расчетно-графическое задание №2</i> Расчет трехфазной цепи переменного синусоидального тока.....	19
<i>Задание №3. Курсовая работа часть 1</i> Переходные процессы в линейных электрических цепях.....	26
<i>Задание №3. Курсовая работа часть 2</i> Переходные процессы в нелинейных электрических цепях.....	30
Вопросы для самоаттестации.....	32
Список рекомендуемых источников.....	46
Приложения.....	47

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цели и задачи дисциплины

Курс «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) занимает основное место среди общетехнических дисциплин, определяющих теоретический уровень профессиональной подготовки инженеров-электриков и инженеров электронной техники.

Предмет курса составляют электромагнитные явления и их прикладное применение для создания, передачи и распределения электроэнергии и информации с помощью универсального носителя – электромагнитного поля, для решения проблем электротехники, электромеханики, электротехнологии, электроники, автоматики, управления, измерительной, вычислительной и информационной техники. Курс ТОЭ должен обеспечивать профессиональную подготовку будущего специалиста, развитие его творческих способностей, умение творчески применять и самостоятельно повышать свои знания. Эти цели достигаются на основе фундаментализации образования, повышения творческой активности и самостоятельности работы студентов, широкого применения вычислительной техники и новых информационных технологий (НИТ) в учебном процессе.

Внедрение вычислительной техники и НИТ в курс ТОЭ способствует значительной интенсификации процесса обучения. Это особенно важно в условиях быстро увеличивающегося объема научно-технической информации, а также помогает освоить основы методов вычислительного эксперимента интерактивного взаимодействия ЭВМ и объектов, что связано с развитием вопросов теории и разработкой алгоритмов электротехнических расчетов на основе применения вычислительной техники.

Основная задача курса ТОЭ состоит в изучении одной из форм материи – электромагнитного поля и его проявлений в различных устройствах техники; усвоении современных методов моделирования электромагнитных процессов, методов анализа и расчета электрических цепей, электрических и магнитных полей, знание которых необходимо для понимания и успешного решения инженерных проблем будущей специальности. Изучение теоретической электротехники должно способствовать выработке развитых представлений о методах применения теории электромагнитных явлений и методологии курса ТОЭ в специальных дисциплинах.

Требования к уровню освоения содержания дисциплины

В результате освоения курса ТОЭ студент должен знать фундаментальные законы теории электромагнитного поля и теории цепей, современные методы расчета электрических цепей и электромагнитных полей.

Студент должен

-уметь

применять теоретические знания к расчету, анализу, диагностике и синтезу электрических и электронных цепей;

составлять и решать (в том числе и с помощью ЭВМ) уравнения для анализа конкретных цепей, а также составлять и решать уравнения электромагнитных полей (электростатических, стационарных и переменных) для заданных конкретных сред и граничных условий, интерпретировать результаты исследований и численного моделирования.

-владеть

навыками по экспериментальному исследованию электрических цепей, определению токов, напряжений и мощностей, экспериментальному исследованию электромагнитных полей в различных средах.

навыками по математическому моделированию цепей с помощью программ на ЭВМ, в частности программы типа Mathcad для выполнения экспериментов и анализа результатов.

СОДЕРЖАНИЕ ДИСЦИПЛИНЫ

Введение

История электротехники. Электрическая энергия, ее особенности и области применения. Электротехника и ее роль в изучении других дисциплин. Содержание и структура дисциплины. Организация учебного процесса на кафедре.

1. Линейные электрические цепи постоянного тока

Основные понятия и величины, характеризующие электрические цепи: напряженность электрического поля, потенциал, напряжение и ЭДС, ток, сопротивление, элементы электрических цепей и схем. Источники и приемники электрической энергии, их свойства и характеристики. Схемы замещения электротехнических устройств постоянного тока.

Электрическая энергия и мощность. Баланс мощностей. Законы Ома и Джоуля-Ленца. Законы Кирхгофа.

Потенциальные диаграммы. Преобразование схем электрических цепей при последовательном, параллельном и смешанном соединениях пассивных элементов. Преобразование треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду и звезды в эквивалентный треугольник. Последовательное и параллельное соединения источников ЭДС.

Расчет разветвленных цепей с помощью законов Кирхгофа. Система уравнений линейных электрических цепей постоянного тока.

Принцип наложения и его применение для расчета электрических цепей. Метод контурных токов.

Метод узловых потенциалов и метод двух узлов.

Двухполюсники и их параметры. Расчет электрических цепей методом активного двухполюсника. Передача энергии от активного двухполюсника к приемнику. Сравнительная оценка основных методов расчета разветвленных цепей. Применение ЭВМ для расчета разветвленных цепей.

2. Линейные электрические цепи синусоидального тока

Основные понятия и величины, характеризующие однофазные цепи синусоидального тока: период, частота, угловая частота, фаза, начальная фаза, разность фаз. Действующее и среднее значения синусоидального тока. Генераторы синусоидальной ЭДС.

Изображение синусоидальных величин с помощью вращающихся векторов. Волновые и векторные диаграммы ЭДС, напряжений и токов.

Физические явления в цепях переменного тока. Явление электромагнитной индукции. Самоиндукция. Индуктивность.

Резистор, индуктивная катушка и конденсатор в цепи синусоидального тока.

Последовательное соединение резистора, индуктивной катушки и конденсатора. Разность фаз напряжения и тока. Мгновенная и средняя мощности. Активная, реактивная и полная мощности. Треугольники сопротивлений и мощностей.

Параллельное соединение резистора, индуктивной катушки и конденсатора. Треугольники проводимостей и мощностей. Компенсация реактивной мощности.

Эквивалентные схемы пассивного двухполюсника.

Изображение синусоидальных токов и напряжений в комплексной форме. Показательная, тригонометрическая и алгебраическая формы записи комплексных величин. Законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме. Комплексные сопротивление и проводимость. Комплексная мощность. Баланс мощностей. Измерение активной мощности. Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока.

Распространение на цепи синусоидального тока методов расчета цепей постоянного тока. Применение ЭВМ.

Топографическая векторная диаграмма напряжений. Падение и потеря напряжения в линии переменного тока.

Резонансы напряжений и токов в электрических цепях.

3. Индуктивно связанные цепи и четырехполюсники

Явление взаимной индукции. Взаимная индуктивность. Коэффициент связи. Расчет индуктивно связанных цепей. Экспериментальное определение взаимной индуктивности двух катушек и их одноименных зажимов.

Трансформатор без ферромагнитного сердечника. Схема замещения и векторная диаграмма трансформатора.

Четырехполюсники, их уравнения и коэффициенты. Определение коэффициентов четырехполюсника. Эквивалентные схемы четырехполюсника

4. Трехфазные цепи

Понятие о трехфазных системах. Трехфазный генератор. Векторные и волновые диаграммы. Соединение фаз «звездой» и «треугольником». Симметричный режим работы трехфазной цепи.

Несимметричный режим работы трехфазной цепи, соединенной «звездой» и «треугольником».

Активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи. Измерение активной мощности трехфазной цепи.

Вращающееся магнитное поле. Принцип действия синхронного и асинхронного электродвигателей.

Метод симметричных составляющих и его применение для расчета трехфазных цепей.

5. Цепи несинусоидального тока

Разложение периодической несинусоидальной функции в ряд Фурье. Максимальное, действующее и среднее значения несинусоидальных токов и напряжений. Коэффициенты формы, амплитуды и искажения.

Мощность цепи несинусоидального тока. Расчет цепей несинусоидального тока. Влияние индуктивности и емкости на форму кривой тока.

6. Нелинейные цепи постоянного тока

Вольтамперные характеристики нелинейных элементов. Статическое и дифференциальное сопротивления. Графический метод расчета цепей с нелинейными элементами. Аналитические методы расчета нелинейных цепей.

7. Магнитные цепи при постоянных магнитных потоках

Основные величины и соотношения, характеризующие магнитное поле. Ферромагнитные материалы и их свойства. Классификация магнитных цепей. Законы магнитных цепей. Расчет неразветвленной магнитной цепи.

8. Нелинейные цепи переменного тока

Общие сведения о нелинейных цепях переменного тока. Нелинейные элементы как генераторы высших гармоник тока и напряжения. Нелинейная индуктивность в цепи переменного тока. Схема замещения и векторная диаграмма цепи.

9. Переходные процессы в электрических цепях

Причины возникновения переходных процессов. Законы коммутации. Классический метод расчета переходных процессов. Включение цепи с резистором и индуктивной катушкой и цепи с резистором и конденсатором на постоянное и синусоидальное напряжение. Переходные процессы в цепях с резистором, конденсатором и индуктивной катушкой. Расчет переходных процессов в разветвленных цепях. Операторный метод расчета переходных процессов. Законы Ома и Кирхгофа в операторной форме. Теорема разложения. Методы расчета переходных процессов в нелинейных цепях.

10. Цепи с распределенными параметрами

Общие сведения о цепях с распределенными параметрами. Дифференциальные уравнения, уравнения в комплексной форме и уравнения с гиперболическими функциями для однородной линии. Параметры и характеристики однородной линии и их определение. Линия без потерь. Линия без искажения. Переходные процессы в цепях с распределенными параметрами. Линия как четырехполюсник. Частотные электрические фильтры. Назначение и классификация фильтров. Уравнение фильтров. Схемы фильтров и расчет параметров.

11. Электромагнитное поле

Электромагнитное поле как единство электрического и магнитного полей. Основные величины, характеризующие электростатическое поле. Характеристики вещества в электрическом поле. Теорема Гаусса и ее применение к расчету емкости конденсаторов и других устройств. Уравнения Пуассона и Лапласа. Электростатические цепи и методы расчета. Электрическое поле постоянного тока. Законы Ома, Джоуля-Ленца и Кирхгофа в дифференциальной форме.

Магнитное поле. Энергия магнитного поля. Механические силы в магнитном поле. Расчет магнитного поля круглого провода с током, цилиндрического провода и коаксиального кабеля. Поле и емкость конденсатора и двухпроводной линии. Магнитное поле и индуктивность двухпроводной линии.

Полный электрический ток и его плотность. Уравнение электромагнитного поля. Переменное электромагнитное поле в диэлектрике и проводящей среде. Теорема Умова-Пойтинга. Применение переменных электромагнитных полей в сельскохозяйственном производстве.

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ 1

РАСЧЕТ СЛОЖНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Номер варианта соответствует порядковому номеру студента в групповом журнале – для студентов очной формы обучения.

Для студентов заочной формы обучения номер варианта соответствует двум последним цифрам шифра зачетной книжки (с чисел 31, 61, 91 список вариантов начинается с начала. Например, шифру 45 соответствует 15 вариант).

Для обобщенной цепи, приведенной на рисунке 1.1, требуется выполнить следующее.

1. Пользуясь данными таблицы 1, составить расчетную схему электрической цепи.
2. Записать систему уравнений Кирхгофа, необходимых для определения токов во всех ветвях схемы.
3. Выполнить расчет схемы методом контурных токов и найти токи во всех ветвях.
4. Выделить в схеме три сопротивления, включенных по схеме треугольника, и заменить их эквивалентным соединением по схеме звезды.
5. Рассчитать полученную схему методом узловых потенциалов и найти токи в ветвях.
6. Определить ток в сопротивлении R_6 по методу эквивалентного генератора.
7. Рассчитать напряжение между точками А и В схемы.
8. Составить баланс мощностей для исходной схемы.

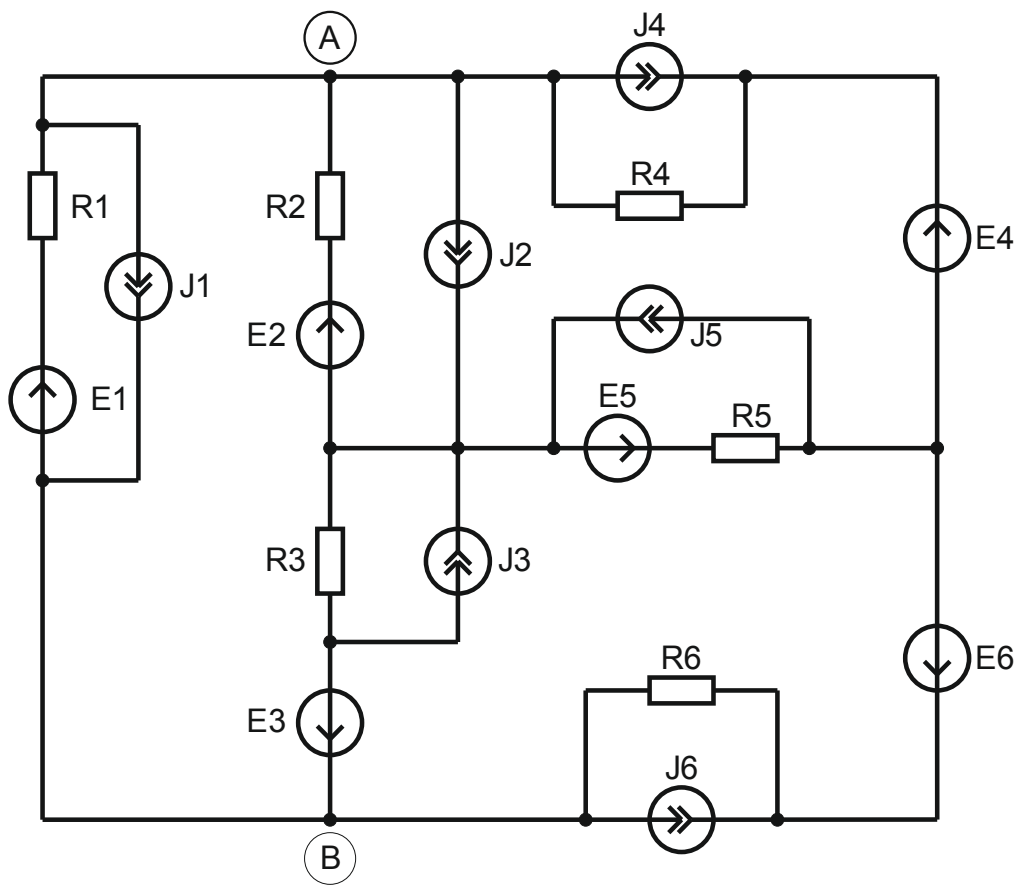


Рисунок 1.1. Обобщенная схема цепи к заданию 1.

