

Документ подписан простой электронной подписью

Информация о владельце:

ФИО: Шебзухов Тимур Александрович

Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета

Дата подписания: 18.04.2024 16:10:00

Уникальный программный ключ:

d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

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

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

№ п/п	Содержание	Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование лабораторных работ	
4.	Содержание лабораторных работ	
4.1	Лабораторная работа № 1. Основные понятия и определения. Основные законы электротехники. Согласование источника и нагрузки по напряжению, току и мощности.	
4.2	Лабораторная работа № 2. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Исследование сложных цепей постоянного тока.	
4.3	Лабораторная работа №3. Электромагнитная индукция. Исследование цепей синусоидального тока с катушками индуктивности.	
4.4	Лабораторная работа №4. Электрические однофазного синусоидального тока. Исследование цепей синусоидального тока с конденсаторами.	
4.5	Лабораторная работа №5. Электрические однофазного синусоидального тока. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Резонанс напряжений.	
4.6	Лабораторная работа №6. Электрические однофазного синусоидального тока. Электрическая цепь синусоидального тока при параллельном включении активного и реактивных сопротивлений.	
4.7	Лабораторная работа №7. Трёхфазные цепи. Исследование трехфазной системы при соединении потребителей звездой.	
4.8	Лабораторная работа №8. Трёхфазные цепи. Трехфазная цепь при соединении потребителей по схеме треугольник.	
4.9	Лабораторная работа №9. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Частотные характеристики последовательного резонансного контура.	
4.10	Лабораторная работа №10. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Частотные характеристики параллельного резонансного контура.	

- 4.11 Лабораторная работа №11. Периодические несинусоидальные токи в линейных электрических цепях. Исследование линейной электрической цепи при периодическом несинусоидальном напряжении.
- 4.12 Лабораторная работа №12. Периодические несинусоидальные токи в линейных электрических цепях. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений.
- 4.13 Лабораторная работа №13. Феррорезонанс в электрических цепях. Феррорезонанс в последовательной цепи.
- 4.14 Лабораторная работа №14. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Исследование переходных процессов в цепи с ёмкостью.
- 4.15 Лабораторная работа №15. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Исследование переходных процессов в цепи с индуктивностью.
- 4.16 Лабораторная работа №16. Постоянная распространения и волновое сопротивление. Исследование режимов цепи с распределёнными параметрами.
- 4.17 Лабораторная работа №17. Электростатическое поле. Моделирование плоскопараллельных электростатических и магнитных полей током в проводящем листе.
- 4.18 Лабораторная работа №18. Магнитное поле постоянного тока. Исследование постоянного магнитного поля на оси катушек с помощью датчика Холла.
- 4.19 Лабораторная работа №19. Магнитное поле постоянного тока. Исследование взаимной индуктивности кольцевых катушек.
- 4.20 Лабораторная работа №20. Магнитное поле постоянного тока. Измерение магнитодвижущих сил и разности магнитных потенциалов.
- 4.21 Лабораторная работа №21. Распространение электромагнитных волн в однородном и изотропном диэлектрике и в полупроводящих и гиротропных средах. Исследование поляризационной кривой сегнетоэлектрика.
- 4.22 Лабораторная работа №22. Запаздывающие потенциалы переменного электромагнитного поля и излучение электромагнитной энергии. Исследование электромагнитных сил в постоянном магнитном поле.
- 4.23 Лабораторная работа №23. Распространение плоской электромагнитной волны в однородном полупроводящем пространстве. Исследование поверхностного эффекта и эффекта близости.
- 5 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

- 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
 - 5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
 - 5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины
- Приложения

Введение

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений, а также знакомство с электронными компонентами, оборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электронных схем и приборов, измерениям электрических величин. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях. В предлагаемом учебном пособии описано одиннадцать лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Целью дисциплины «Теоретические основы электротехники» является изучение студентами основных закономерностей процессов протекающих в электротехнических цепях и методов определения электрических величин, характеризующие эти процессы, приобретение теоретических и практических знаний по теоретическим основам электротехники, необходимых для успешного освоения последующих дисциплин специальности.

Задачи дисциплины состоят в освоении студентами:

- принципов составления и записи уравнений, описывающих процессы в цепи в соответствии с законами Кирхгофа, Ома, Фарадея - Максвелла - Ленца;
- основных принципов анализа процессов по линейным схемам замещения цепей: наложения, линейности, компенсации, взаимности;
- основных методов анализа линейных схем (методы контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного источника) и получении начальных сведений о возможности использования ЭВМ при расчетах;
- комплексного метода определения амплитуд и начальных фаз гармонических токов и напряжений в установившихся режимах;
- классического, операторного и интегрального метода анализа переходных процессов по линейным схемам замещения цепей, а также принципов составления уравнений и подготовки информации для расчета переходных процессов на ЭВМ методом переменных состояний;
- методов расчета электромагнитных процессов во взаимосвязанных контурах;
- основ теории четырехполюсников;
- методов построения фильтров и их расчета в электротехнических и электронных схемах;
- основ анализа процессов в цепях с распределенными параметрами;
- основ теории поля;
- методов электрических измерений с использованием измерительных приборов;
- основных процессов, протекающих в электрических цепях с негармоническими токами.

2. Оборудование и материалы

Лаборатория теоретических основ электротехники, релейной защиты и электробезопасности с интерактивным мультимедиа оборудованием

Аппаратные средства:

– Комплект типового лабораторного оборудования «Теоретические основы электротехники».

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения. Переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

3. Наименование лабораторных работ

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие лабораторные работы: Лабораторная работа № 2. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Исследование сложных цепей постоянного тока – 2 часа, практическая подготовка – 2 часа; Лабораторная работа №5. Электрические однофазного синусоидального тока. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Резонанс напряжений – 2 часа; Лабораторная работа №7. Трёхфазные цепи. Исследование трехфазной системы при соединении потребителей звездой – 2 часа, практическая подготовка – 2 часа; Лабораторная работа №14. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Исследование переходных процессов в цепи с ёмкостью – 2 часа; Лабораторная работа №16. Постоянная распространения и волновое сопротивление. Исследование режимов цепи с распределёнными параметрами – 2 часа, практическая подготовка – 2 часа; Лабораторная работа №17. Электростатическое поле. Моделирование плоскопараллельных электростатических и магнитных полей током в проводящем листе – 2 часа.

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
3 семестр			
1	Лабораторная работа № 1. Основные понятия и определения. Основные законы электротехники. Согласование источника и нагрузки по напряжению, току и мощности. Получить практические навыки сборки схем для экспериментальной проверки согласования источника и нагрузки по напряжению, току и мощности.	2	
2	Лабораторная работа № 2. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Исследование сложных цепей постоянного тока. Получить практические навыки сборки схем для экспериментальной проверки и расчета цепей постоянного тока с использованием закона Ома, первого и второго законов Кирхгофа.	4	2
3	Лабораторная работа №3. Электромагнитная индукция. Исследование цепей синусоидального тока с катушками индуктивности.	2	

	Приобрести практические навыки сборки и анализа цепей переменного синусоидального тока с катушками индуктивности.		
4	Лабораторная работа №4. Электрические однофазного синусоидального тока. Исследование цепей синусоидального тока с конденсаторами. Приобрести практические навыки сборки и анализа цепей переменного синусоидального тока с конденсаторами.	4	2
5	Лабораторная работа №5. Электрические однофазного синусоидального тока. Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Резонанс напряжений. Опытная проверка основных соотношений для последовательной цепи переменного тока, обладающей активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями.	2	
6	Лабораторная работа №6. Электрические однофазного синусоидального тока. Электрическая цепь синусоидального тока при параллельном включении активного и реактивных сопротивлений. Экспериментальная проверка зависимости активного и реактивных сопротивлений от частоты, а также соотношений между напряжением, сопротивлениями, проводимостями и токами в цепи с параллельно включенными активным сопротивлением, катушкой индуктивности и конденсатором.	4	
	Итого за 3 семестр:	18	4
4 семестр			
7	Лабораторная работа №7. Трёхфазные цепи. Исследование трехфазной системы при соединении потребителей звездой. Ознакомиться опытным путем с особенностями соединения звездой приемников электрической энергии в цепи трехфазного тока. Исследовать режимы равномерной и неравномерной нагрузок, а также работу системы при обрыве одной из фаз. Получить практические навыки расчета и испытания трехфазных цепей, а также построения векторных диаграмм.	2	2
8	Лабораторная работа №8. Трёхфазные цепи. Трёхфазная цепь при соединении потребителей по схеме треугольник. Исследовать особенности работы трехфазной цепи при соединении симметричного и несимметричного потребителей треугольником, усвоить построение векторных диаграмм по результатам эксперимента.	2	

9	Лабораторная работа №9. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Частотные характеристики последовательного резонансного контура. Исследовать частотные характеристики последовательного резонансного контура.	2	
10	Лабораторная работа №10. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Частотные характеристики параллельного резонансного контура. Исследовать частотные характеристики параллельного резонансного контура.	2	
11	Лабораторная работа №11. Периодические несинусоидальные токи в линейных электрических цепях. Исследование линейной электрической цепи при периодическом несинусоидальном напряжении. Приобрести практические навыки сборки и анализа линейных электрических цепей при периодическом несинусоидальном напряжении.	2	
12	Лабораторная работа №12. Периодические несинусоидальные токи в линейных электрических цепях. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений. Изучение студентами вольтамперных характеристик диодов и биполярных транзисторов.	2	
13	Лабораторная работа №13. Феррорезонанс в электрических цепях. Феррорезонанс в последовательной цепи. Изучение студентами вольтамперных характеристик и триггерного эффекта в последовательной феррорезонансной цепи.	2	
14	Лабораторная работа №14. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Исследование переходных процессов в цепи с ёмкостью. Закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих ёмкость, практическая проверка результатов расчёта.	2	2
15	Лабораторная работа №15. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Исследование переходных процессов в цепи с индуктивностью. Закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих индуктивность, практическая проверка результатов расчёта.	2	
	Итого за 4 семестр:	18	4
5 семестр			

16	Лабораторная работа №16. Постоянная распространения и волновое сопротивление. Исследование режимов цепи с распределёнными параметрами. Исследовать установившиеся электромагнитные процессы в длинной линии без потерь в режимах холостого хода и короткого замыкания; изучить влияние величины и характера нагрузки на режим работы линии.	2	2
17	Лабораторная работа №17. Электростатическое поле. Моделирование плоскопараллельных электростатических и магнитных полей током в проводящем листе. Получение картины силовых линий, моделируемых плоскопараллельным электромагнитным и электростатическим полем на токопроводящем листе и определение его напряженности или индуктивности в отдельных точках.	2	2
18	Лабораторная работа №18. Магнитное поле постоянного тока. Исследование постоянного магнитного поля на оси катушек с помощью датчика Холла. Измерение и расчет индуктивности вдоль оси цилиндрической и кольцевых катушек.	4	
19	Лабораторная работа №19. Магнитное поле постоянного тока. Исследование взаимной индуктивности кольцевых катушек. Определение опытным и расчётным путем зависимости взаимной индуктивности двух соосных одинаковых катушек от расстояния между ними.	2	
20	Лабораторная работа №20. Магнитное поле постоянного тока. Измерение магнитодвижущих сил и разности магнитных потенциалов. Проверка закона полного тока.	2	
21	Лабораторная работа №21. Распространение электромагнитных волн в однородном и изотропном диэлектрике и в полупроводящих и гиротропных средах. Исследование поляризационной кривой сегнетоэлектрика. Экспериментальное получение на экране осциллографа кулон-вольтовой характеристики нелинейного конденсатора и расчет поляризационной характеристики диэлектрика.	2	
22	Лабораторная работа №22. Запаздывающие потенциалы переменного электромагнитного поля и излучение электромагнитной энергии. Исследование электромагнитных сил в постоянном магнитном поле. Определение опытным и расчетным путем зависимости электромагнитной силы от тока в катушке.	2	

23	Лабораторная работа №23. Распространение плоской электромагнитной волны в однородном полупроводящем пространстве. Исследование поверхностного эффекта и эффекта близости. Исследование распределения тока в массивных проводниках.	2	
	Итого за 5 семестр:	18	4
	Итого:	54	12

4. Содержание лабораторных работ

Лабораторная работа № 1. Основные понятия и определения. Основные законы электротехники. Согласование источника и нагрузки по напряжению, току и мощности.