.....

Таблица 1 Значения параметров элементов схем

Вариант	Параметры																	
	Сопротивления, Ом						Напряжения, В						Токи, А					
	R1	R2	R3	R4	R5	R6	E1	E2	E3	E4	E5	E6	J1	J2	J3	J4	J5	J6
1	2	1	4	5	4	3	0	0	0	10	0	15	0	0	0	0	6	0
2	4	3	1	4	5	3	10	0	16	0	0	0	0	4	0	0	0	0
3	6	5	2	1	4	5	12	20	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0
4	1	2	7	4	3	5	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	5	3
5	5	4	3	4	7	8	0	0	0	0	0	22	5	0	8	0	0	0
6	7	2	5	8	3	4	18	0	0	0	0	0	0	8	0	2	0	0
7	2	3	6	7	4	5	0	0	0	0	10	20	0	0	0	3	0	0
8	4	7	4	3	6	3	20	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	7
9	6	1	2	3	2	5	16	0	0	21	0	0	0	12	0	0	0	0
10	9	4	7	2	3	6	0	0	0	0	10	0	0	0	0	8	0	3
11	3	2	1	4	5	4	0	0	20	0	0	0	6	0	0	0	0	4
12	7	4	5	4	3	2	18	0	0	0	0	0	0	5	0	3	0	0
13	6	1	2	5	4	3	0	0	0	15	10	0	0	0	0	0	0	6
14	4	7	4	3	8	5	20	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	4
15	2	3	6	5	2	3	0	14	0	20	0	0	8	0	0	0	0	0
16	3	6	7	4	1	4	0	0	0	0	20	0	0	0	0	6	0	5
17	7	2	5	6	3	2	0	0	15	0	0	0	3	0	0	0	0	9
18	5	4	3	2	7	5	0	20	0	0	0	0	4	0	0	9	0	0
19	8	3	4	7	4	5	0	0	0	0	20	10	0	0	0	3	0	0
20	4	5	8	3	6	7	0	0	17	0	0	15	5	0	0	0	0	0
21	6	1	4	5	8	3	0	14	0	10	0	0	3	0	0	0	0	0
22	5	8	3	6	3	4	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	5
23	3	4	7	8	1	6	14	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	4
24	7	6	5	4	3	8	0	0	0	24	0	0	2	3	0	0	0	0
25	6	3	4	7	4	5	0	0	0	0	0	20	0	0	0	3	5	0
26	2	7	2	1	8	3	0	0	18	0	0	0	7	0	0	0	0	8
27	4	5	8	3	2	9	0	20	0	0	0	0	5	0	0	7	0	0
28	3	6	7	2	5	2	0	0	0	16	0	18	0	0	0	0	4	0
29	9	4	3	6	3	4	25	0	18	0	0	0	0	0	0	0	0	5
30	7	2	9	4	3	6	0	15	0	23	0	0	3	0	0	0	0	0

Методические указания к выполнению задания

Уравнения Кирхгофа для электрической цепи

Число уравнений, составляемых по законам Кирхгофа, равно числу неизвестных токов ветвей b . Для их написания необходимо задаться положительными направлениями токов каждой ветви.

Первый закон Кирхгофа — алгебраическая сумма токов в узле равна нулю: $\sum I_k = 0$. Токи, направленные от узла, принимаются положительными, а токи, направленные к узлу, отрицательными, или наоборот. Независимое число уравнений равно числу узлов y без одного ($y - 1$).

Часто целесообразно алгебраическую сумму токов источников токов писать в правой части уравнений, тогда уравнения по первому закону принимают вид: $\sum I_k = \sum J_k$. Теперь ток источника тока, входящий в узел, считается положительным, а выходящий — отрицательным.

Второй закон Кирхгофа — алгебраическая сумма падений напряжений в любом замкнутом контуре равна алгебраической сумме ЭДС в этом контуре: $\sum I_k R_k = \sum E_k$ или $\sum U_k = \sum E_k$.

Направление обхода контура выбирают произвольно. Положительно направленными считаются токи и ЭДС, если положительные направления этих величин совпадают с направлением обхода контура, и отрицательными — в противном случае. Таким же образом выбираются направления напряжений.

Число независимых уравнений равно числу независимых контуров и определяется по формуле $b - y + 1$, где b — число ветвей, y — число узлов. При составлении уравнений по второму закону Кирхгофа следует выбирать независимые контуры, не содержащие источников тока. Независимые контуры схемы отличаются друг от друга, по крайней мере, одной ветвью. Число независимых контуров равно $b - y + 1$.

Формирование уравнений по методу контурных токов

При использовании этого метода каждому независимому контуру приписывается произвольно направленный контурный ток. Общее число независимых контурных токов $k = b - y + 1$. Источники тока, имеющиеся в схеме, предварительно преобразуются в источники ЭДС. Если выбор контуров осуществляется так, что они не охватывают друг друга, а направления контурных токов выбираются согласованными для всех контуров (например, по часовой стрелке), то уравнения контурных токов для схемы, приведенной на рисунке 1.2, имеют следующий вид:

$$\begin{bmatrix} R_{11} & -R_{12} & -R_{13} \\ -R_{21} & R_{22} & -R_{23} \\ -R_{31} & -R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{11} \\ I_{22} \\ I_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} \\ E_{22} \\ E_{33} \end{bmatrix}.$$

В этих уравнениях собственные сопротивления вида R_{kk} с двумя одинаковыми символами рассчитываются как сумма сопротивлений всех ветвей, входящих в 1-й контур, а взаимные сопротивления вида $R_{km} = R_{mk}$ с двумя различными индексами — есть общие сопротивления контуров m и k . Контурные ЭДС равны алгебраической сумме ЭДС в направлении обхода соответствующего контурного тока. Ток в ветви, по которой протекает лишь один контурный ток, равен этому контурному току.

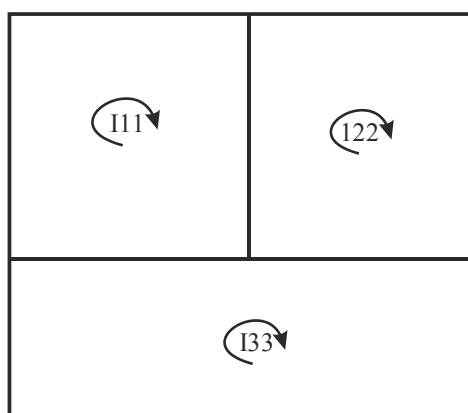


Рисунок 1.2 Пример выбора направления контурных токов.

Токи в общих ветвях находят как алгебраическую сумму контурных токов, протекающих по данной ветви. Значения контурных токов, полученных при решении системы, позволяют рассчитать токи во всех ветвях.

Баланс мощностей

Для любой электрической цепи сумма мощностей $E_k I_k$ и $U_k J_k$, развиваемых источниками электрической энергии, равна сумме мощностей $I_k^2 R_k$, расходуемых в приемниках энергии:

$$\sum (E_k I_k + U_k J_k) = \sum I_k^2 R_k,$$

где $\sum E_k I_k$ — алгебраическая сумма мощностей источников ЭДС. Здесь положительны те из слагаемых, для которых направления действия ЭДС E_k и соответствующего тока I_k совпадают, в противном случае слагаемое отрицательно;

$\sum U_k J_k$ – алгебраическая сумма мощностей источников тока. Здесь положительны те из слагаемых, для которых напряжение на источнике тока U_k (оно определяется расчетом внешней цепи по отношению к зажимам источника тока J_k) и его ток J_k совпадают по направлению, в противном случае слагаемое отрицательно;

$\sum I_k^2 R_k$ – арифметическая сумма мощностей нагрузок. Здесь должны быть учтены как внешние сопротивления, так и сопротивления самих источников энергии.

Формирование уравнений по методу узловых потенциалов

Метод узловых потенциалов применяется в задании для расчета напряжения холостого хода между двумя точками электрической схемы, где была выключена ветвь. Так, например, в цепи на рисунке 1.3 требуется рассчитать напряжение холостого хода U_3 при размыкании третьей ветви. Следует заметить, что электрическая схема содержит только 2 узла (1 и 2) и для нахождения напряжения между ними по методу узловых потенциалов необходимо составить только одно уравнение. Такой метод целесообразен в случае ручного расчета схемы. Знание напряжения U_{21} позволит, исходя из обобщенного закона Ома, определить токи, а затем и искомое напряжение U .

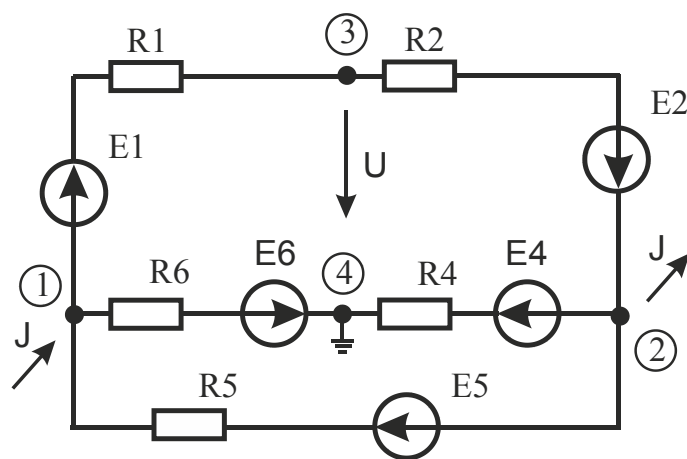


Рисунок 1.3 Пример расчета по методу узловых потенциалов

В случае решения задания на ПЭВМ лучше составить такую систему уравнений по методу узловых потенциалов, которая позволит сразу найти напряжение U и использовать программу решения трех линейных

уравнений. Для этого рассмотрим точки 3 и 4 цепи (рис. 1.2) как узлы и примем точку 4 за базисный узел, имеющий нулевой потенциал. Тогда число независимых уравнений будет равно трем. Система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{bmatrix} g_{11} & -g_{12} & -g_{13} \\ -g_{21} & g_{22} & -g_{23} \\ -g_{31} & -g_{32} & g_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{k1} \\ J_{k2} \\ J_{k3} \end{bmatrix}.$$

Собственные проводимости каждого узла g_{ii} , кроме базисного, рассчитываются как сумма проводимостей всех ветвей, подходящих к i -му узлу, а взаимные проводимости g_{ik} между двумя узлами – как сумма проводимостей ветвей, соединяющих узлы i -й и k -й. В заключение определяются узловые токи короткого замыкания во всех узлах J_{ki} (кроме базисного) как алгебраическая сумма токов короткого замыкания всех ветвей, подходящих к i -му узлу. Например, для вышеприведенной схемы

$$J_k = -\frac{E_1}{R_1} - \frac{E_6}{R_6} + \frac{E_5}{R_5} + J.$$

Значение потенциала узла 3, полученное при решении системы уравнений, определит искомое напряжение U .

Определение тока одной ветви методом эквивалентного генератора

Для определения тока I_3 в ветви, соединяющей узлы 3 и 4 на рисунке 1.3 (положительные направления тока и ЭДС этой ветви приняты в направлении от 3 к 4), методом эквивалентного генератора необходимо рассчитать напряжение U при разрыве этой ветви и сопротивление R_2 эквивалентного источника.

Внутреннее сопротивление R_2 эквивалентного источника ЭДС равняется входному сопротивлению пассивной цепи относительно зажимов 3 и 4 исходной схемы, из которой исключены все источники (источники ЭДС заменены короткозамкнутыми участками, а ветви с источниками тока отключены) при разомкнутой третьей ветви.

Сопротивление R_2 схемы (рис. 1.3) между точками 3 и 4 легко рассчитать, если треугольник сопротивлений R_6, R_4, R_5 преобразовать в эквивалентную звезду сопротивлений r_1, r_2, r_3 :

$$\begin{aligned} r_1 &= R_6 R_5 / (R_4 + R_5 + R_6); \\ r_2 &= R_4 R_5 / (R_4 + R_5 + R_6); \\ r_3 &= R_4 R_6 / (R_4 + R_5 + R_6), \end{aligned}$$

после чего R_2 может быть определено как сопротивление следующей схемы (рис. 1.4):

$$R_r = ((R1 + r1) \cdot (R2 + r2) / (R1 + r1 + R2 + r2)) + r3.$$

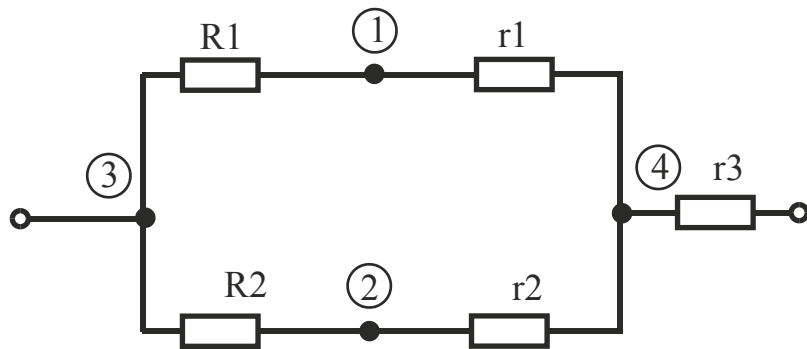


Рисунок 1.4

Пример преобразования в эквивалентную «звезду» сопротивлений $R4, R5, R6$

Ток в искомой ветви, имеющей сопротивление $R3$, определяется по закону Ома:

$$I_3 = (U + E3) / (R_2 + R3).$$

РАСЧЕТНО-ГРАФИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ 2

РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Расчетные схемы вариантов приведены на рисунках 2.1–2.30. Параметры цепи для каждого варианта даны в таблице 2.