Цель работы: Получить практические навыки сборки схем для экспериментальной проверки согласования источника и нагрузки по напряжению, току и мощности

Основы теории:

Выходные величины напряжения, тока и мощности источника напряжения зависят от его первоначального напряжения (ЭДС) и внутреннего сопротивления, так же как от подключенной к нему нагрузки.

Режим называется согласованным, если сопротивление нагрузки равно внутреннему сопротивлению источника. При этом в нагрузке потребляется максимальная мощность.

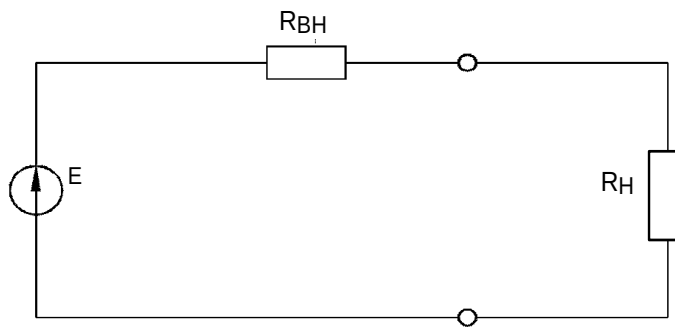


Рисунок 1 – Принципиальная схема электрической схемы

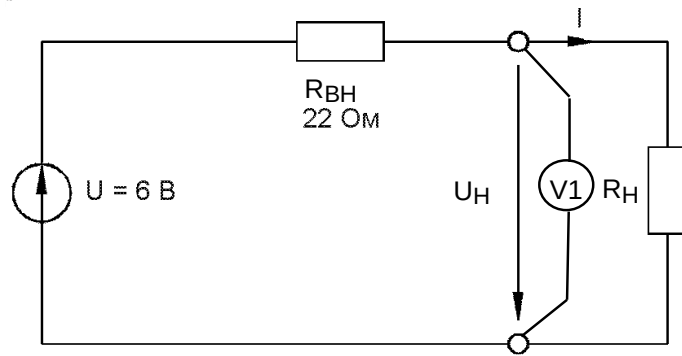
Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите цепь согласно схеме. Поскольку используемый источник питания сам по себе стабилизированный, что означает фактически $R_{вн} = 0$, он дополнен последовательно включенным резистором 22 Ома, имитирующим внутреннее сопротивление.

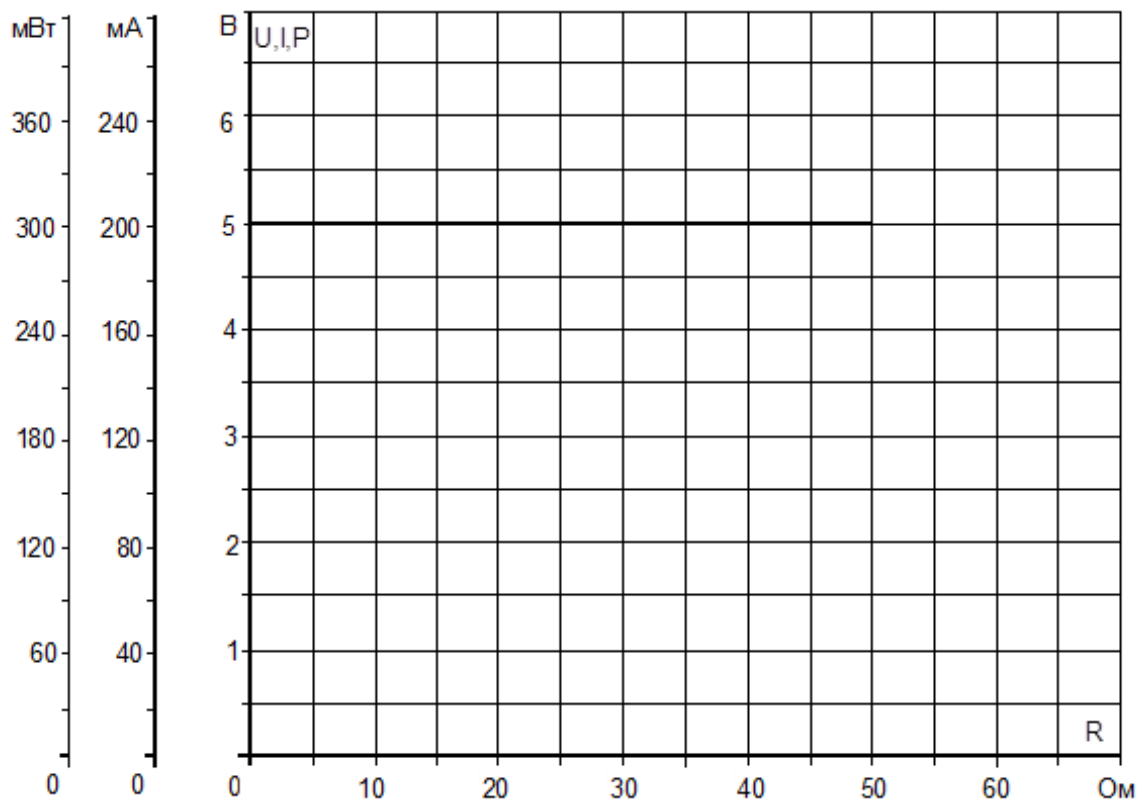
Затем следует измерить напряжение U_n и ток I_n при значениях сопротивления нагрузки R_n , указанных в табл. 1. Они могут быть набраны с использованием последовательного и параллельного соединения резисторов.



$R_H, \text{Ом}$	0	6,9 (10 22)	13,2 (22 33)	22	33	43 (10+33)	55 (22+33)	65 (22+33+10)	∞
$U_H, \text{В}$									
$I_H, \text{мА}$									
$P, \text{мВт}$									

Мощность источника напряжения рассчитывается по формуле $P = U \cdot I$ или измеряется непосредственно виртуальным ваттметром.

Занесите все величины в табл. 10.1 и на график (рис. 10.3) для построения кривых $I_H = f(R_H)$, $U_H = f(R_H)$ и $P = f(R_H)$.



Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Когда имеют место согласование по току, согласование по напряжению и согласование по мощности?

Лабораторная работа № 2. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Исследование сложных цепей постоянного тока.

Цель работы: Получить практические навыки сборки схем для экспериментальной проверки и расчета цепей постоянного тока с использованием закона Ома, первого и второго законов Кирхгофа.

Основы теории:

Сложной цепью постоянного тока называют электрическую цепь, состоящую из нескольких сопротивлений и источников напряжения, соединенных между собой тем или иным способом.

Узлом электрической цепи называется место соединения трех и более ветвей цепи. При наличии в схеме n таких узлов можно составить $(n - 1)$ уравнений согласно первому закону Кирхгофа. В соответствии с этим законом сумма токов, подходящих к узлу, равна сумме токов, отходящих от узла, или алгебраическая сумма всех токов в узле равна нулю, т.е. $\sum I = 0$. При этом необходимо токи, подходящие к узлу, записывать в уравнение с одним знаком (например «+»), а токи, отходящие от узла – с противоположным знаком.

При последовательном соединении нескольких сопротивлений (рис. 1.1 а) общее сопротивление участка равно сумме всех сопротивлений на этом участке: $R_{\Sigma} = R_1 + R_2 + R_3$. Ток на участке цепи с несколькими последовательно соединенными сопротивлениями будет равен (по закону Ома):

$$I = \frac{U}{R_{\Sigma}}$$

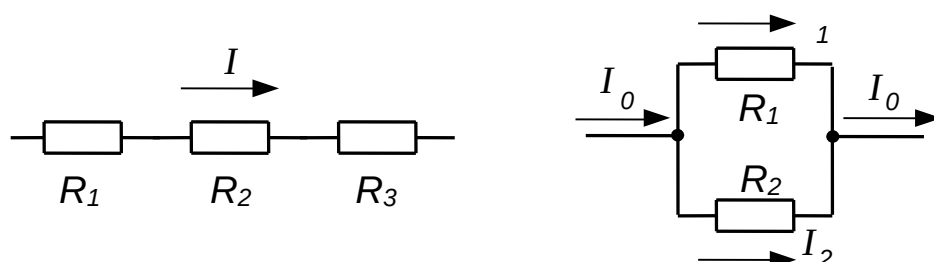


Рисунок 1.1 – Последовательное (а) и параллельное (б) соединение сопротивлений

При параллельном соединении двух сопротивлений (рис. 1, б) эквивалентное сопротивление определяется по формуле: $R_{\Sigma} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$.

Если известен ток I_0 , протекающий по неразветвленной части цепи, то токи I_1 и I_2 в сопротивлениях R_1 и R_2 можно определить по формулам:

$$I_1 = I_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$I_2 = I_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} .$$

При трех параллельно включенных сопротивлениях (рис. 1.2) эквивалентное сопротивление будет равно:

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_2 \cdot R_3 + R_1 \cdot R_3} .$$

Ветвью электрической цепи называется участок электрической цепи, заключенный между двумя узлами (например, контур $abefa$ на рис. 1.3).

В каждом контуре между электродвижущими силами (э.д.с.), имеющимися в цепи, и падениями напряжения на отдельных участках существует строго определенная зависимость, определяемая вторым законом Кирхгофа:

$$\Sigma E = \Sigma IR ,$$

т.е. алгебраическая сумма электродвижущих сил в данном контуре равна алгебраической сумме падений напряжений на участках цепи этого контура.

Для того, чтобы правильно записать уравнение по второму закону Кирхгофа, необходимо задаться направлением обхода этого контура (например, по ходу часовой стрелки). Если при обходе контура направление э.д.с. совпадает с направлением обхода, то ее записывают в левую часть уравнения со знаком «+», а если ее направление не совпадает с направлением обхода, то ее считают со знаком «-». Аналогично поступают со знаками падений напряжений. Если направление тока на участке цепи совпадает с направлением обхода, то IR на этом участке записывают со знаком «+», в противном случае – со знаком «-».