Номер варианта соответствует порядковому номеру студента в групповом журнале – для студентов очной формы обучения;

Для студентов заочной формы обучения номер варианта соответствует двум последним цифрам шифра зачетной книжки. (с чисел 31, 61, 91 список вариантов начинается с начала. Например, шифру 45 соответствует 15 вариант).

Трехфазный генератор создает симметричную систему ЭДС с прямой последовательностью чередования фаз:

$$e_A(t) = E_m \sin \omega t; \quad e_B(t) = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \quad e_C(t) = E_m \sin(\omega t + 120^\circ).$$

Требуется выполнить следующее:

1. Рассчитать в комплексной форме токи в ветвях и напряжения на элементах цепи. Для симметричной части приемника расчет рекомендуется проводить на одну фазу.

2. Определить активную и реактивную мощности источников ЭДС и сравнить их с суммой активных и реактивных мощностей пассивных элементов цепи.

3. Включить в цепь ваттметры для измерения активной мощности трехфазного генератора. Определить показания ваттметров.

4. Построить векторные диаграммы токов и топографические диаграммы напряжений:

- а) для симметричной части приемника;
- б) для несимметричной части приемника.

5. Построить для каждой фазы отдельные графики $e_A(t)$, $i_A(t)$, $e_B(t)$, $i_B(t)$, и $e_C(t)$, $i_C(t)$; где $i_A(t)$, $i_B(t)$, $i_C(t)$ – токи, проходящие через соответствующие источники ЭДС.

Таблица 2 Значения параметров элементов схем

Вариант	Em, В	f, Гц	R, Ом	R1, Ом	R2, Ом	L, Гн	L1, Гн	L2, Гн	C, мкФ	C1, мкФ	C2, мкФ
1	110	330	23	46	16	0,01	0,017	0,011	5	9	11
2	120	320	15	44	13	0,01	0,017	0,011	11	5	9
3	130	310	12	43	10	0,01	0,017	0,011	9	11	5
4	140	300	18	25	20	0,01	0,017	0,011	7	12	8
5	150	290	16	36	15	0,01	0,017	0,011	12	8	7
6	160	280	25	40	19	0,01	0,013	0,017	8	7	12
7	170	270	14	18	21	0,01	0,013	0,018	15	11	13
8	180	260	32	23	25	0,012	0,013	0,018	11	13	15
9	190	250	40	24	30	0,012	0,013	0,018	13	15	11
10	200	240	38	26	29	0,012	0,01	0,018	18	20	22
11	220	230	29	29	31	0,012	0,01	0,11	20	22	18
12	230	220	45	27	33	0,012	0,01	0,11	22	18	20
13	240	210	61	25	39	0,015	0,01	0,11	26	17	29
14	250	200	25	31	34	0,015	0,01	0,11	17	29	26
15	260	190	27	33	36	0,015	0,019	0,11	29	26	17
16	270	180	26	35	38	0,015	0,019	0,13	15	25	20
17	280	170	33	37	40	0,015	0,019	0,13	20	15	25
18	290	160	30	39	41	0,015	0,019	0,13	25	20	15
19	300	150	34	41	46	0,015	0,019	0,13	18	23	30
20	310	140	42	44	43	0,1	0,17	0,13	23	30	18
21	320	130	40	43	55	0,1	0,17	0,2	30	18	23
22	330	120	53	46	59	0,1	0,17	0,2	27	21	24
23	340	110	55	49	51	0,1	0,17	0,2	24	27	21
24	350	100	57	50	53	0,14	0,17	0,2	21	24	27
25	360	90	46	52	60	0,14	0,25	0,2	31	33	22
26	370	80	47	55	62	0,14	0,17	0,25	22	31	33
27	380	70	43	57	64	0,14	0,17	0,25	33	22	31
28	390	60	62	53	66	0,14	0,17	0,25	40	34	50
29	400	50	66	59	69	0,16	0,17	0,25	50	40	34
30	410	40	63	60	65	0,16	0,17	0,25	34	50	40

Рисунок 2. Расчетные схемы вариантов.

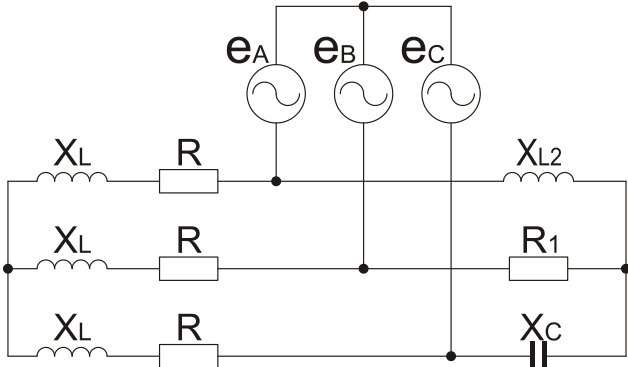


Рисунок 2.1.

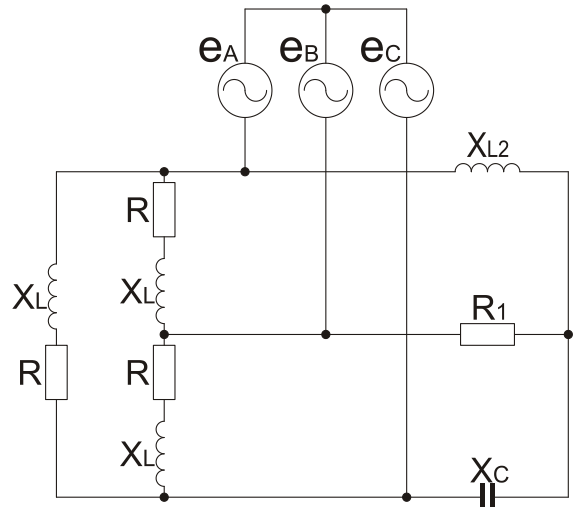


Рисунок 2.2.

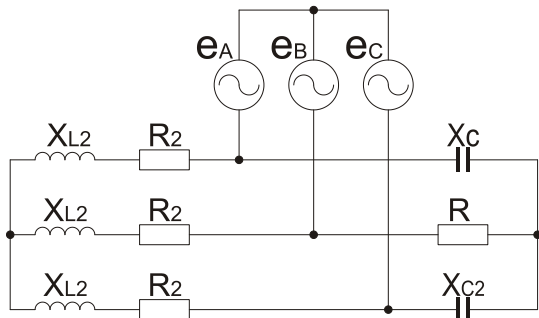


Рисунок 2.3.

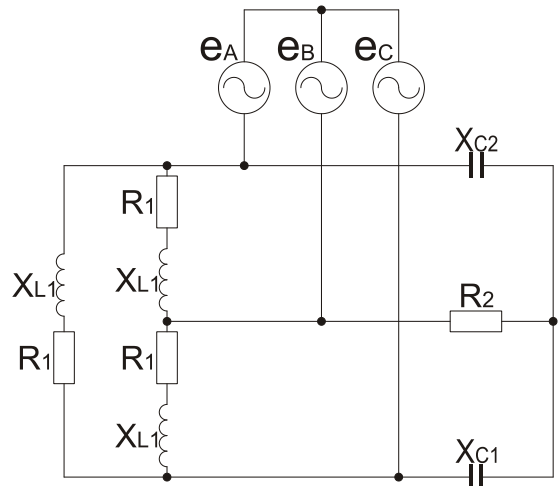


Рисунок 2.4.

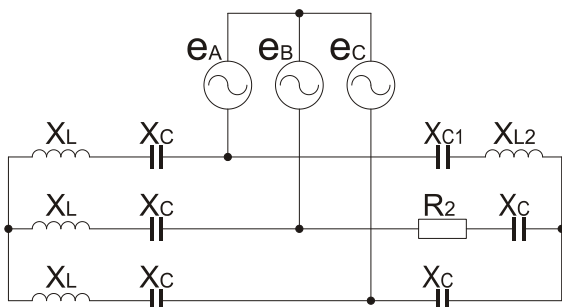


Рисунок 2.5.

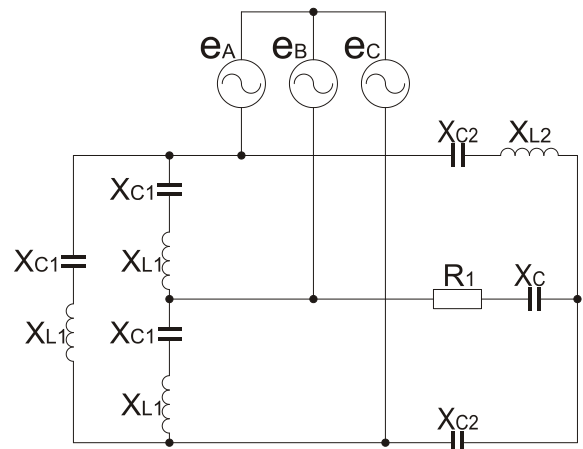


Рисунок 2.6.

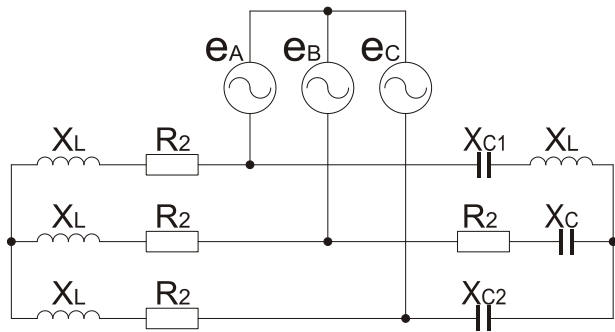


Рисунок 2.7

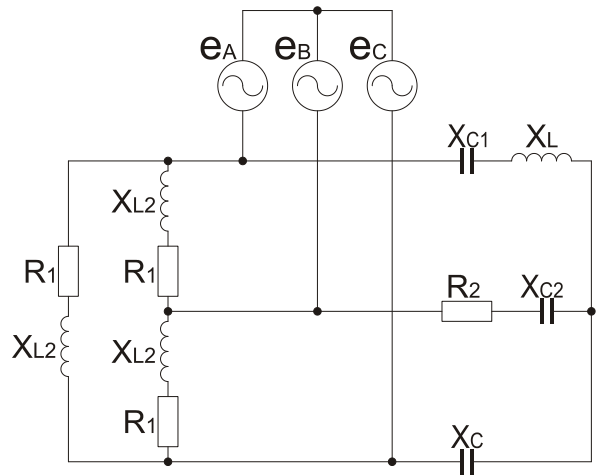


Рисунок 2.8

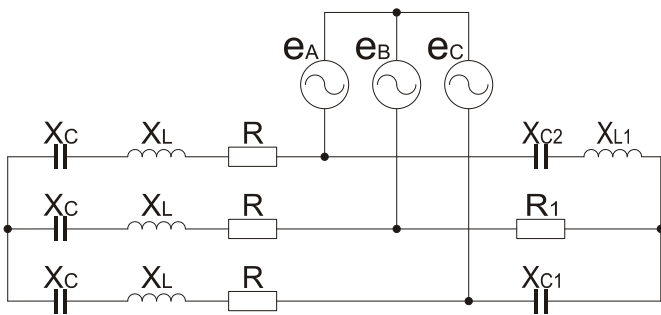


Рисунок 2.9

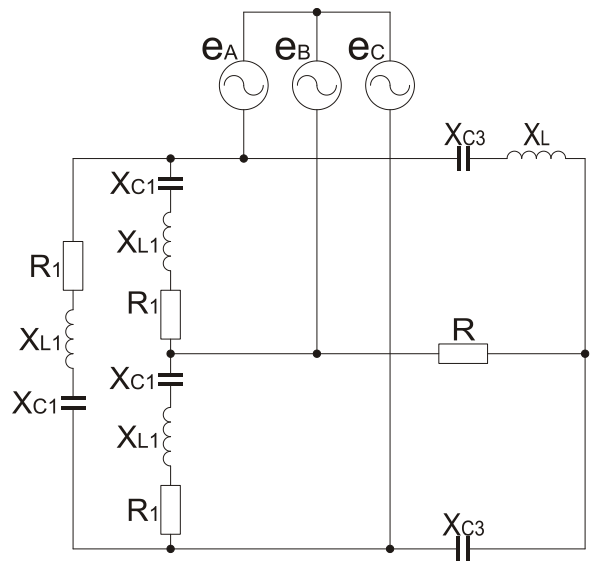


Рисунок 2.10

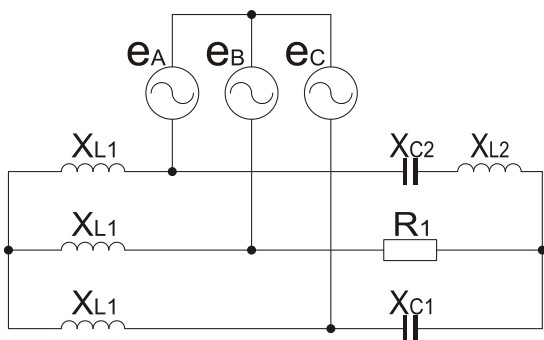


Рисунок 2.11

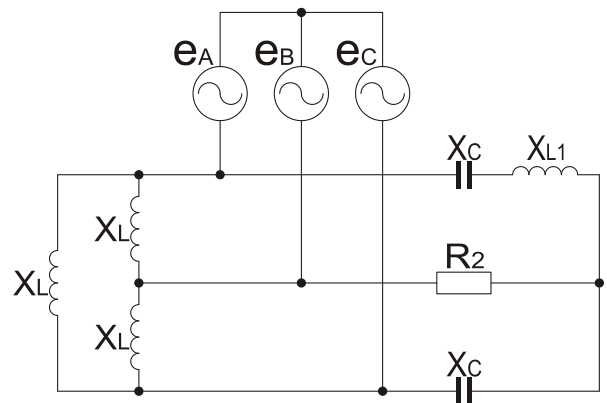


Рисунок 2.12

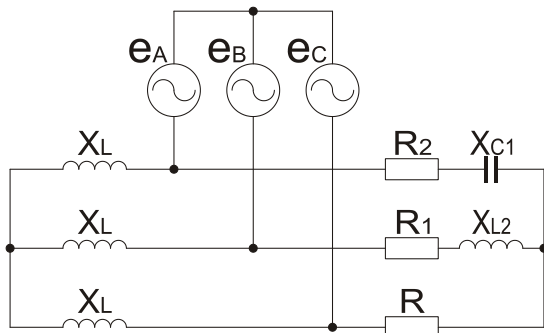


Рисунок 2.13

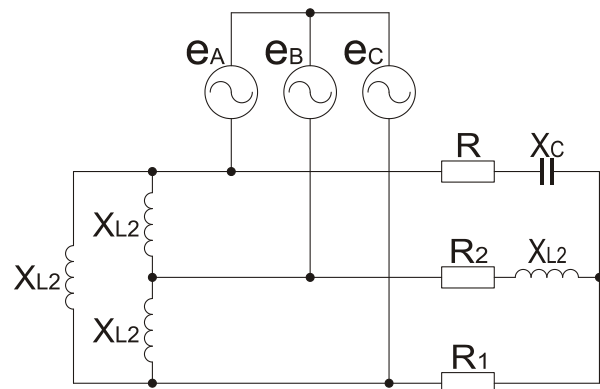


Рисунок 2.14

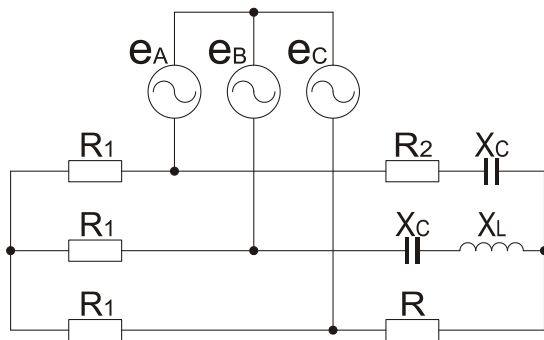


Рисунок 2.15

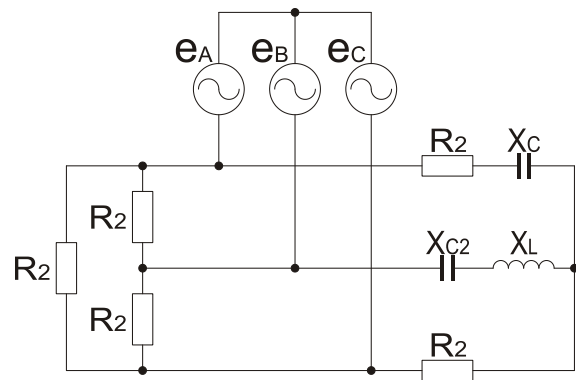


Рисунок 2.16

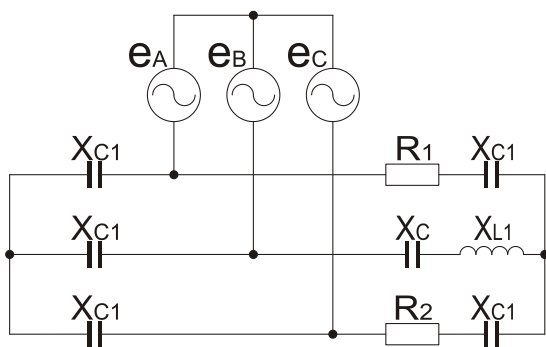


Рисунок 2.17

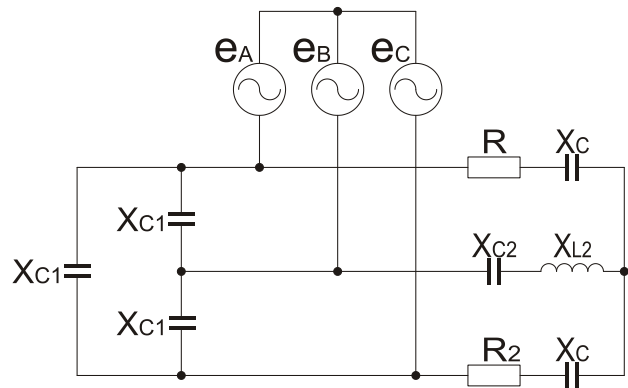


Рисунок 2.18

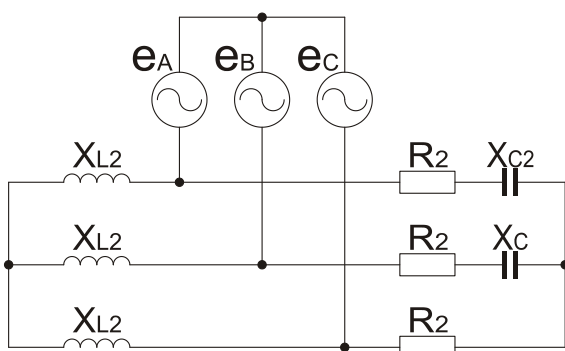


Рисунок 2.19

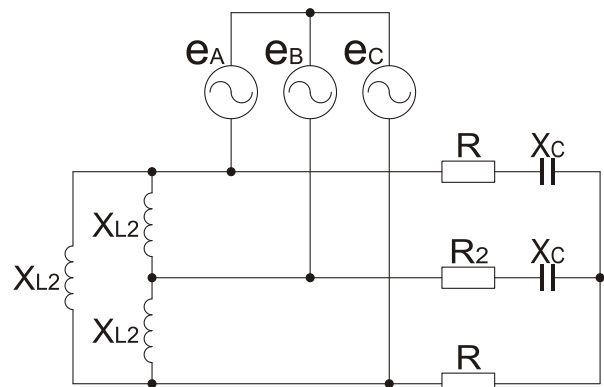


Рисунок 2.20

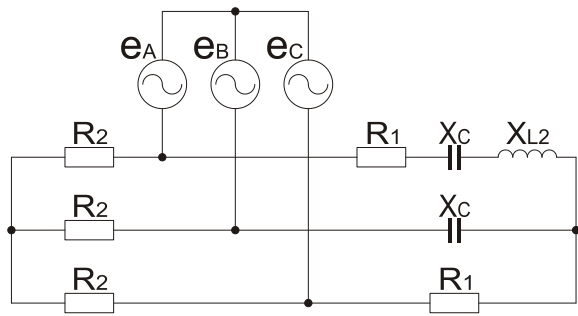


Рисунок 2.21

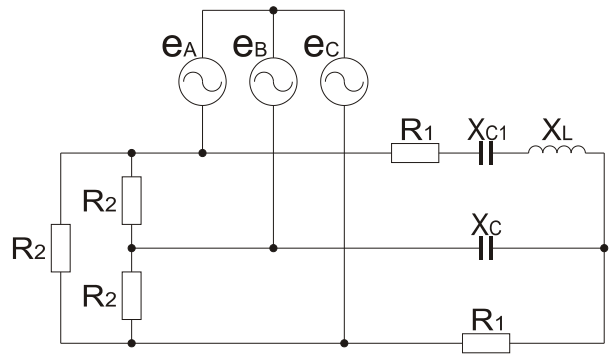


Рисунок 2.22

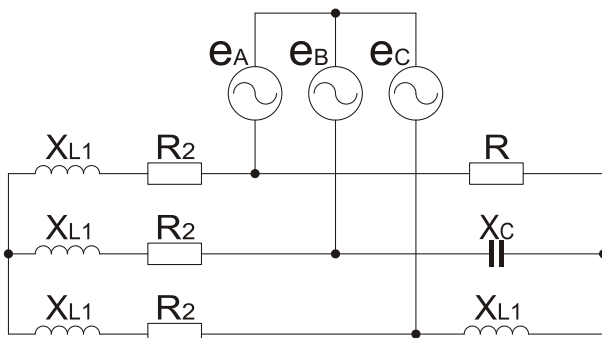


Рисунок 2.23

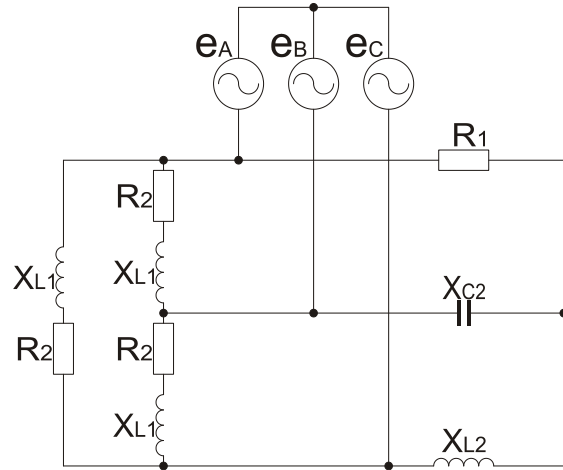


Рисунок 2.24

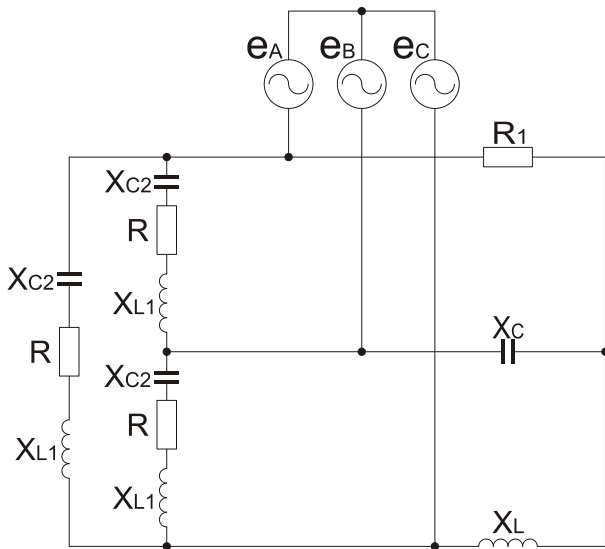


Рисунок 2.25

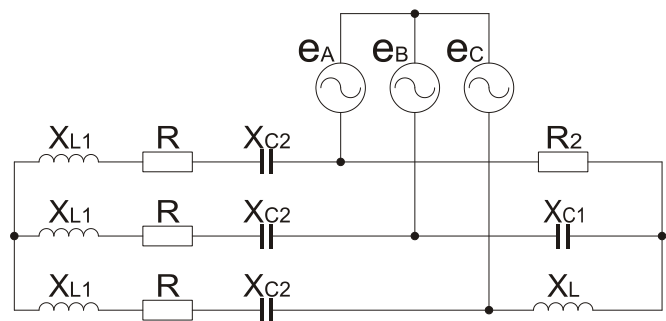


Рисунок 2.26

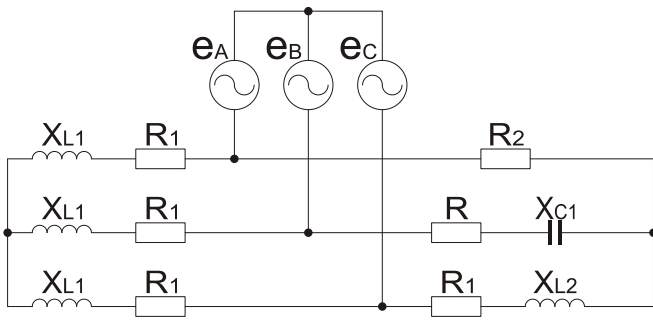


Рисунок 2.27

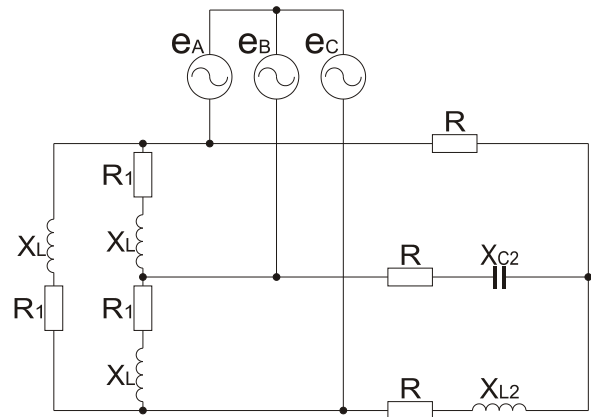


Рисунок 2.28

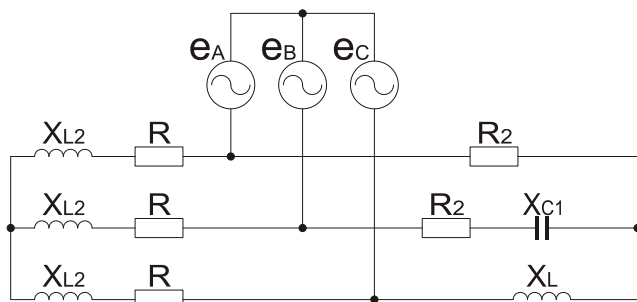


Рисунок 2.29

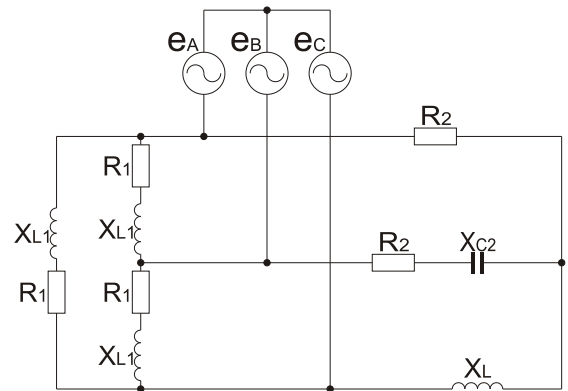


Рисунок 2.30

Методические указания к выполнению задания

Комплексы действующих значений ЭДС трехфазной цепи $\underline{E}_A = E$; $\underline{E}_B = \underline{E}_A a^2$; $\underline{E}_C = \underline{E}_A a$, где $a = e^{j2\pi/3}$ и $a^2 = e^{-j2\pi/3}$ – операторы поворота.