Покажем это на примере (рис. 1.3)

1. Для контура $abefa$, совершая обход по часовой стрелке, получим:

$$E_1 = I_1 R_1 + I_3 R_3$$

2. Для контура $bcedb$, совершая обход против часовой стрелки, получим:

$$E_1 = I_2 R_2 + I_3 R_3$$

3. Для контура $abcdefa$, совершая обход по часовой стрелке, получим:

$$E_1 - E_2 = I_1 R_1 - I_2 R_2$$

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Подобрать приборы, необходимые для выполнения работы, ознакомиться с ними и записать технические данные источников э.д.с., реостатов, измерительных приборов.
2. Собрать схему для проверки первого закона Кирхгофа (рис.1.2). Установить максимальные значения сопротивлений реостатов и измерить после замыкания ключа $Kл1$ токи в параллельных ветвях и общий ток цепи I_0 . Результаты измерений занести в таблицу 1.1.

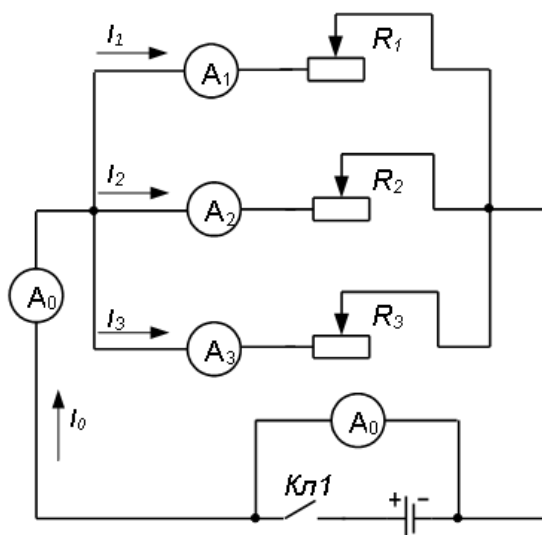


Рисунок 1.2 – Схема для проверки первого закона Кирхгофа

В опыте 1.2 следует передвинуть ползунки реостатов произвольно, наблюдая, чтобы стрелки амперметров не зашкаливали.

Таблица 1.1 – Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Результаты измерений					Результаты вычислений				
Обознач.	I_0	I_1	I_2	I_3	U	R_1	R_2	R_3	R_{Σ}	γ_0
Ед. изм.	A	A	A	A	B	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$\%$
Опыт 1										
Опыт 2										
Опыт 3										

По закону Ома вычислить сопротивление каждого реостата и эквивалентное сопротивление схемы R_3 . Вычислить относительную погрешность измерений $\gamma_0 \%$ по формуле:

$$\gamma = \frac{I_0 - (I_1 + I_2 + I_3)}{I_0} \cdot 100\%$$

3. Собрать схему (рис. 1.3) для проверки второго закона Кирхгофа.

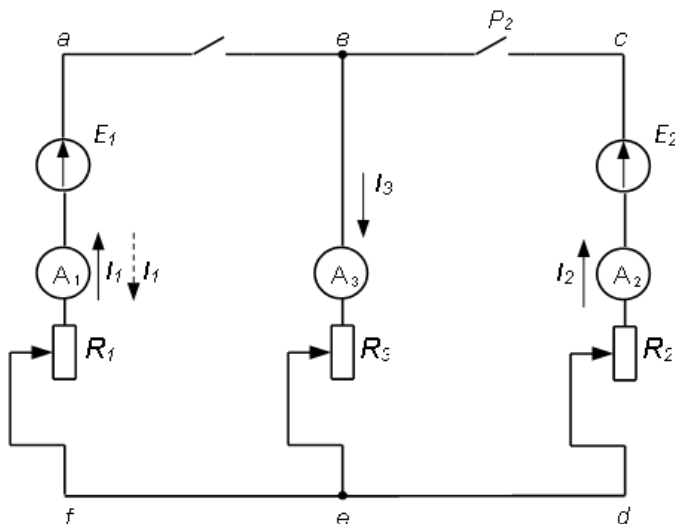


Рисунок 1.3 – Схема для проверки второго закона Кирхгофа

При разомкнутых рубильниках P_1 и P_2 измерить вольтметром величины э.д.с. каждого аккумулятора. Сопротивления реостатов R_1 , R_2 и R_3 измерить омметром. Токи на отдельных участках цепи измерить для трех случаев:

Опыт 1 – рубильник P_1 замкнут, P_2 – разомкнут.

Опыт 2 – рубильник P_2 замкнут, P_1 – разомкнут.

Опыт 3 – оба рубильника P_1 и P_2 замкнуты.

Результаты измерений и известные величины внутренних сопротивлений источников э.д.с. r_{01} и r_{02} занести в таблицу 2.

Таблица 1.2 – Результаты измерений и вычислений

№ п/п	Результаты измерений								Известные величины		Результаты вычислений				
	E_1	E_2	I_1	I_2	I_3	U_1	U_2	U_3	r_{01}	r_{02}	R_1	R_2	R_3	ΣIR	γ_0
	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>B</i>	<i>%</i>
Опыт 1															
Опыт 2															
Опыт 3															

По результатам измерений и вычислений сделать вывод о применимости второго закона Кирхгофа для расчета цепей постоянного тока.

Вычислить относительную погрешность для каждого из трех опытов

$$\gamma_0 = \frac{\Sigma E - \Sigma IR}{\Sigma E} \cdot 100\%$$

Для одного из контуров проверить баланс мощностей:

$$\Sigma EI = \Sigma I^2 R + \Sigma I^2 r_0$$

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

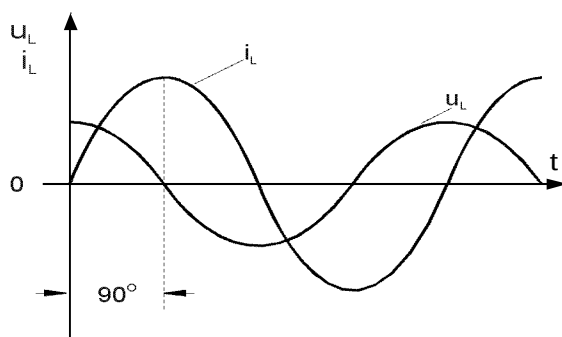
1. Сформулируйте закон Ома для участка электрической цепи, содержащего и не содержащего источник э.д.с..
2. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
3. Какие контуры схемы замещения являются независимыми?
4. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
5. От чего зависят знаки слагаемых при составлении уравнений по законам Кирхгофа?
6. Как по экспериментальным данным вычислить внутреннее сопротивление источника напряжения?
7. Как по полученным в лабораторной работе экспериментальным данным Вы проверяли справедливость законов Ома и Кирхгофа?
8. Какой метод Вы применили для расчёта электрической цепи? Поясните его сущность.
9. Поясните порядок составления уравнения баланса мощности и поясните его физическую сущность.

Лабораторная работа №3. Электромагнитная индукция. Исследование цепей синусоидального тока с катушками индуктивности.

Цель работы: Приобрести практические навыки сборки и анализа цепей переменного синусоидального тока с катушками индуктивности

Основы теории:

Когда к катушке индуктивности подведено синусоидальное напряжение, ток в ней отстает от синусоиды напряжения на ней на 90° . Соответственно, мгновенное значение тока достигает амплитудного значения на четверть периода позже, чем мгновенное значение напряжения. В этом рассуждении пренебрегается активным сопротивлением катушки.



Выведите на дисплей виртуального осциллографа кривые изменения во времени мгновенных значений тока i_L и напряжения u_L катушки индуктивности и определите фазовый сдвиг между ними.

Катушка индуктивности в цепи переменного тока оказывает токоограничивающий эффект благодаря индуцируемой в ней противоЭДС. Этот токоограничивающий эффект принято выражать как индуктивное реактивное сопротивление (индуктивный реактанс) X_L .

Величина индуктивного реактанса X_L зависит от величины индуктивности катушки, измеряемой в Генри, и частоты приложенного напряжения переменного тока. В случае синусоидального напряжения имеем

$$X_L = \omega L = 2\pi fL ,$$

где X_L - реактивное индуктивное сопротивление, Ом,

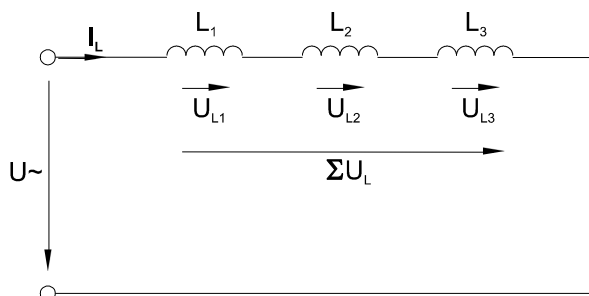
L - индуктивность катушки, Гн.

Если активное сопротивление катушки мало и им можно пренебречь, то реактивное (индуктивное) сопротивление можно определить через действующие значения или амплитуды напряжения и тока:

$$X_L = U_L / I_L \text{ или } X_L = U_{Lm} / I_{Lm}.$$

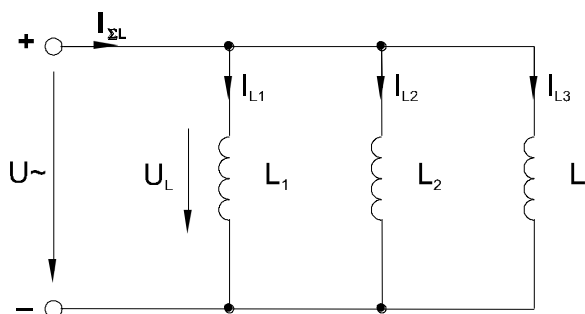
Когда несколько катушек соединены последовательно (рис. 5.3.1), эквивалентная индуктивность цепи равна сумме индуктивностей отдельных катушек:

$$L_{\Sigma} = L_1 + L_2 + L_3 + \dots$$



При параллельном соединении катушек эквивалентная индуктивность цепи меньше индуктивности наименьшей катушки. Вычисляется она по формуле:

$$1/L_{\Sigma} = 1/(1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3 + \dots).$$



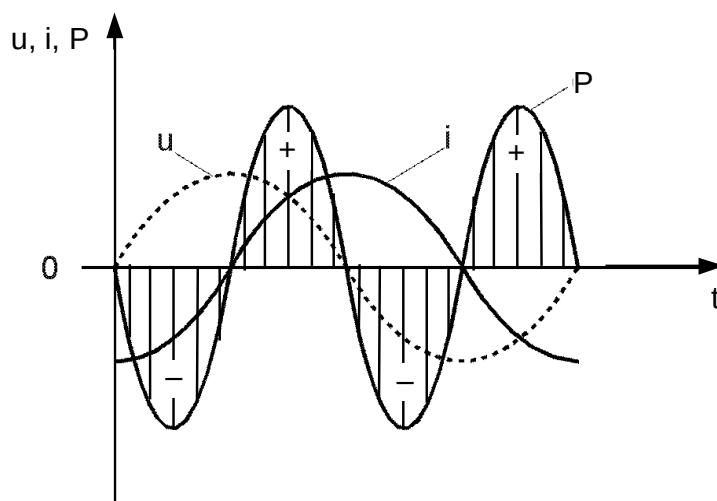
Если последовательно соединены только 2 катушки, общая индуктивность равна

$$L_{\Sigma} = L_1 \cdot L_2 / (L_1 + L_2).$$

Токи в отдельных катушках обратно пропорциональны соответствующим индуктивностям, и их сумма равна общему току цепи. Напряжение, приложенное к каждой катушке, одинаково и равно U .