Расчет симметричной трехфазной цепи производится для одной (основной) фазы.

Расчеты несимметричных трехфазных цепей могут быть проведены с помощью законов Кирхгофа или любого метода расчетов электрических цепей.

В случае цепи с несколькими приемниками, имеющими различные схемы соединений («треугольник» и «звезду»), «звезду» следует преобразовать в эквивалентный «треугольник», ветви которого будут параллельны ветвям другого «треугольника». После замены каждой пары параллельных ветвей «треугольников» одной ветвью будет получена схема с одним «треугольником».

ЗАДАНИЕ 3

КУРСОВАЯ РАБОТА

ЧАСТЬ 1:

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Рассчитать токи и напряжения ветвей электрической цепи, в которой происходит коммутация. Номер варианта схемы (рис. 3.1-3.30) и значения параметров элементов схемы (табл. 3) определяются номером студента в групповом журнале

Для студентов заочной формы обучения номер варианта соответствует двум последним цифрам шифра зачетной книжки (с чисел 31, 61, 91 список вариантов начинается с начала. Например, шифру 45 соответствует 15 вариант).

Требуется выполнить следующее:

1. Рассчитать мгновенные значения величин, указанных в таблице 3, после выполнения коммутации классическим методом.
2. Определить законы изменения во времени указанных величин операторным методом.
3. Построить графики изменения искомых величин в зависимости от времени в интервале от $t=0$ до $t=4 / |P/min$, где $|P/min$ – меньший по модулю корень характеристического уравнения.

Таблица 3 Значения параметров элементов схем

Вариант	Схема	E, В	J, А	L1, мГн	L2, мГн	C1, мкФ	C2, мкФ	R1, Ом	R2, Ом	R3, Ом	Найти	Ключ
1	1	120	-	1	-	10	-	4	4	8	ic, i1	З
2	2	-	5	1	-	10	-	20	20	10	uc, ic	Р
3	3	120	-	10	-	10	-	100	500	500	iL, uL	З
4	4	-	10	1	-	500	-	2	2	6	uc, i2	Р
5	5	120	-	1	-	10	-	1	3	3	iL, u2	З
6	6	-	30	5	-	4	-	20	10	20	uc, ic	З
7	7	60	-	2	-	5	-	10	10	10	uL, iL	Р
8	8	-	30	0,2	-	10	-	5	5	10	uc, ic	З
9	9	120	-	-	-	10	50	10	20	10	uc1, ic	Р
10	10	-	5	-	-	20	40	10	20	30	uc1, ic1	З
11	11	60	-	10	30	-	-	4	4	8	uL1, iL1	З
12	12	-	12	1	4	-	-	4	6	8	iL1, i1	З
13	13	120	-	2	8	-	-	4	4	8	uL1, iL1	Р
14	14	-	10	-	-	10	30	6	4	2	uc1, ic1	Р
15	15	80	-	1	5	-	-	8	4	4	uL1, iL1	З
16	16	-	2	-	-	10	20	5	15	20	uc1, ic1	Р
17	1	100	-	1	-	0,5	-	10	5	5	u2, iL1	Р
18	2	-	2	1	-	1	-	40	20	10	uL, iL	Р
19	3	100	-	10	-	1	-	40	60	60	uc, i3	Р
20	4	-	4	1	-	10	-	4	4	2	uL, iL	З
21	5	120	-	5	-	1	-	2	4	2	uc, u3	Р
22	6	-	4	10	-	1	-	30	20	10	uL, iL	З
23	7	60	-	1	-	0,2	-	20	15	5	uc, u3	З
24	8	-	6	1	-	0,5	-	2	4	4	iL, uL	З
25	9	80	-	-	-	20	10	5	15	20	uc2, ic2	З
26	10	-	6	-	-	4	2	10	20	10	uc2, u3	Р
27	11	30	-	5	15	-	-	5	15	5	u3, iL2	Р
28	12	-	12	4	2	-	-	2	4	6	iL2, i2	З
29	13	60	-	6	1	-	-	4	6	10	uL2, iL2	Р
30	14	-	4	-	-	20	10	40	20	60	uc2, ic2	З

Примечание: З – ключ s при коммутации цепи замыкается; Р – размыкается.

Рисунок 3. Расчетные схемы вариантов.

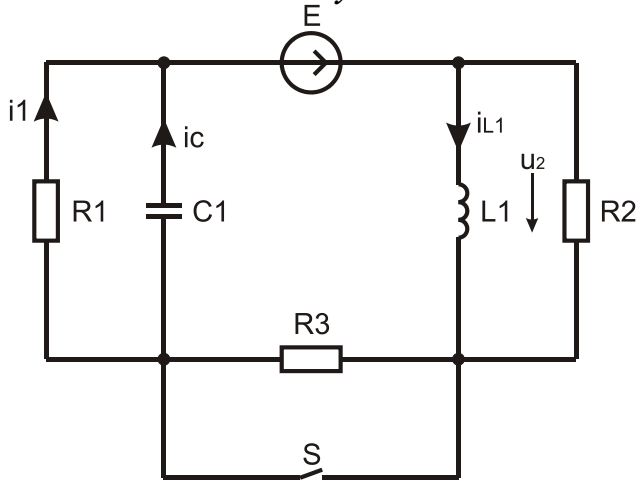


Рисунок 3.1

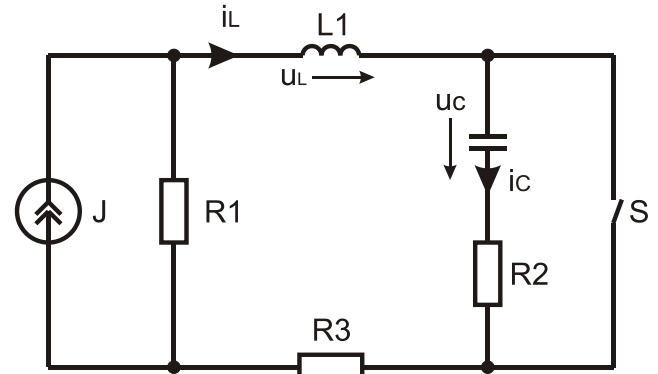


Рисунок 3.2

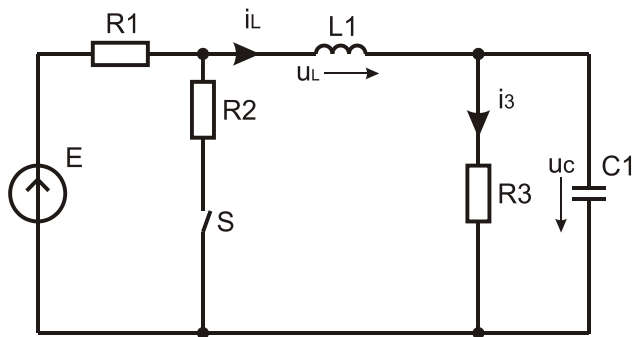


Рисунок 3.3

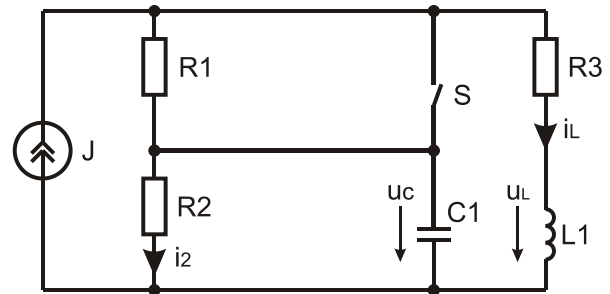


Рисунок 3.4

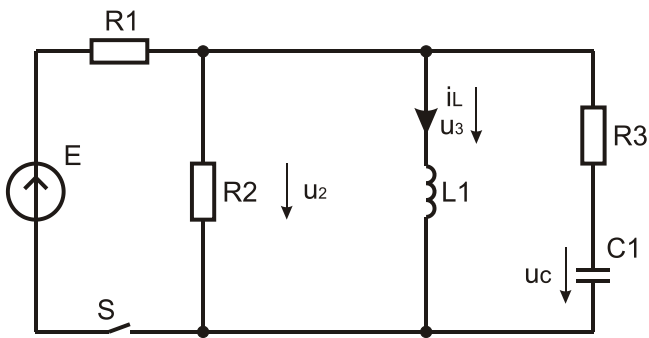


Рисунок 3.5

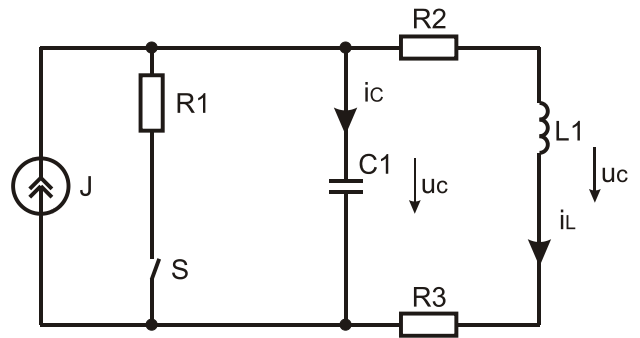


Рисунок 3.6

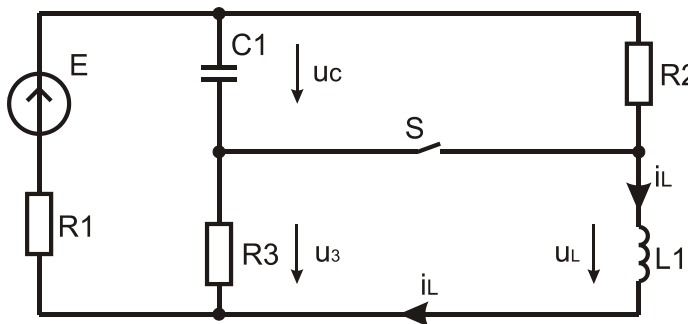


Рисунок 3.7

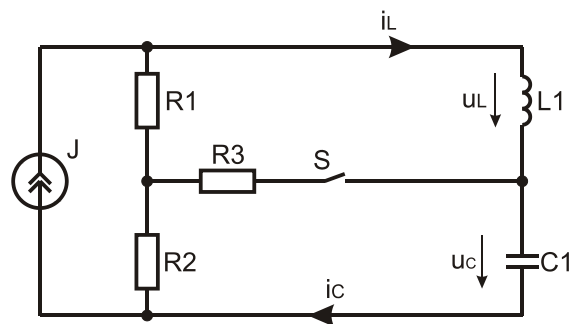


Рисунок 3.8

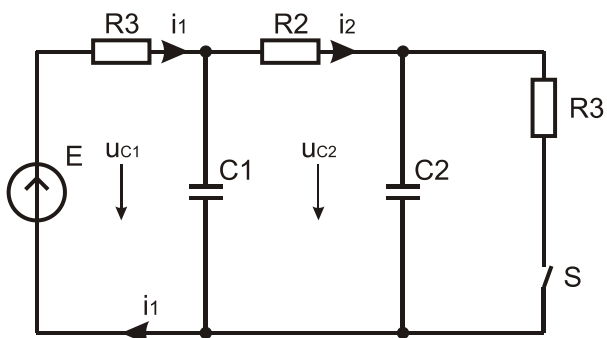


Рисунок 3.9

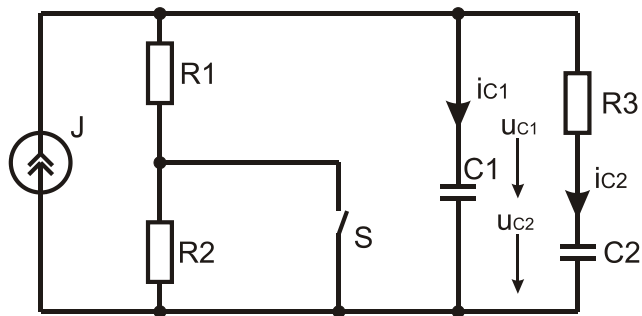


Рисунок 3.10

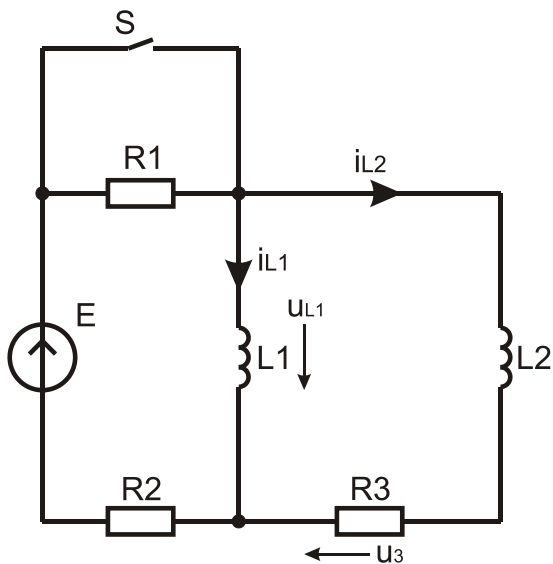


Рисунок 3.11

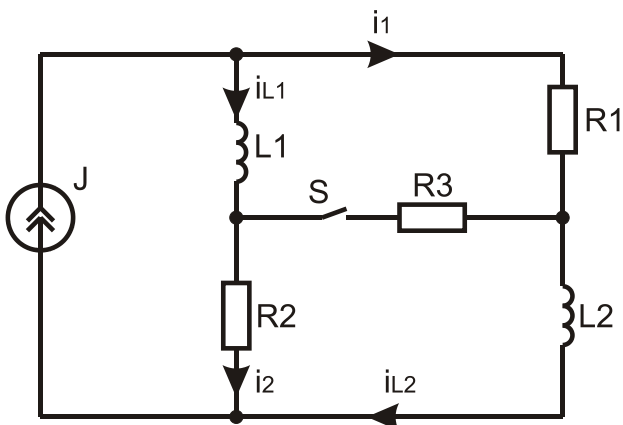


Рисунок 3.12

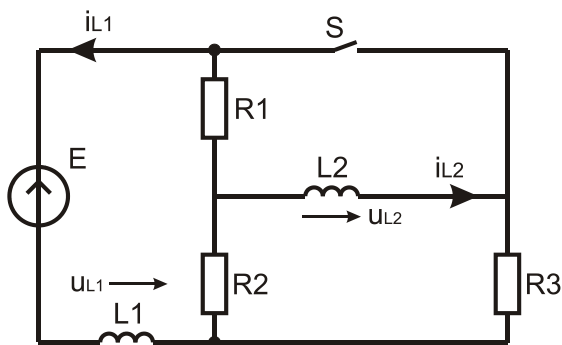


Рисунок 3.13

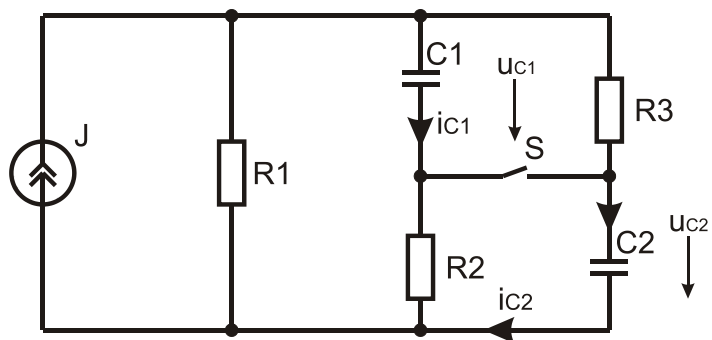


Рисунок 3.14

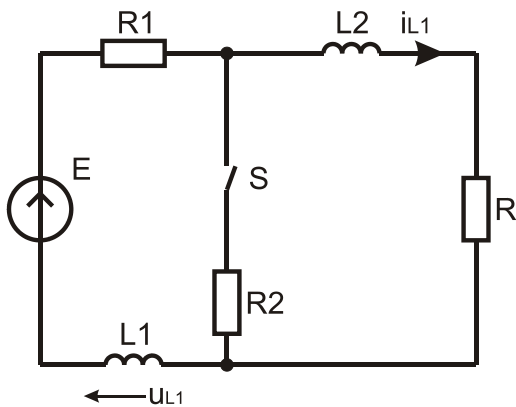


Рисунок 3.15

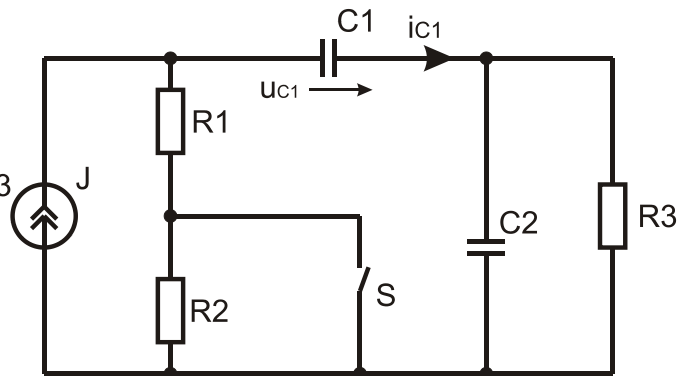


Рисунок 3.16

ЗАДАНИЕ 3

КУРСОВАЯ РАБОТА

ЧАСТЬ 2

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В НЕЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.

Дана схема (рис. 3.17):

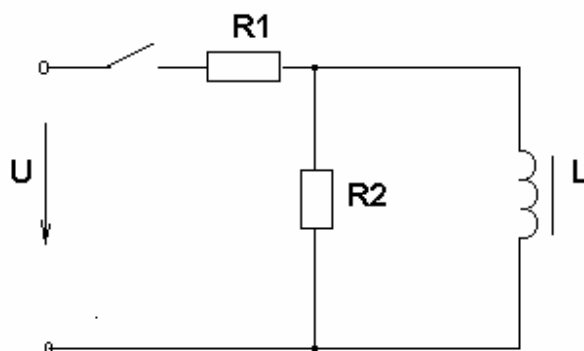


Рисунок 3.17 Схема цепи к заданию

Вариант вебер-амперной характеристики нелинейной индуктивности выбирается согласно номеру N студента в групповом журнале (последней цифрой шифра студента) (табл. 4).

$$f=50 \text{ Гц}$$

$$R1=10-0,25N \text{ Ом}$$

$$R2=30-0,25N \text{ Ом}$$

$U=380-10n$ В, где n – номер группы (предпоследняя цифра шифра студента).

Требуется выполнить следующее:

1. Аппроксимировать вебер-амперную характеристику многочленом вида $i = a_1 \cdot \Psi + a_2 \cdot \Psi^7$ по методу наименьших квадратов.
2. Построить график аппроксимирующей функции и сравнить его с исходным.
3. Методом условной линеаризации найти наибольшее возможное отношение максимального тока переходного процесса в нелинейной индуктивности к амплитуде тока в установившемся режиме.

4. Для заданной схемы составить систему уравнений по законам Кирхгофа и преобразовать ее в уравнение вида $\frac{d\Psi}{dt} = f(\Psi, t)$.

5. Рассчитать численным методом потокосцепление и токи в цепи для случая наиболее возможного максимального тока переходного процесса.

6. Построить графики потокосцепления и токов в цепи.

Таблица 4 Вебер-амперная характеристика

N	i, A	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,2	3	4	6	8
1	Ψ, Вб	0	0.4	1.36	1.69	1.85	2.07	2.33	2.67	2.78	2.85
2		0	0,39	1.33	1.65	1.8	2.02	2.27	2.6	2.71	2.78
3		0	0,38	1.29	1.6	1.76	1.97	2.21	2.53	2.64	2.71
4		0	0,37	1.26	1.56	1.71	1.91	2.15	2.47	2.57	2.64
5		0	0,36	1.23	1.52	1.67	1.86	2.09	2.4	2.5	2.57
6		0	0,35	1.19	1.48	1.62	1.81	2.03	2.34	2.43	2.5
7		0	0,34	1.16	1.43	1.57	1.76	1.98	2.27	2.36	2.42
8		0	0,33	1.12	1.39	1.53	1.71	1.92	2.2	2.29	2.35
9		0	0,32	1.09	1.35	1.48	1.65	1.86	2.14	2.25	2.28
10		0	0,31	1.06	1.31	1.44	1.6	1.8	2.07	2.15	2.21
11		0	0,3	1.02	1.27	1.39	1.55	1.74	2	2.08	2.14
12		0	0,29	0.99	1.23	1.34	1.5	1.69	1.93	2.02	2.07
13		0	0,28	0.95	1.18	1.3	1.45	1.63	1.87	1.95	2
14		0	0,27	0.92	1.14	1.25	1.4	1.57	1.8	1.88	1.93
15		0	0,26	0.88	1.09	1.2	1.35	1.51	1.74	1.8	1.85
16		0	0,25	0.85	1.06	1.16	1.3	1.45	1.57	1.74	1.78
17		0	0,24	0.81	1.01	1.11	1.24	1.4	1.6	1.67	1.71
18		0	0,23	0.78	0.97	1.06	1.19	1.34	1.54	1.6	1.64
19		0	0,22	0.75	0.93	1.02	1.14	1.28	1.47	1.53	1.57
20		0	0,21	0.72	0.89	0.97	1.09	1.22	1.04	1.46	1.5

Методические указания к выполнению задания

Расчет линейной цепи производится двумя методами: классическим и операторным.

Алгоритм расчета переходных процессов классическим методом

1. В схеме до коммутации рассчитываются токи в индуктивностях $i_L(0-)$ и напряжения на емкостях $u_C(0-)$. Затем, используя законы коммутации, определяются независимые начальные условия: $i_L(0+) = i_L(0-)$ и $u_C(0+) = u_C(0-)$.

2. В схеме после коммутации известными методами находят принужденные составляющие искомых токов и напряжений.

3. Составляется характеристическое уравнение. Для этого записывают входное сопротивление пассивной (ЭДС закорочены и ветви с источниками тока разомкнуты) цепи после коммутации относительно любой ветви и приравнивают его к нулю. При нахождении входного сопротивления, сопротивление индуктивности считается равным pL , а емкости – $1/pC$.

4. После решения характеристического уравнения, исходя из характера корней, записывают выражения для свободных составляющих токов и напряжений, содержащих постоянные интегрирования.

5. Переходные значения искомых функций равны сумме принужденных и свободных составляющих ($i(t) = i_{np} + i_{св}$). Свободная составляющая содержит постоянные интегрирования, для определения которых могут понадобиться значения зависимых начальных условий.

6. Зависимые начальные условия находят по уравнениям Кирхгофа в послекоммутационной схеме с учетом независимых начальных условий. (Уравнения, возможно, придется дифференцировать).

7. Определяются постоянные интегрирования по зависимым и независимым начальным условиям (значениям токов или напряжений и их $n-1$ первых производных при $t=0+$). Здесь n – число корней характеристического уравнения.

8. Решение находится подстановкой постоянных интегрирования в общее решение.

Алгоритм расчета переходных процессов операторным методом

1. Определяют независимые начальные условия, рассматривая схему до коммутации и используя законы коммутации ($i_L(0+)$, $u_C(0+)$).

2. Составляют операторную схему (схему для изображений) для мгновенных значений токов и напряжений, заменяя их изображениями. Пассивные элементы схемы заменяют операторными схемами замещения (сопротивления резистивных, индуктивных и емкостных элементов

считают равными R , pL и $1/pC$ соответственно). Начальные условия в этой схеме учитывают введением дополнительных ЭДС (источников тока). В ветвях, содержащих индуктивные элементы, дополнительные ЭДС равны $Li(0+)$ и по направлению совпадают с положительными направлениями тока. В ветвях с емкостными элементами дополнительные ЭДС равны $u_C(0+)/p$ и противоположны положительным направлениям u_C .

3. Составляют уравнение цепи в операторной форме, используя операторную схему замещения любым методом, основанным на уравнениях Кирхгофа.

4. Решают операторные уравнения цепи относительно изображений искомых токов и напряжений.

5. Определение оригиналов искомых токов и напряжений производят с применением таблиц обратного преобразования Лапласа или по теореме разложения.

МЕТОД ЛИНЕЙНОЙ АППРОКСИМАЦИИ

При расчете характеристику нелинейного элемента заменяют прямой, проходящей через точку с координатами, соответствующими установившемуся режиму. Уравнения прямой подставляют в дифференциальное уравнение схемы и получают линейное дифференциальное уравнение. Этот метод можно использовать, если в цепи имеются элементы, играющие второстепенную роль по сравнению с другими. Это значит, что максимальное влияние этого элемента в переходном процессе значительно меньше других элементов. Пренебрежение влиянием этого элемента позволяет приближенно рассчитать установившийся режим и произвести условную линеаризацию уравнений цепи.

Расчет переходного процесса в линеаризованной цепи определяет переходный режим. Этот метод используют для ориентировочных расчетов.

Для использования численных методов расчета переходного процесса нужно аппроксимировать характеристику нелинейного элемента, заданную таблично. В программе MathCAD это можно сделать, используя или кубические сплайны, или метод наименьших квадратов, когда минимизируется сумма квадратов отклонений аппроксимирующей кривой от заданных значений в узловых точках.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОАТТЕСТАЦИИ

I

Линейные электрические цепи постоянного тока

1. Определите понятия «электрическая цепь», «электрический ток», «напряжение», «единицы измерения», «направления».
2. Пассивные двухполюсники, направления токов и напряжений. Резистивный элемент, ВАХ, сопротивление и проводимость, мощность. Индуктивный и емкостный элементы, их характеристики, накопленная энергия.
3. Активные двухполюсники, ВАХ реального источника энергии, источник ЭДС и источник тока, схемы замещения реального источника энергии.
4. Электрическая схема и ее топологические элементы: узел, устранимый узел, ветвь, путь, контур.
5. Закон Ома для ветви с ЭДС (компонентные уравнения). Выбор условных положительных направлений токов и напряжений ветвей.
6. Сформулируйте первый закон Кирхгофа. Запишите в буквенном виде, сколько уравнений следует составлять по первому закону Кирхгофа.
7. Сформулируйте второй закон Кирхгофа. Запишите в буквенном виде, сколько уравнений следует составлять по второму закону Кирхгофа. Для второго закона Кирхгофа дайте две формулировки.
8. Выбор независимых контуров, для которых следует составлять уравнения по второму закону Кирхгофа. Почему ни в один из этих контуров не должен входить источник тока?
7. Поясните этапы построения потенциальной диаграммы.
9. Этапы расчета цепей методом законов Кирхгофа.
10. Охарактеризуйте основные этапы метода контурных токов МКТ. Число уравнений по МКТ.
11. Охарактеризуйте основные этапы метода узловых потенциалов МУП. Число уравнений по МУП.
12. Сформулируйте принцип и метод наложения.
13. Сформулируйте и докажите теорему компенсации.
14. Входные и взаимные проводимости, их определение аналитическим и опытным путем?
15. Метод двух узлов и МУП.
16. Метод преобразования схем, преобразования звезды в треугольник и треугольника в звезду.