Когда катушка индуктивности подключена к переменному синусоидальному напряжению, в ней возникает синусоидальный ток, отстающий по фазе от напряжения на 90° .

Изменение во времени мгновенной мощности, потребляемой в катушке, может быть представлено на графике путем перемножения мгновенных значений тока i и напряжения u . Положительная полуволна кривой мощности равнозначна подведению энергии к катушке. Во время отрицательной полуволны катушка отдает запасенную ранее энергию магнитного поля. В идеальной катушке потерь активной мощности нет. В действительности же возвращаемая энергия всегда меньше потребляемой из-за потерь энергии в активном сопротивлении катушки.



В идеальной катушке (при $R=0$) график мощности $p(t)$ представляет собой синусоиду двойной частоты с амплитудой

$$Q_L = U_{Lm} I_{Lm}/2 = U_L I_L.$$

Это значение является максимальной мощностью, потребляемой или отдаваемой идеальной катушкой индуктивности. Она называется индуктивной реактивной мощностью.

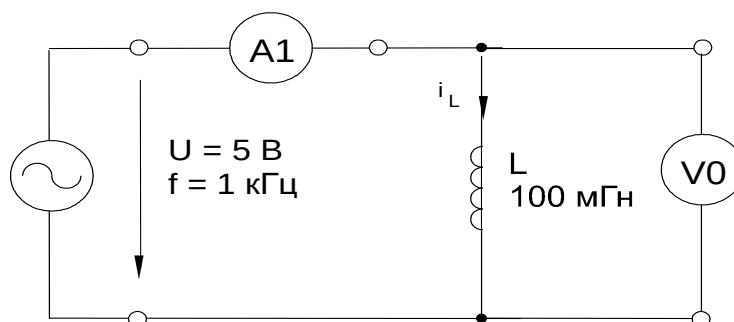
Средняя (активная) мощность, потребляемая такой катушкой, равна нулю

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите цепь согласно схеме, подключите к ее входу регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами: $U=5\text{В}$, $f = 1 \text{ кГц}$.

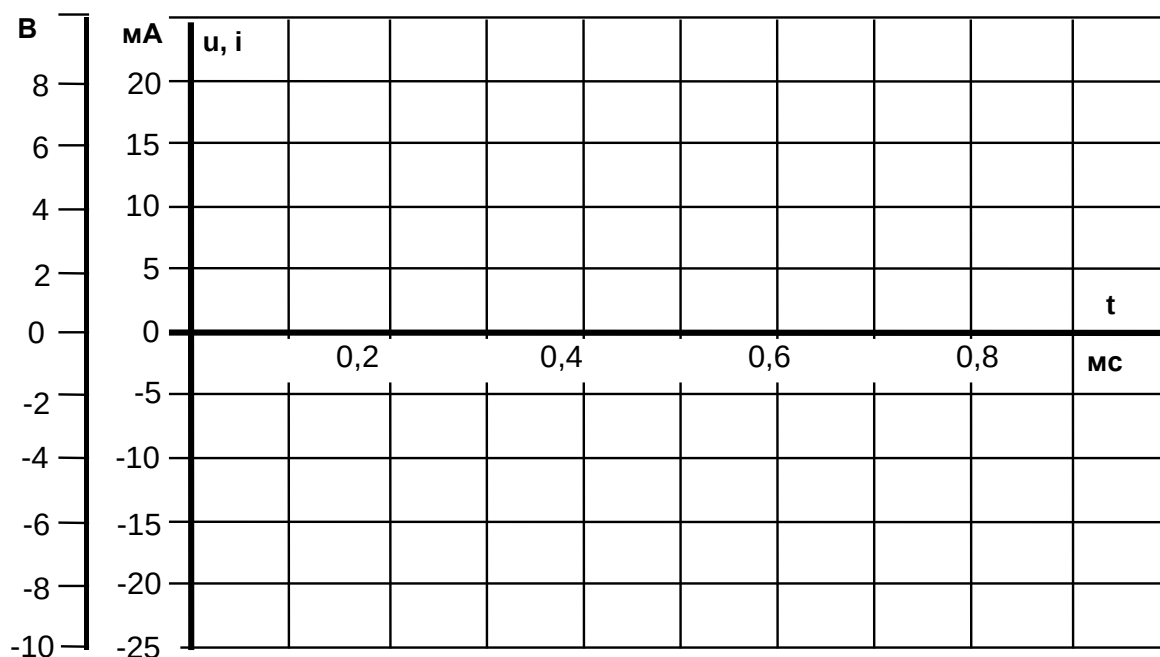


Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.

«Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.

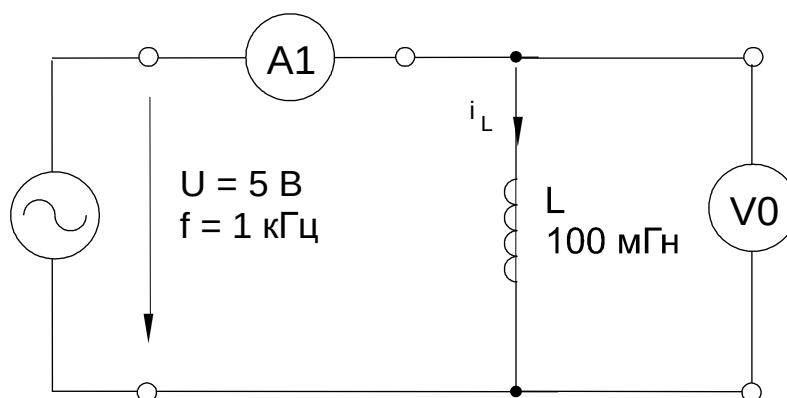
Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.

Перенесите данные осциллографирования напряжения и тока катушки на график, определите фазовый сдвиг между синусоидами напряжения и тока катушки индуктивности.



Включите блок дополнительных приборов, выберите из меню прибор «Угол сдвига фаз» и «подключите» его к V1 и A1. Убедитесь, что вы правильно определили фазовый сдвиг по осциллографу.

Соберите цепь согласно схеме, подсоедините к ее входу регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5\text{ В}$, $f = 1\text{ кГц}$.



Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.

Подключите два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.

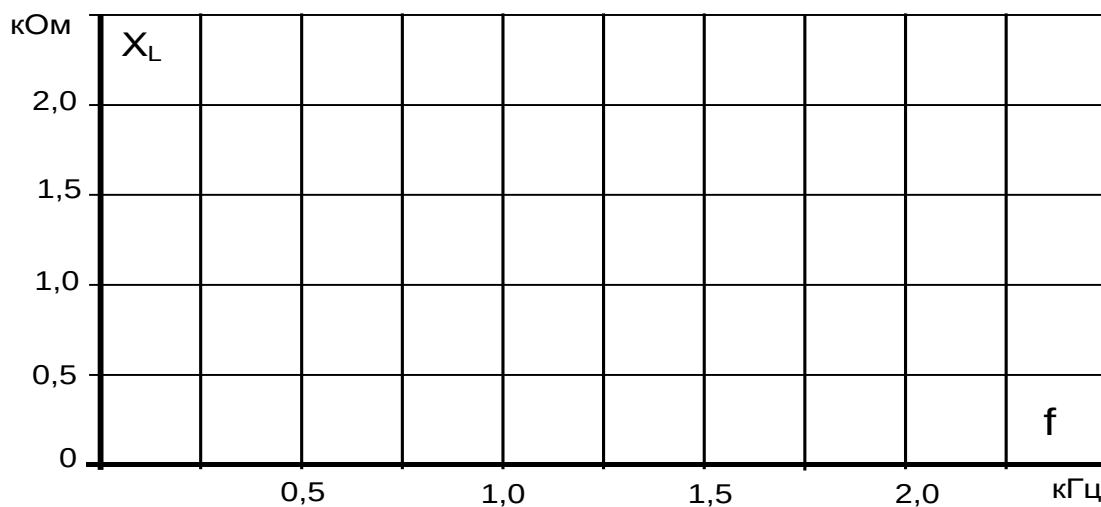
Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.

Снимите с осциллограммы амплитудные значения U_m и I_m для индуктивностей и частот, указанных в табл. и занесите их в соответствующие ячейки таблицы.

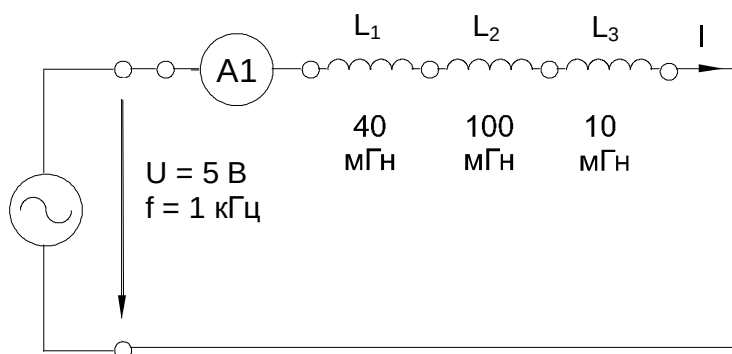
f, кГц		0,5	1	1,5	2
U _{mL} , В	100 мГц				
U _{mL} , В	40 мГц				
U _{mL} , В	10 мГц				
I _{mL} , мА	100 мГц				
I _{mL} , мА	40 мГц				
I _{mL} , мА	10 мГц				
X _L = U _m /I _m , кОм	100 мГц				
	40 мГц				
	10 мГц				
X _L = ωL, Ком	100 мГц				
	40 мГц				
	10 мГц				

Вычислите величины X_L по формулам U_m/I_m и ωL и занесите их в табл.

Перенесите величины X_L на график (рис. 5.2.2) для построения кривой $X_L = f(f)$.



Соберите цепь согласно схеме (рис. 5.3.2) и подключите регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5$ В и $f = 1$ кГц.



Измерьте с помощью мультиметров или виртуальных приборов A1 и V1 действующие значения тока в цепи, приложенного напряжения и напряжения на каждой катушке. Результаты измерений занесите в табл.

I, мА	U, В	U _{L1} , В	U _{L2} , В	U _{L3} , В

Рассчитайте реактивные сопротивления и индуктивности катушек, эквивалентную индуктивность цепи по данным измерений.