17. Теорема взаимности.
18. Теорема об эквивалентном генераторе, условия применения и этапы расчета методом эквивалентного генератора.
19. Условие передачи максимальной мощности нагрузке. Согласованный режим цепи, его КПД и возможности использования.
20. Способы повышения КПД электрической цепи.

Линейные электрические цепи синусоидального тока

1. Величины, характеризующие синусоидально изменяющуюся функцию. Определение амплитуды, периода, частоты, фазы, начальной фазы.
2. Среднее и действующее значения синусоидальной величины.
3. Синусоидальный ток, его комплексное изображение, комплексное действующее значения тока и напряжения. Векторные диаграммы.
4. Синусоидальный ток в резистивном элементе, закон Ома, векторная диаграмма, мгновенная и активная мощность.
5. Синусоидальный ток в индуктивности, закон Ома, векторная диаграмма, мгновенная и реактивная мощность.
6. Синусоидальный ток в емкости, закон Ома, векторная диаграмма, мгновенная и реактивная мощность.
7. Синусоидальный ток в RL -цепи закон Ома, комплексное сопротивление, векторная диаграмма, мгновенная, активная и реактивная мощности.
8. Синусоидальный ток в параллельной RC -цепи, закон Ома, комплексная проводимость, векторная диаграмма, мгновенная, активная и реактивная мощности.
9. Синусоидальный ток в цепи $R L C$, закон Ома в комплексной форме, комплексное сопротивление, векторная диаграмма, мгновенная, активная и реактивная мощности.
10. Синусоидальный ток в цепи с параллельным соединением R, L, C , комплексная проводимость, векторная диаграмма.
11. Две схемы замещения пассивного двухполюсника в цепях синусоидального тока, комплексное сопротивление и комплексная проводимость, алгебраическая и показательная форма их записи.
12. Комплексный метод расчета цепей синусоидального тока. На каком основании все методы расчета цепей постоянного тока применимы к цепям синусоидального тока?

13. Дайте определение векторной и топографической диаграммам. Как определить напряжение между двумя точками схемы по топографической диаграмме?

14. Физическая интерпретация активной, реактивной и полной мощности: P , Q , S . Единицы их измерения.

15. Выразите комплексную мощность \tilde{S} через комплексы напряжения и тока. Сформулируйте теорему о балансе активных и реактивных мощностей.

16. Условие и особенности режима резонанса напряжений двухполюсника.

17. Частотные характеристики последовательного контура, добротность, полоса пропускания.

18. Условие и особенности режима резонанса токов. Частотные характеристики параллельного контура.

19. Коэффициент мощности и пути его повышения.

20. Какой должна быть взята нагрузка, присоединяемая к активному двухполюснику, чтобы в ней выделялась максимальная мощность?

Индуктивно связанные цепи

1. Индуктивно связанные элементы цепи, взаимная индукция, само- и взаимная индуктивности, единицы их измерения, одноименные зажимы, направления напряжений взаимной индукции и токов их индуцирующих.

2. Последовательное соединение индуктивно связанных элементов цепи, согласное и встречное соединение, сопротивления, векторные диаграммы.

3. Параллельное соединение индуктивно связанных элементов цепи. 4. Расчет цепей при наличии индуктивных связей.

5. Развязка индуктивных связей. Целью ее осуществления.

6. Мощность, переносимая магнитным путем из одной ветви в другую, с ней магнитно-связанную.

7. Воздушный трансформатор, вносимое сопротивление, смысл вносимого сопротивления в трансформаторе.

8. Эквивалентная схема трансформатора.

9. Определение идеального трансформатора.

10. Входное сопротивление идеального трансформатора, если сопротивление нагрузки \underline{Z}_H .

Трехфазные цепи

1. Трехфазные симметричные системы ЭДС прямой, обратной и нулевой последовательности.
2. Соединение звездой и треугольником. Линейные и нулевой провода, линейные и фазные напряжения и токи.
3. Как вы объясните, что напряжения, которые получают от трехфазных цепей, могут быть представлены следующим рядом: 127, 220, 380, 660 В?
4. Каковы функции нулевого провода в системе «звезда»-«звезда» при несимметричной нагрузке?
5. При каких способах соединения генератора с нагрузкой линейный ток равняется фазному току?
6. При каких способах соединения генератора с нагрузкой линейное напряжение равняется фазному току?
7. Расчет симметричной цепи при соединении «звезда»-«звезда».
8. Расчет симметричной цепи при соединении «треугольник»-«звезда».
9. Расчет несимметричной цепи при соединении «звезда»-«звезда».
10. Расчет несимметричной цепи при соединении «треугольник»-«треугольник».
11. Расчет несимметричной цепи при соединении «треугольник»-«звезда».
12. Соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении несимметричной нагрузки «звездой».
13. Соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении несимметричной нагрузки «треугольником».
14. Соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении симметричной нагрузки «звездой».
13. Соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении симметричной нагрузки «треугольником».
16. Как экспериментально определить зажимы фаз А, В, С симметричной трехфазной системы напряжений?
17. Активная, реактивная и полная мощности трехфазной системы?
18. Почему при симметричной нагрузке расчет можно вести на одну фазу?
19. Почему активную мощность трехфазной системы при наличии нулевого провода нельзя измерять с помощью схемы с двумя ваттметрами?
20. Охарактеризуйте условия получения трехфазного кругового вращающегося магнитного поля.

Метод симметричных составляющих

1. Выражение несимметричной трехфазной системы векторов через составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности.
2. Свойства трехфазных цепей в отношении симметричных составляющих токов и напряжений.
3. Разложение несимметричной трехфазной системы на симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательности.
4. Почему сопротивление на фазу элементов трехфазных систем (линии передачи, трехстержневого трансформатора, асинхронного двигателя) неодинаково для различных последовательностей?
5. Сопротивления симметричной трехфазной цепи для токов различных последовательностей.
6. Расчет симметричной трехфазной цепи при несимметричной системе напряжений методом симметричных составляющих.
7. Расчет трехфазной цепи методом симметричных составляющих при продольной несимметрии.
8. Метод симметричных составляющих при поперечной несимметрии в трехфазной цепи.
9. Дополнительные уравнения к уравнениям Кирхгофа – причина их необходимости.
10. Необходимость применения теоремы о компенсации при расчете цепей методом симметричных составляющих.

II

Цепи несинусоидального тока

1. Случаи возникновения несинусоидальных токов и напряжений в электрических цепях.
2. Разложение периодических несинусоидальных функций в ряд Фурье.
3. Гармонический состав разложения функции в ряд Фурье при наличии симметрии несинусоидальных кривых.
4. Характеристики формы периодических несинусоидальных кривых.
5. Методика расчета линейных цепей при периодических

несинусоидальных воздействиях.

6. Действующее значение несинусоидального тока и его физический смысл.

7. Всегда ли самым коротким расчетным путем при определении действующего значения несинусоидального тока I является нахождение его по гармоническому составу?

8. Укажите системы приборов для измерения: а) действующего значения несинусоидального тока; б) постоянной составляющей; в) действующего значения переменной составляющей.

9. Как складываются действующие значения токов различных частот?

10. Активная, реактивная и полная мощности периодического несинусоидального тока, коэффициент мощности.

11. Гармонический состав несинусоидального тока и коэффициент мощности

12. При каких условиях несинусоидальные токи и напряжения приближенно могут быть заменены эквивалентными синусоидальными?

13. Чем можно объяснить, что при равномерной нагрузке трехфазной системы «звезда»-«звезда» для протекания токов третьих гармоник необходим нулевой провод?

14. Как зависит комплексное сопротивление ветви от номера гармоники?

15. Причины отличия формы кривой тока от формы кривой напряжения в цепи несинусоидального тока.

Нелинейные цепи постоянного тока

1. Дайте определения следующим понятиям: нелинейный резистор (НР), нелинейная электрическая цепь, статическое сопротивление, дифференциальное сопротивление.

2. Определение управляемых током, управляемых напряжением и неуправляемых нелинейных резисторов.

3. Качественно изобразите ВАХ неуправляемых и управляемых нелинейных резисторов.

4. Изобразите ВАХ нелинейного резистора, с отрицательным дифференциальным сопротивлением.

5. Может ли для реальных нелинейных резисторов статическое сопротивление быть отрицательным?

6. В чем заключается препятствие, затрудняющее применять метод контурных токов или метод узловых потенциалов для расчета сложных

разветвленных нелинейных цепей?

7. Как заменить несколько параллельных ветвей с нелинейными резисторами и источниками ЭДС на одну эквивалентную? Определите характеристики элементов эквивалентной ветви.

8. Этапы расчета нелинейных цепей (НЦ) методом двух узлов.

9. Этапы расчета нелинейных цепей (НЦ) методом эквивалентного генератора.

Магнитные цепи при постоянных магнитных потоках

1. Дайте определения \vec{B} , \vec{J} , \vec{H} , Φ , μ_a , μ_0 , μ . Как они связаны между собой и в каких единицах выражаются?

2. В чем отличие начальной, основной и безгистерезисной кривых намагничивания?

3. Что понимают под частным и предельным циклами, остаточной индукцией, коэрцитивной силой, магнитомягкими и магнитотвердыми материалами?

4. Чем физически объясняются потери на гистерезис? Как их определить, располагая петлей гистерезиса?

5. Сформулируйте закон полного тока.

6. Дайте определение следующим понятиям: магнитная цепь, магнитопровод, ветвь магнитной цепи, магнитный поток, магнитное напряжение, МДС.

7. Как определить направление МДС?

8. С какой целью стремятся выполнить магнитную цепь с возможно меньшим воздушным зазором?

9. Как выбирают направление магнитных потоков в ветвях?

10. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа для магнитных цепей.

11. Поясните, как построить вебер-амперную характеристику участка цепи.

12. Перечислите этапы расчета магнитной цепи методом двух узлов.

Нелинейные цепи переменного тока

1. В чем принципиальное отличие феррорезонанса напряжений и токов от соответствующих резонансов в линейных цепях?

2. Объяснить скачки тока в последовательной схеме с

индуктивностью со стальным сердечником и емкостью.

3. Возможны ли скачки тока в последовательной схеме с индуктивностью со стальным сердечником и емкостью, если источником питания схемы будет не источник ЭДС, а источник тока?

4. Можно ли ожидать возникновения скачков тока или напряжения в параллельной схеме с индуктивностью со стальным сердечником и емкостью, если на входе ее будет источник ЭДС?

5. Дайте определение понятий: индуктивность рассеяния, намагничивающий ток, ток потерь.

6. Схема замещения и векторная диаграмма нелинейной индуктивной катушки.

7. Причины потерь в катушке со стальным сердечником и способы их уменьшения.

8. Схема замещения трансформатора со стальным сердечником.

9. Векторная диаграмма трансформатора со стальным сердечником при активно-емкостной нагрузке.

Переходные процессы в электрических цепях

1. Дайте определение переходному процессу, коммутации.

2. Сформулируйте законы (правила) коммутации.

3. Дайте определение зависимым и независимым начальным условиям. Методы их нахождения.

4. Принужденные и свободные токи и напряжения.

5. Способы составления характеристического уравнения.

6. Объясните, почему при составлении характеристического уравнения путем приравнивания нулю входного сопротивления $Z(p)=N(p)/M(p)$ в общем случае нельзя сокращать числитель и знаменатель дроби на общий множитель.

7. Чем определяется число корней характеристического уравнения?

8. Сущность классического метода расчета и принцип составления уравнений для определения постоянных интегрирования.

9. Зависимость характера свободного процесса от корней характеристического уравнения.

10. Алгоритм расчета переходного процесса классическим методом.

11. Включение цепи RL на постоянное напряжение.

12. Включение цепи RL на синусоидальное напряжение.

13. Замыкание цепи RC .

14. Запишите соотношения между $f(t)$ и $F(p)$, а также теоремы операторного метода и предельные соотношения.

15. Операторные уравнения и операторные эквивалентные схемы цепи.
16. Теорема разложения.
17. Охарактеризуйте этапы расчета операторным методом.
18. Свойства единичной функции $l(t)$ и свойства дельта-функции $\delta(t)$.
19. Определите переходную и импульсную переходную проводимости (сопротивления) и функции. Укажите, с какой целью они используются.
20. Охарактеризуйте идею расчета с помощью интеграла Дюамеля.

Четырехполюсники

1. Y, Z, A – формы записи уравнений четырехполюсника, покажите для них положительные направления токов и напряжений и поясните, в каких случаях каждая форма записи имеет преимущества перед остальными.
2. Какие четырехполюсники называют симметричными и несимметричными?
3. Как опытным путем определить коэффициенты четырехполюсника?
4. Каким образом, зная коэффициенты одной формы записи, определить коэффициенты другой формы?
5. Схемы замещения пассивных четырехполюсников.
6. Соединения четырехполюсников и различные формы записи их уравнений.
7. Что понимают под характеристическим сопротивлением четырехполюсника?
8. Что понимают под постоянной передачи симметричного четырехполюсника?
9. В каких единицах измеряют затухание? Как эти единицы связаны между собой?

Цепи с распределенными параметрами

1. Условия обращения к цепям с распределенными параметрами, первичные параметры длинной линии.
2. Телеграфные уравнения для мгновенных значений тока и напряжения, переход к уравнениям для комплексных значений, вид

решения.

3. Представление напряжения и тока в линии бегущими волнами, затухание и скорость.

4. Вторичные параметры линии, физический смысл постоянной распространения γ и волнового сопротивления Z_B ?

5. Из каких условий определяют постоянные A_1 и A_2 в волновом решении уравнений длинной линии?

6. Представление решения уравнений длинной линии уравнениями четырехполюсника

7. Как определить Z_B и γ опытным путем?

8. Указать условия, когда сигнал, проходя по линии, не изменяет своей формы?

9. Почему в линии передачи информации стремятся брать $Z_H = Z_B$?

10. Линии без искажений.

11. Линии без потерь.

III

Электромагнитное поле

1

1. Определение электростатического поля. Уравнение электростатики.