Вычисление индуктивных реактансов:

$$X_{L1} = U_{L1} / I_L$$

$$X_{L2} = U_{L2} / I_L$$

$$X_{L3} = U_{L3} / I_L$$

$$X_{\Sigma} = U / I$$

Вычисление угловой частоты:

$$\omega = 2\pi f$$

Вычисление индуктивностей:

$$L_1 = X_{L1} / \omega$$

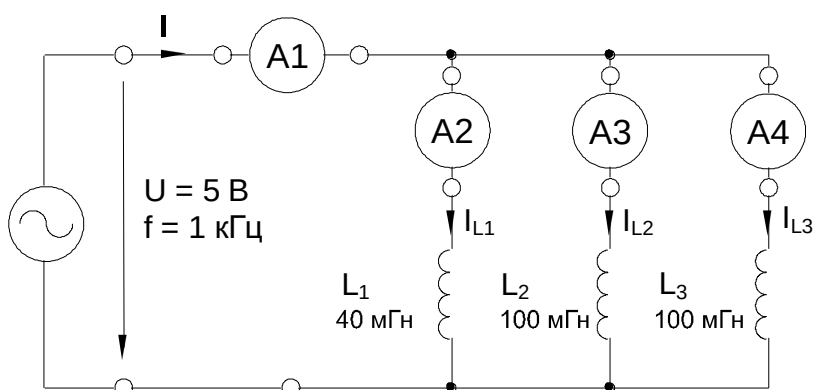
$$L_2 = X_{L2} / \omega$$

$$L_3 = X_{L3} / \omega$$

$$L_{\Sigma} = X_{L\Sigma} / \omega$$

Соберите цепь согласно схеме, подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5 \text{ В}$ и $f = 1 \text{ кГц}$.

Измерьте с помощью мультиметра или виртуальных приборов общий ток цепи I,



Токи параллельных ветвей I_1 , I_2 , I_3 и падения напряжение U на катушках, занесите данные измерений в табл. 5.4.1

U, В	I, мА	I ₁ , мА	I ₂ , мА	I ₃ , мА

Вычислите индуктивные реактансы $X_{LЭ}$, X_{L1} , X_{L2} , X_{L3} по формуле $X_L = U/I_L$.

Определите индуктивности отдельных катушек и общую индуктивность цепи по формуле $L = X_L / \omega$.

Проверьте вычислениями величину индуктивности $L_{Э}$, найденную экспериментально.

Вычисление индуктивных реактансов:

$$X_{L1} = U_{L1} / I_{L1}$$

$$X_{L2} = U_{L2} / I_{L2}$$

$$X_{L3} = U_{L3} / I_{L3}$$

$$X_{LЭ} = U / I$$

Вычисление индуктивностей:

$$L_1 = X_{L1} / \omega$$

$$L_2 = X_{L2} / \omega$$

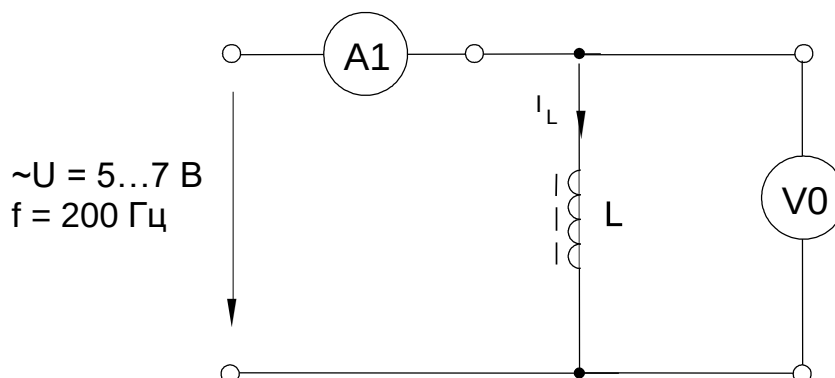
$$L_3 = X_{L3} / \omega$$

$$L_{Э} = X_{LЭ} / \omega$$

Проверка общей индуктивности расчетом:

$$L_{Э} = 1 / (1/L_1 + 1/L_2 + 1/L_3) =$$

Соберите цепь согласно схеме, подключите к ней регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами: $U = 5 \dots 7$ В и $f = 200$ Гц. В качестве индуктивности с малым активным сопротивлением используйте катушку трансформатора 300 витков, вставив между подковами разъемного сердечника полоски бумаги в один слой (немагнитный зазор).



Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.

«Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.

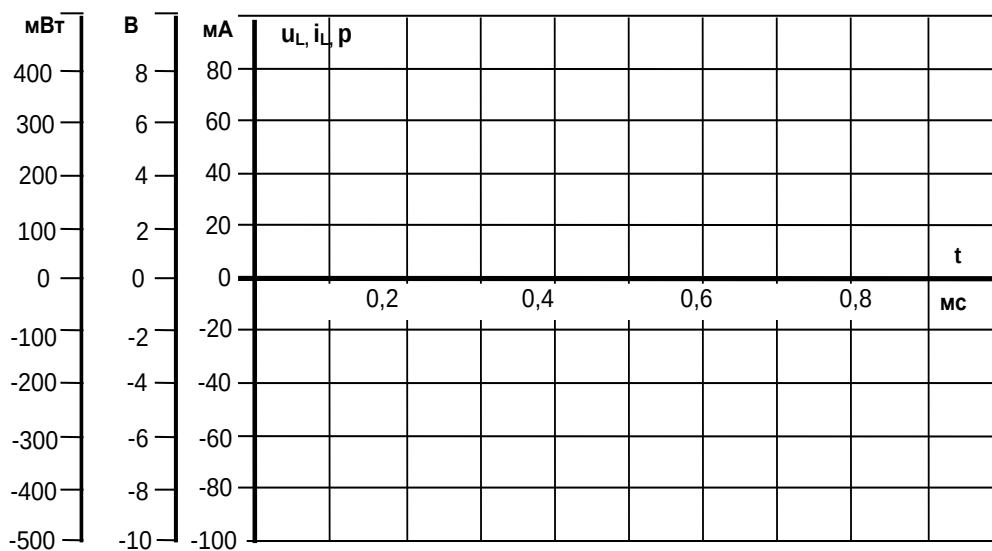
Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.

Включите блок дополнительных приборов, выберите из меню приборы «Активная мощность» и «Реактивная мощность» и подключите их к V1 и A1. Запишите значения реактивной мощности Q_L и активной P . Убедитесь, что $P \ll Q_L$.

Занесите данные осциллографирования напряжения и тока в катушке в табл. 5.5.1 соответственно указанным в ней моментам времени, выполните вычисления мгновенных значений реактивной мощности.

Время t, мс	Ток i_L , мА	Напряжение u_L , В	$p = u_L i_L$, мВт
0			
0,1			
0,2			
0,3			
0,4			
0,5			
0,6			
0,7			
0,8			
0,9			
1,0			

Перенесите данные табл. 5.5.1 на график.



По графику $p(t)$ определите максимальную возвращаемую мощность (реактивную мощность)

$$Q_L = (P_{\text{макс}} - P_{\text{мин}}) / 2$$

Сравните эту мощность с мощностью, измеренной варметром:

$$Q_L = \dots$$

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Как зависит индуктивное сопротивление от частоты?
2. Чем объясняется различие значений X_L , вычисленных по формулам U_m/I_m и ωL ?

Лабораторная работа №4. Электрические однофазного синусоидального тока.
Исследование цепей синусоидального тока с конденсаторами.

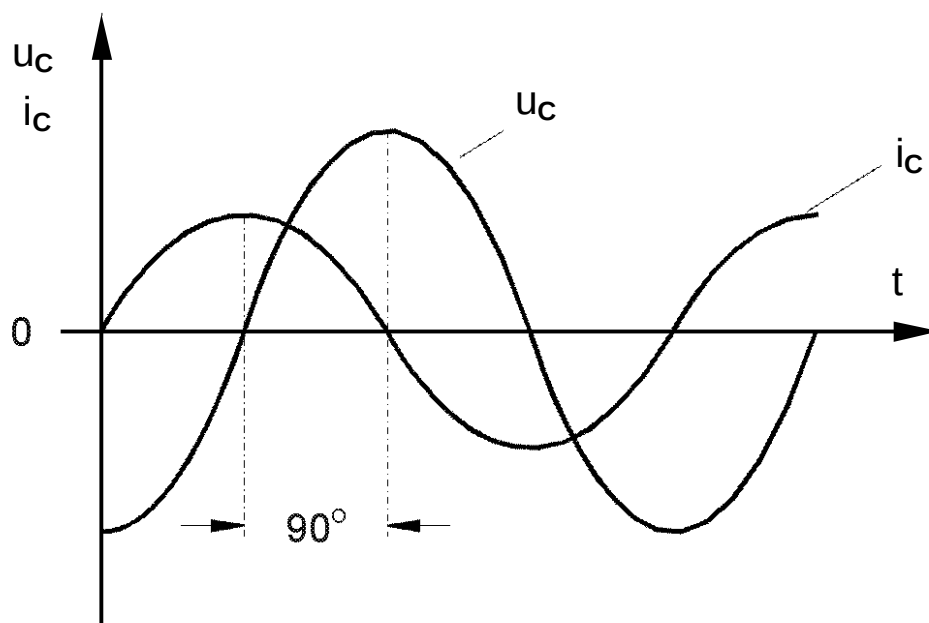
Цель работы: Приобрести практические навыки сборки и анализа цепей переменного синусоидального тока с конденсаторами.

Основы теории:

Когда к конденсатору приложено синусоидальное напряжение, он периодически заряжается и разряжается. Ввиду переменного характера напряжения периодически меняется также полярность заряда конденсатора. Ток в конденсаторе i_C достигает своего амплитудного значения каждый раз, когда напряжение u_C на нем проходит через нуль. Таким образом, синусоида тока i_C опережает синусоиду напряжения u_C на 90° .

Фазовый сдвиг:

$$\varphi = \psi_u - \psi_i = -90^\circ.$$



Конденсатор в цепи синусоидального тока оказывает токоограничивающий эффект, который вызван встречным действием напряжения при изменении знака заряда. Этот токоограничивающий эффект принято выражать как емкостное реактивное сопротивление (емкостной реактанс) X_C .

Величина емкостного реактанса X_C зависит от величины емкости конденсатора, измеряемой в Фарадах, и частоты приложенного напряжения переменного тока. В случае синусоидального напряжения имеем

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

где X_C - реактивное емкостное сопротивление, Ом,

C - емкость конденсатора, Ф,

$\omega = 2\pi f$ - угловая частота синусоидального напряжения (тока).

Когда известны действующие значения тока в конденсаторе и падения напряжения на нем от этого тока, реактивное емкостное сопротивление можно вычислить по закону Ома:

$$X_C = U_{Cm}/I_{Cm} \text{ или } X_C = U_C/I_C.$$

Емкостному реактансу часто присваивают знак «-» в отличие от индуктивного реактанса, которому приписывают знак «+».

Когда несколько конденсаторов соединены последовательно, эквивалентная емкость цепи меньше емкости наименьшего конденсатора. Вычисляется она по формуле:

$$C_{\Sigma} = 1/(1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3 + \dots).$$

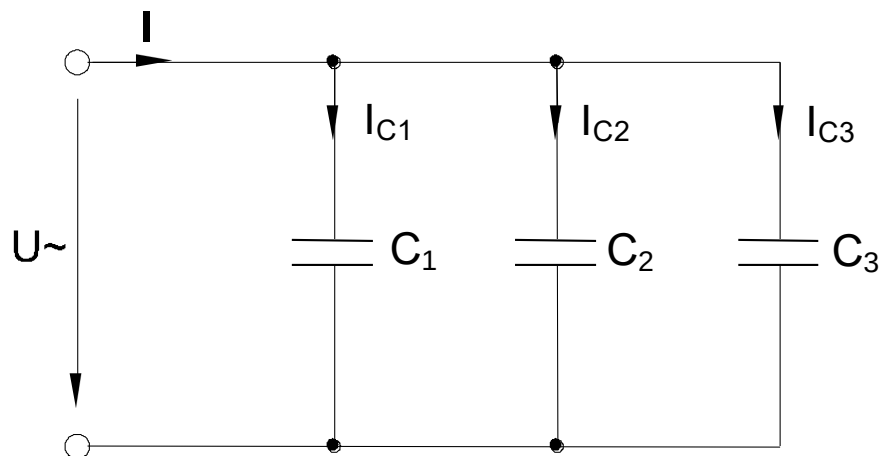
Если последовательно соединено только 2 конденсатора, общая емкость равна

$$C_{\Sigma} = C_1 \cdot C_2 / (C_1 + C_2).$$

Падения напряжения на отдельных конденсаторах обратно пропорциональны соответствующим емкостям, и их сумма равна общему напряжению ΣU_C . Ток в любой точке последовательной цепи с конденсаторами один и тот же.

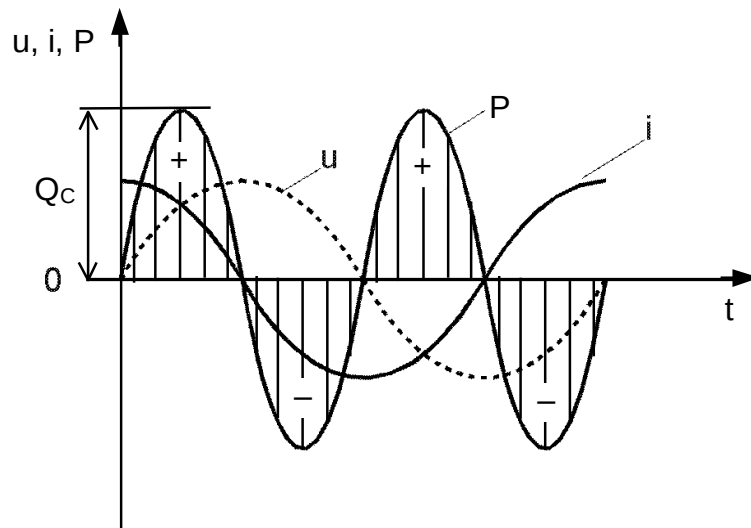
При параллельном соединении конденсаторов эквивалентная емкость цепи равна сумме емкостей отдельных конденсаторов:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$



Токи в параллельных ветвях (конденсаторах) пропорциональны соответствующим емкостям, причем сумма токов ветвей равна общему току цепи I . Напряжения на всех конденсаторах одинаковы и равны U .

Когда конденсатор подключен к переменному синусоидальному напряжению, в нем возникает синусоидальный ток, опережающий напряжение на 90° .



Мгновенная мощность, потребляемая конденсатором (как и любой другой цепью) определяется как произведение напряжения и тока:

$$p = u \cdot i$$

График изменения этой мощности можно построить, перемножая попарно ординаты графиков $u(t)$ и $i(t)$, взятые в один и тот же момент времени. Полученная таким образом кривая представляет собой синусоиду двойной частоты с амплитудой.

$$Q_C = U_{Cm} \cdot I_{Cm} / 2 = U_C \cdot I_C.$$

Когда $p > 0$, конденсатор заряжается, потребляя энергию и запасая ее в электрическом поле. Когда $p < 0$, он отдает ее другим элементам цепи, являясь источником энергии. Величина Q_C является максимальной мощностью, потребляемой или отдаваемой конденсатором, и называется емкостной реактивной мощностью.

Средняя (активная) мощность, потребляемая конденсатором, равна нулю.

Указание по технике безопасности:

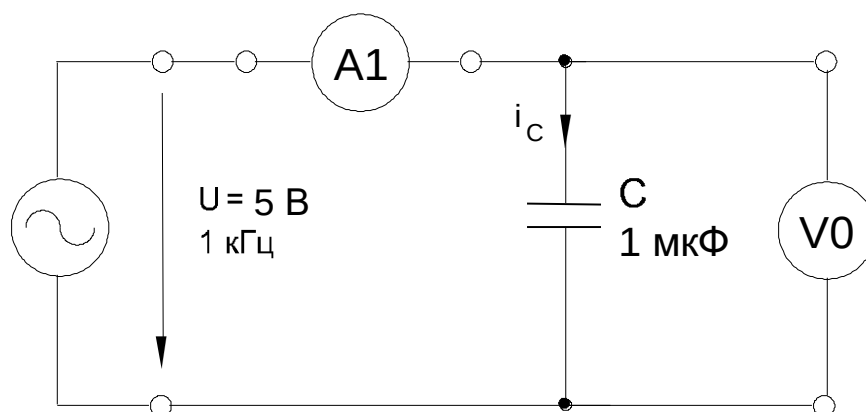
Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите цепь согласно схеме и подключите регулируемый источник синусоидального напряжения при $U = 5 \text{ В}$ и $f = 1 \text{ кГц}$. Напряжение источника установите с помощью мультиметра.

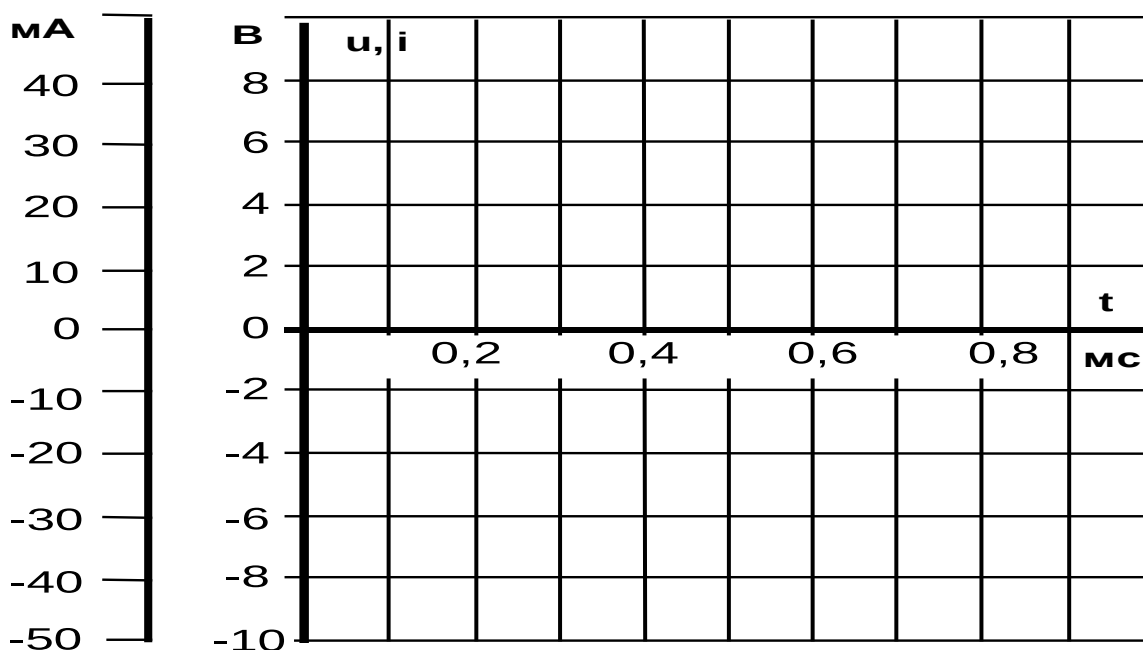
Включите виртуальный приборы V0, A1 и осциллограф.

«Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.



Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.

Перенесите кривые на график и определите период и фазовый сдвиг между напряжением на конденсаторе $u_C(t)$ и током $i_C(t)$.



Из осциллограммы:

период $T =$ мс; фазовый сдвиг $\varphi =$.

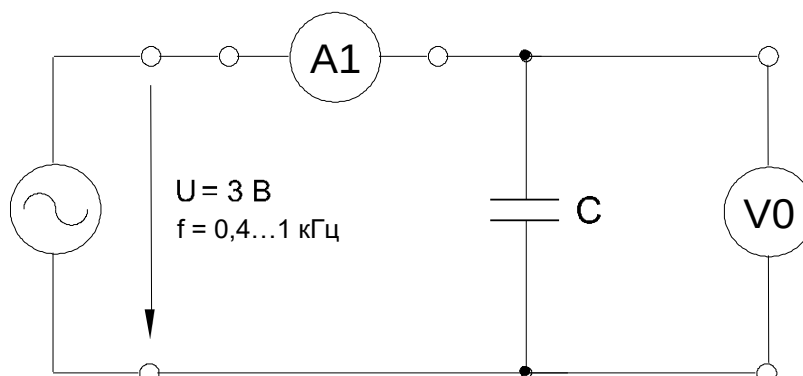
Включите блок «Приборы II», выберите из меню прибор «Угол сдвига фаз» и «подключите» его к V0 и A1. Убедитесь, что вы правильно определили фазовый сдвиг по осциллографу.

Соберите цепь согласно схеме, установите синусоидальное напряжение $U = 5$ В и $f = 1$ кГц на выходе регулируемого источника, затем присоедините источник к входным зажимам цепи.

Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.

«Подключите» два входа осциллографа к приборам V0 и A1, а остальные отключите.

Установите параметры развёртки осциллографа так, чтобы на экране было изображение примерно одного-двух периодов напряжения и тока.