2. Физический смысл напряженности и потенциала электростатического поля. Точность определения потенциала.

3. Связь между напряженностью E и потенциалом φ .

4. Условие потенциальности поля.

5. Определение силовой линии и эквипотенциальной поверхности.

6. Источники вектора индукции электростатического поля.

7. Понятие картины поля.

8. Отличие свободных зарядов от связанных.

9. Явление электростатической индукции.

10. Поляризация и вектор поляризации.

11. Основание для введения вектора индукции электрического поля \vec{D} .

12. Теорема Гаусса.

13. Смысл понятия градиента.

14. Физическое толкование дивергенции.

15. Поведение векторов \vec{D} и \vec{E} при переходе через границу двух диэлектриков.

16. Теорема единственности решения задач электростатики.
17. Поле заряженной оси и коаксиального кабеля.
18. Поле двух заряженных осей.
19. Поле двухпроводной линии.
20. Поле заряженного отрезка.
21. Метод зеркальных изображений.
22. Потенциальные и емкостные коэффициенты, частичные емкости.
23. Метод разделения переменных.
24. Цель транспозиции проводов трехфазной линии.
25. Влияние транспозиции проводов трехфазной линии на потенциальные коэффициенты.
26. Понятие сторонней напряженности поля

2

1. Закон Ома и обобщенный закон Ома.
2. Вектор плотности тока.
3. Поведение векторов напряженности и плотности тока на границе раздела сред с различными удельными проводимостями.
4. Уравнение поля постоянного тока в проводящей среде.
5. Аналогия электрического поля постоянных токов и электростатического поля.
6. Моделирование электростатического поля полем постоянного тока.
7. Возможность использования решения задач электростатики для решения задач в поле проводящей среды.
8. Сопротивление полусферического заземлителя.
9. Сопротивление длинного цилиндрического заземлителя.

3

1. Уравнения магнитного поля постоянных токов.
2. Физический смысл векторов \vec{B} , J , H .
3. Толкование понятия «ротор».
4. Условие, определяющее вихревое поле.
5. Непрерывность линий индукции магнитного поля.
6. Поведение векторов \vec{B} и \vec{H} при переходе через границу раздела сред с различными μ .

7. Условия использования понятия скалярного магнитного потенциала.

8. Понятие «поток вектора индукции магнитного поля».

9. Точность определения векторного потенциала магнитного поля.

10. Векторный потенциал магнитного поля.

11. Неопределенность определения векторного потенциала.

12. Причина требования $\operatorname{div} \vec{A}=0$ для векторного потенциала.

13. Уравнение для определения векторного потенциала.

14. Выражение потока вектора индукции магнитного поля через векторный потенциал.

15. Выражение энергии магнитного поля через векторный потенциал.

16. Вычисление индуктивности и взаимной индуктивности тонких проводов.

17. Напряжение на проводах трехпроводной трехфазной линии.

18. Влияние транспозиции проводов трехфазной линии на взаимные индуктивности.

19. Условия введения понятия эквивалентной индуктивности провода трехфазной линии.

20. Поток вектора индукции магнитного поля.

4

1. Уравнения Максвелла в интегральной форме.

2. Атрибуты электромагнитного поля, присущие материи.

3. Принцип непрерывности полного тока.

4. Закон сохранения заряда и первое уравнение Максвелла.

5. Замкнутость линии магнитной индукции и второе уравнение Максвелла.

6. Уравнения Максвелла в дифференциальной форме.

7. Объяснить знак «минус» во втором уравнении Максвелла.

8. Связь закона электромагнитной индукции и закона Ленца.

9. Теорема Умова-Пойнтинга.

10. Смысл вектора Умова-Пойнтинга.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. электрические цепи [текст]. учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. - 11-е изд., перераб. и доп. - м : Юрайт, 2012. - 701 с. - (бакалавр. углубленный курс).

2. Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники [текст]. учебник для вузов. / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман. - 5-е изд. - СПб : Питер, 2009. - 512 с., ил.

3. Башарин С.А. Теоретические основы электротехники: Теория электрических цепей и электромагнитного поля [Текст] : учеб. пособие для вузов / С. А. Башарин, В. В. Федоров. - 4-е изд., перераб. и доп. - М : Академия, 2010. - 368 с. - (Высшее профессиональное образование. Электротехника).

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1

Построение векторной диаграммы в пакете Mathcad

Потенциалы зажимов (фазные напряжения) генератора.

$$\underline{U}_A := 380 \quad \underline{U}_B := 380 \cdot e^{-120j \cdot \text{deg}} \quad \underline{U}_C := 380 \cdot e^{120j \cdot \text{deg}}$$

Потенциал нейтральной точки приемника (напряжение смещения нейтрали)

$$\underline{U} := 92 \cdot e^{153j \cdot \text{deg}}$$

Падения напряжения в линиях

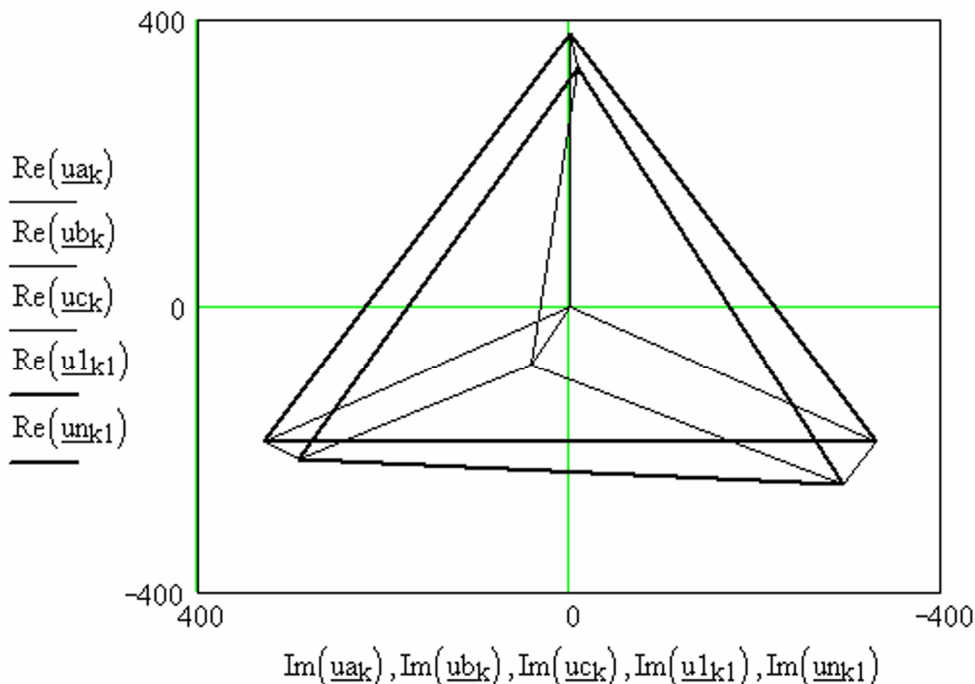
$$\underline{U}_{cl} := 45 \cdot e^{55j \cdot \text{deg}} \quad \underline{U}_{bl} := 70 \cdot e^{-30j \cdot \text{deg}} \quad \underline{U}_{al} := 50 \cdot e^{10j \cdot \text{deg}}$$

Потенциалы зажимов приемников.

$$\underline{V}_a := -\underline{U}_{al} + \underline{U}_A \quad \underline{V}_b := -\underline{U}_{bl} + \underline{U}_B \quad \underline{V}_c := -\underline{U}_{cl} + \underline{U}_C$$

$$\underline{u}_{ak} := \underline{u}_{bk} := \underline{u}_{ck} := \quad \underline{u}_{l_{k1}} := \underline{u}_{n_{k1}} :=$$

0	0	0		
\underline{U}	\underline{U}	\underline{U}	\underline{U}_A	\underline{V}_a
\underline{V}_a	\underline{V}_b	\underline{V}_c	\underline{U}_B	\underline{V}_b
\underline{U}_A	\underline{U}_B	\underline{U}_C	\underline{U}_C	\underline{V}_c
0	0	0	\underline{U}_A	\underline{V}_a



Приложение 2

Аппроксимация зависимости $B(H)$ кубическими сплайнами в пакете Mathcad

ТАБЛИЦА 9

Кривая намагничивания

H, А/м	20	40	60	80	120	200	400	600	800
B, Тл	0,22	0,75	0,93	1,02	1,14	1,28	1,47	1,53	1,57

$\mathbf{B}:=(-1.57 -1.53 -1.47 -1.28 -1.14 -1.02 -0.93 -0.75 -0.22 0 0.22 0.75 0.93 1.02 1.14 1.28 1.47 1.53 1.57)^T$

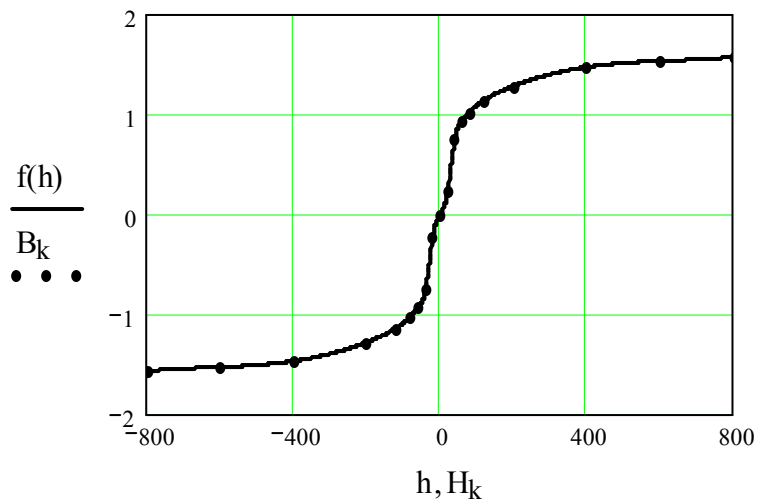
$\mathbf{H}:=(-800 -600 -400 -200 -120 -80 -60 -40 -20 0 20 40 60 80 120 200 400 600 800)^T$

$\mathbf{a}:=\text{cspline}(\mathbf{H},\mathbf{B})$

$\mathbf{f}(h) := \text{interp}(\mathbf{a},\mathbf{H},\mathbf{B},h)$

$\mathbf{h} := -800, -799..800$

$\mathbf{k} := 0, 1..18$



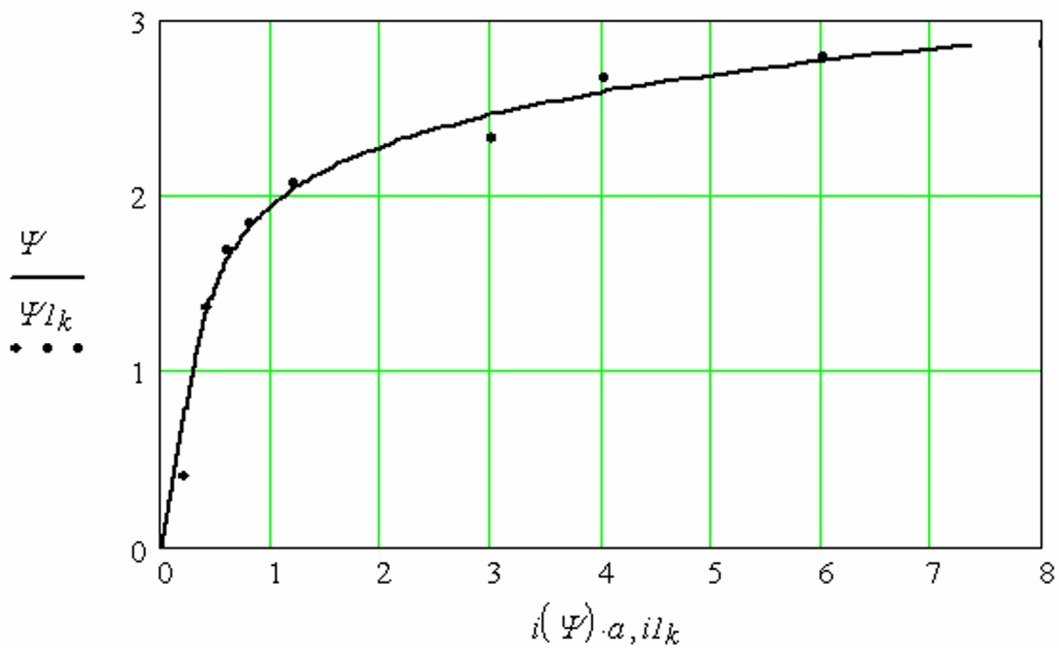
Приложение 3

Аппроксимация зависимости $i(\psi)$
по методу наименьших квадратов в пакете Mathcad

$$\Psi_l := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.4 \\ 1.36 \\ 1.69 \\ 1.85 \\ 2.07 \\ 2.33 \\ 2.67 \\ 2.78 \\ 2.85 \end{pmatrix} \quad i_l := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.2 \\ 0.4 \\ 0.6 \\ 0.8 \\ 1.2 \\ 3 \\ 4 \\ 6 \\ 8 \end{pmatrix} \quad i(\Psi) := \begin{pmatrix} \Psi \\ \Psi^2 \end{pmatrix}$$

$$a := \text{linfit}(\Psi_l, i_l, i) \quad a = \begin{pmatrix} 0.285 \\ 4.282 \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$\Psi := 0, 0.01.. 2.85 \quad k := 1, 2.. 9$$



Учебно-теоретическое издание

Теоретические основы электротехники : учебное пособие для студентов направлений подготовки 35.03.06 «Агроинженерия», профиль «Электрооборудование и электротехнологии», 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», профиль «Электроснабжение» очной и заочной форм обучения / сост. М.И. Мелешко. — Караваево : Костромская ГСХА, 2014. — 49 с.

Учебное пособие выпускается в авторской редакции.