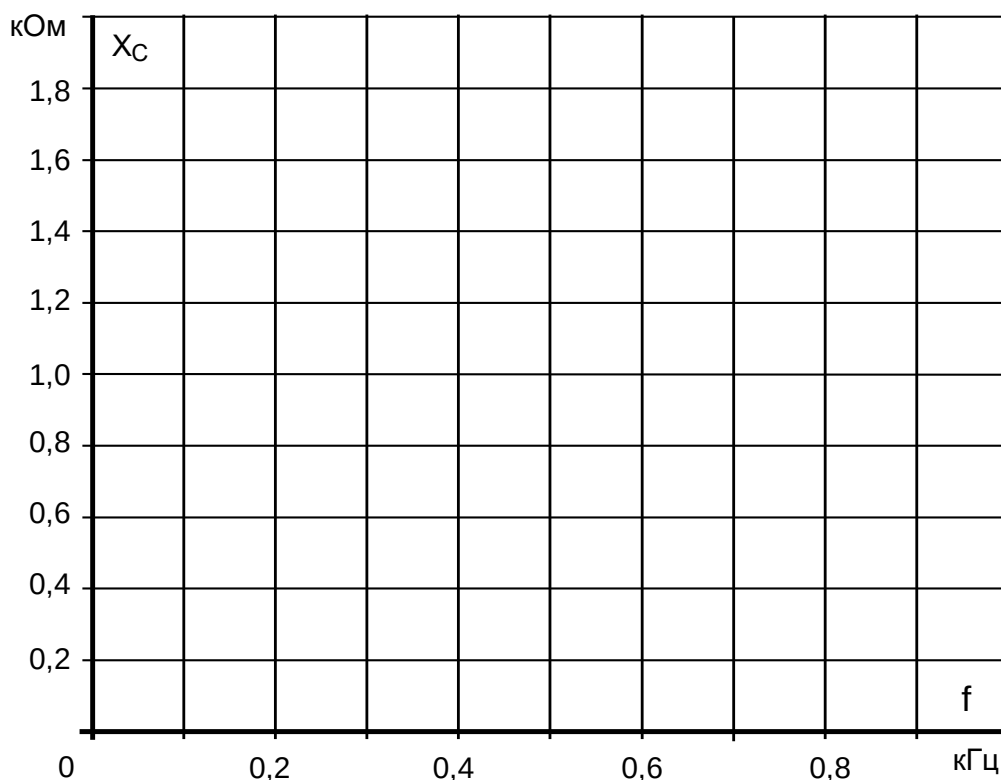
Снимите с осциллограмм или измерьте виртуальными приборами амплитудные значения напряжений U_m и тока I_m для емкостей и частот, указанных в табл, и занесите их в соответствующие ячейки таблицы.

f, кГц		1	0,8	0,6	0,4
U_m , В	1,0 мкФ				
U_m , В	0,47 мкФ				
U_m , В	0,22 мкФ				
I_m , мА	1,0 мкФ				
I_m , мА	0,47 мкФ				
I_m , мА	0,22 мкФ				
$X_C = U_m / I_m$, кОм	1,0 мкФ				
	0,47 мкФ				
	0,22 мкФ				
$X_C = 1 / (\omega C)$, кОм	1,0 мкФ				
	0,47 мкФ				
	0,22 мкФ				

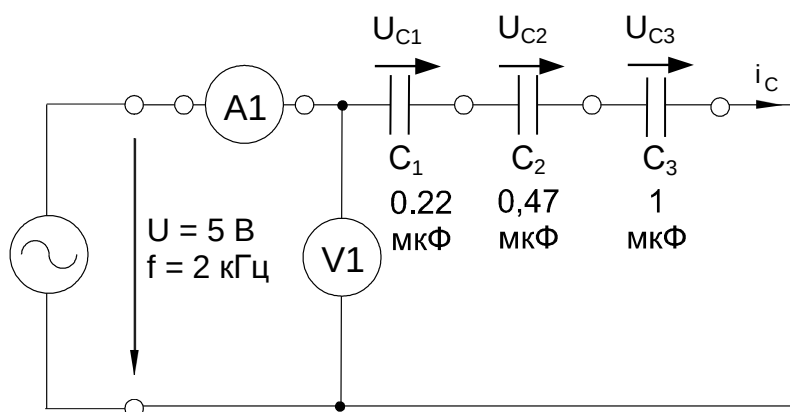
Вычислите величины X_C по формулам U_m / I_m и $1 / (\omega C)$ занесите их в табл. Сравните результаты.

Перенесите величины X_C на график (рис.4.2.2) для построения кривой $X_C = f(f)$.

Проверьте расчетным путем величину реактанса X_C конденсатора емкостью $C = 0,47$ мкФ при частоте $f = 600$ Гц непосредственным измерением виртуальным прибором «Реактивное сопротивление».



Соберите цепь согласно схеме и подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5\text{ В}$ и $f = 2\text{ кГц}$.



Измерьте с помощью мультиметра или виртуальных приборов A1 и V1 действующие значения тока в цепи, приложенного напряжения и напряжения на каждом конденсаторе. Результаты измерений занесите в табл.

$I, \text{ мА}$	$U, \text{ В}$	$U_{C1}, \text{ В}$	$U_{C2}, \text{ В}$	$U_{C3}, \text{ В}$

Рассчитайте емкостные реактансы и емкости.

Проверьте эквивалентную емкость цепи расчетом.

Вычисление емкостных реактансов:

$$X_{C1} = U_{C1} / I_C$$

$$X_{C2} = U_{C2} / I_C$$

$$X_{C3} = U_{C3} / I_C$$

$$X_{\Sigma} = U / I$$

Вычисление угловой частоты:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$$

Вычисление емкостей:

$$C_1 = 1 / (\omega \cdot X_{C1})$$

$$C_2 = 1 / (\omega \cdot X_{C2})$$

$$C_3 = 1 / (\omega \cdot X_{C3})$$

$$C_{\Sigma} = 1 / (\omega \cdot X_{\Sigma})$$

Проверка эквивалентной емкости цепи расчетом:

$$1/C_{\Sigma} = 1/(1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3)$$

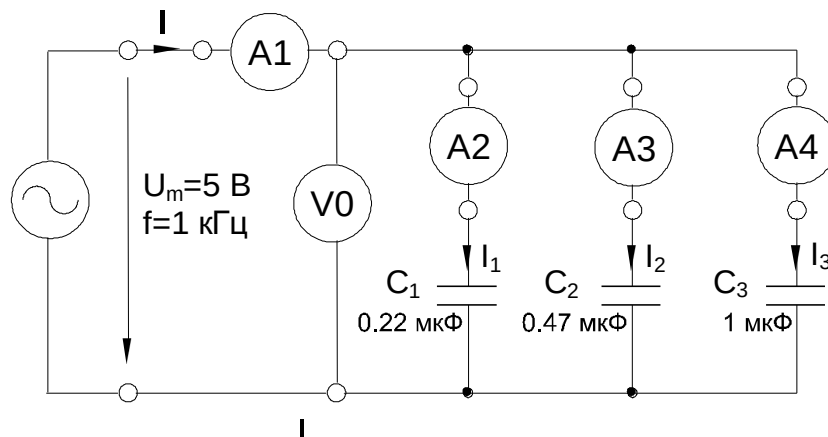
Проверьте эквивалентные реактанс и емкость цепи непосредственными измерениями с помощью виртуальных приборов. Для этого включите блок «Приборы II». В первом приборе выберите функцию «реактивное сопротивление X» и «подключите» его к V1 и A1. Во втором приборе выберите функцию «Частотомер» и «подключите» его к V1. Третий прибор запрограммируйте на вычисление емкости. Для этого введите аргументы расчетной формулы x7 и x8 (т.е. X и f) и саму расчетную формулу:

$$y = -1 / (2 \cdot 3,14 \cdot x8 \cdot x7)$$

Нажмите клавишу «Начать счет» и Вы получите результат вычисления – емкость в фарадах. Переведите ее в микрофарады и запишите результат:

$$C_{\Sigma} = \dots \quad \text{мкФ.}$$

Соберите цепь согласно схеме (рис. 4.4.2), подсоедините регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами $U = 5 \text{ В}$ и $f = 1 \text{ кГц}$. Напряжение и частоту источника установите с помощью мультиметра.



Измерьте мультиметром или виртуальным прибором общий ток цепи I , токи параллельных ветвей I_1 , I_2 , I_3 и напряжения на конденсаторах U , занесите данные измерений в табл.

$U, В$	$I, мА$	$I_1, мА$	$I_2, мА$	$I_3, мА$

Вычислите емкостные реактансы X_{C1} , X_{C2} , X_{C3} по формуле $X_C = U/I_C$.

Определите емкости отдельных конденсаторов и эквивалентную емкость цепи по формуле $C = 1/(\omega \cdot X_C)$

Проверьте вычислениями величину емкости C_{Σ} , найденную экспериментально.

Вычисление емкостных реактансов:

$$X_{C1} = U_{C1} / I_{C1}$$

$$X_{C2} = U_{C2} / I_{C2}$$

$$X_{C3} = U_{C3} / I_{C3}$$

$$X_{\Sigma} = U / I$$

Вычисление емкостей :

$$C_1 = 1/(\omega \cdot X_{C1})$$

$$C_2 = 1/(\omega \cdot X_{C2})$$

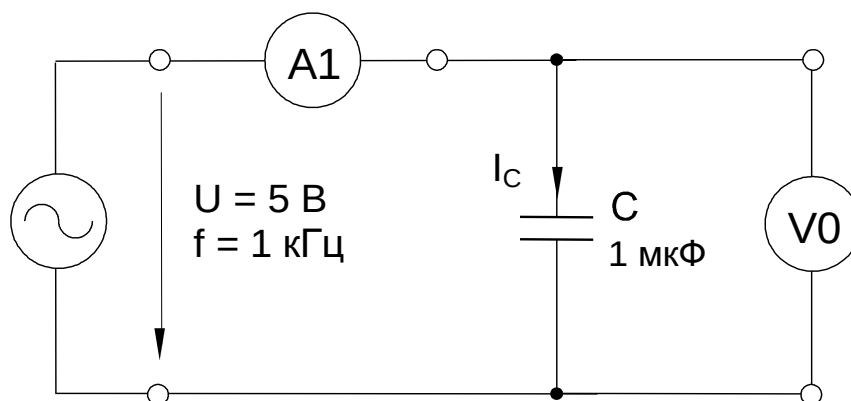
$$C_3 = 1/(\omega \cdot X_{C3})$$

$$C_{\Sigma} = 1/(\omega \cdot \Sigma X_C)$$

Проверка эквивалентной емкости расчетом :

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3$$

Соберите цепь согласно схеме (рис. 4.5.2), подключите к ней регулируемый источник синусоидального напряжения с параметрами: $U = 5 В$ и $f = 1 кГц$.



Включите виртуальные приборы V0, A1 и осциллограф.

По графику $p(t)$ определите максимальное значение (реактивную мощность) и сравните ее с реактивной мощностью, измеренной варметром.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Как зависит емкостное сопротивление от частоты?

Лабораторная работа №5. Электрические однофазного синусоидального тока.
Последовательное соединение активного, индуктивного и емкостного сопротивлений. Резонанс напряжений.

Цель работы: Опытная проверка основных соотношений для последовательной цепи переменного тока, обладающей активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями.

Основы теории:

Пусть в цепь переменного тока с частотой $f = 50 \text{ Гц}$ включена катушка, обладающая индуктивностью L и активным сопротивлением r (рис. 2.1).

При протекании по катушке переменного тока i_L в пространстве, окружающем витки, будет создаваться магнитный поток Φ и потокосцепление с витками катушки:

$$\psi = w \cdot \Phi$$

где w – число витков катушки.

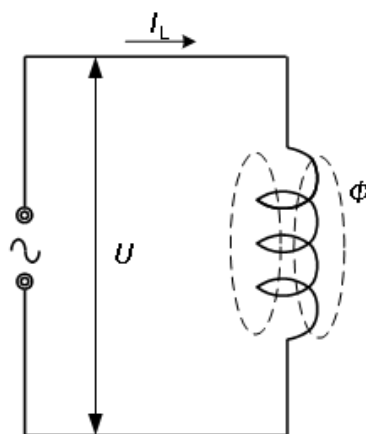


Рисунок 2.1 – Схема с индуктивностью

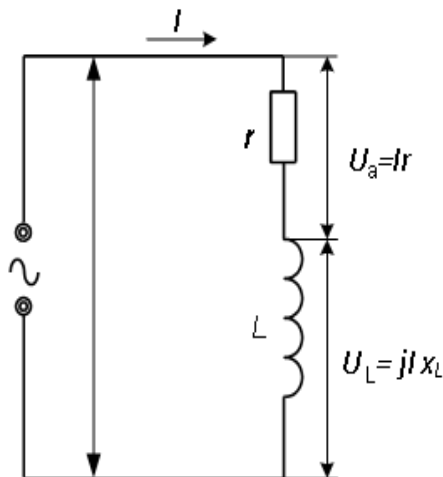


Рисунок 2.2 – Схема последовательного соединения R и L

Отношение потокосцепления катушки к току катушки i_L называется собственной индуктивностью или индуктивностью:

$$L = \frac{\psi}{i_L} = \frac{w \cdot \Phi}{i_L}$$

Если собственное потокосцепление пропорционально току (в случае катушки без стального сердечника), то $L = \text{const}$. Основной единицей измерения индуктивности является Генри (Гн):

$$1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ Вб}}{1 \text{ А}}, \quad 1 \text{ Гн} \cdot 10^{-3} = 1 \text{ мГн}$$

Если ток в катушке изменяется (например, по синусоидальному закону), то и потокосцепление катушки изменяется и поэтому в витках катушки по закону электромагнитной индукции наводится э.д.с. самоиндукции e_L :

$$e_L = - \frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di_L}{dt}$$

т.е. наводимая э.д.с. e_L препятствует изменению тока i_L . Кроме того, катушка обладает некоторым активным сопротивлением r .

Применяя второй закон Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин, можно записать:

$$u + e_L = i \cdot r$$

отсюда напряжение на зажимах цепи равно

$$u = i \cdot r - e_L = u_a + u_L$$

Падение напряжения на активном сопротивлении называют активной составляющей напряжения или активным напряжением, а падение напряжения на индуктивном сопротивлении называют индуктивной составляющей напряжения. Мгновенные значения этих величин обозначают u_a и u , а действующие – соответственно U_a и U_L . При синусоидальном законе изменения тока напряжение на зажимах цепи будет равно:

$$\begin{aligned} u &= ir - e_L = rI_m \sin \omega t + L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = rI_m \sin \omega t + \omega L I_m \cos \omega t = \\ &= U_{am} \sin \omega t + U_{Lm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned}$$

т.е. между активным и индуктивным падениями напряжения имеется сдвиг по фазе на 90° .

Переходя к комплексной форме можно записать:

$$\dot{U} = \dot{U}_a + j\dot{U}_L = \dot{I}r + j\dot{I}x_L$$

где $j\dot{I}x_L = j\omega L\dot{I}$ - комплексное сопротивление индуктивного элемента;

$$\dot{U}_a = \frac{U_{am}}{\sqrt{2}} \text{ и } \dot{U}_L = \frac{U_{Lm}}{\sqrt{2}} - \text{действующие значения активного и индуктивного}$$

напряжений.

Таким образом, напряжение на зажимах цепи $\dot{U}$ можно представить в виде суммы двух синусоид $\dot{U}_a$ и $j\dot{U}_L$. Известно, что всякую синусоидально изменяющуюся величину можно представить в виде вектора (например, тока $\dot{I}$), вращающегося в пространстве с угловой частотой ω , проекция которого на мнимую ось и дает синусоидальную величину (рис. 2.3).

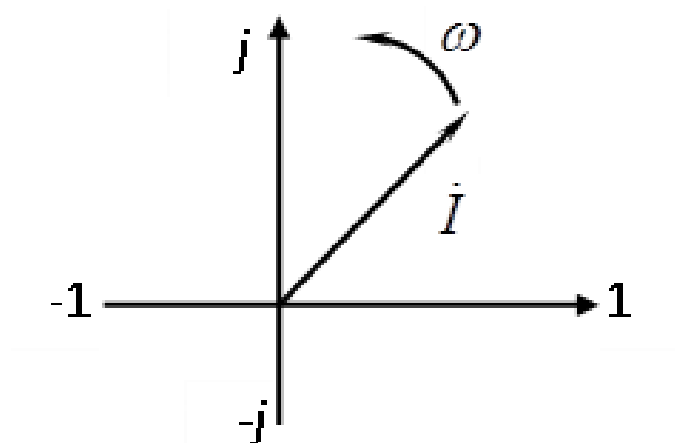


Рисунок 2.3 – Изображение синусоидальной изменяющейся величины тока в виде вектора

Определим напряжения на зажимах цепи при помощи векторной диаграммы. Вектор тока $\dot{I}$ отложим в произвольном направлении, например, горизонтально (рис. 2.4). Все остальные векторы будут жестко привязаны к вектору $\dot{I}$, т.е. их сдвиг по фазе будет строго определенным.

Вектор активного напряжения $\dot{U}_a = \dot{I} \cdot r$ будет совпадать по направлению с вектором $\dot{I}$. Вектор индуктивной составляющей напряжения $\dot{U}_L = j \cdot \dot{I} \cdot x_L$ будет опережать на 90° вектор $\dot{I}$. Складывая геометрически векторы $\dot{U}_a$ и $\dot{U}_L$, получим вектор напряжения $\dot{U}$ на зажимах цепи.

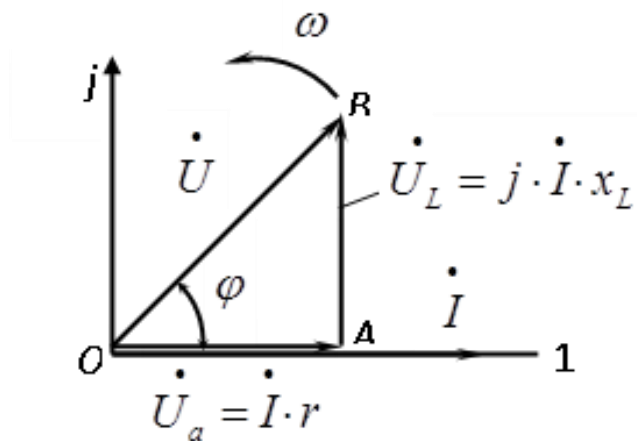


Рисунок 2.4 – Векторная диаграмма при последовательном соединении R и L

Величина $x_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L$ называется *индуктивным сопротивлением* и измеряется в *Ом*. Сопротивление x_L зависит от частоты и при включении катушки индуктивности в цепь постоянного тока ($f = 0$) ток катушки будет ограничен только ее активным сопротивлением и окажется намного больше. Поэтому катушки индуктивности, предназначенные для работы на переменном токе, нельзя включать в цепи постоянного тока.

Треугольник OAB (рис. 4) прямоугольный и называется треугольником напряжений. Из треугольника OAB имеем:

$$\begin{aligned} \dot{U}^2 &= \dot{U}_a^2 + \dot{U}_L^2 \\ \dot{U}^2 &= (\dot{I} \cdot r)^2 + (\dot{I} \cdot x_L)^2 = I^2 (r^2 + x_L^2) \end{aligned}$$

Извлекая из обеих частей корень, получим

$$U = I \cdot \sqrt{r^2 + x_L^2}$$

Величина $\sqrt{r^2 + x_L^2}$, имеющая размерность сопротивления, называется *полным сопротивлением* цепи и обозначается z :

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$$

и закон Ома для цепи переменного тока имеет вид:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{z} \text{ и } \dot{U} = \dot{I}z$$

Косинус угла сдвига фаз φ между током I и напряжением U равен:

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{I \cdot r}{I \cdot z} = \frac{r}{z}$$

Из треугольника мощностей, который можно получить из треугольника напряжений умножением его сторон на ток I , получим активную мощность:

$$P = I^2 r = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Реактивная мощность:

$$Q = I^2 x_L = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Полная мощность:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Отношение активной мощности к полной называется коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}$$

Если цепь переменного тока обладает активным сопротивлением r и емкостью C (рис. 1.5), то по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин можно записать:

$$u = i \cdot r + u_c$$

где u – мгновенное значение приложенного к цепи напряжения;

i – мгновенное значение тока цепи;

u_c – мгновенное значение напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора и представляющего собой падение напряжения на емкости.

Если ток изменяется во времени по синусоидальному закону, т.е. $i = I_m \sin \omega t$, то предыдущее уравнение будет иметь вид:

$$U = r I_m \sin \omega t + \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

Из этой формулы видно, что приложенное к цепи напряжение состоит из двух составляющих: активной или активного напряжения $u_a = r I_m \sin \omega t$ совпадающей по фазе с током, и реактивной или емкостной составляющей $U_c = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$, отстающей от тока на 90° (рис. 1.6). Тогда

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_c$$

Построим векторную диаграмму для данного случая, пользуясь теми же правилами, как и при построении диаграммы для последовательного соединения r и L (см. рис. 2.4).

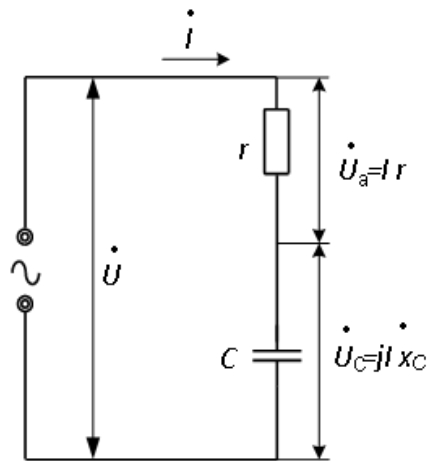


Рисунок 2.5 – Последовательное соединение R и C

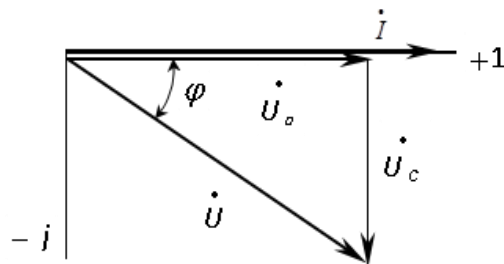


Рисунок 2.6 – Векторная диаграмма для последовательного соединения R и C

При этом необходимо иметь в виду, что вектор напряжения $\dot{U}_C$ отстает от тока $\dot{I}$ на 90° (рис 2.6).

Из треугольника OAB на рисунке 6 имеем:

$$U^2 = U_a^2 + U_C^2$$

или

$$U^2 = (Ir)^2 + \left(\frac{I}{\omega C}\right)^2 = I^2 \left(r^2 + \frac{1}{\omega C}\right)^2.$$

Извлекая квадратный корень из обеих частей, получим:

$$U = I \cdot \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_C^2}}.$$

Величина $x_C = \frac{1}{\omega C}$ называется *емкостным сопротивлением* и измеряется в Ом.

Емкостное сопротивление зависит от частоты напряжения сети и от емкости конденсатора.

Величина $\sqrt{r^2 + x_C^2}$ называется полным сопротивлением и обозначается z . Закон Ома применительно к данной цепи переменного тока будет иметь вид:

$$I = \frac{U}{z},$$

$$\text{где } z = \sqrt{r^2 + x_C^2}.$$

Если все стороны треугольника напряжений ОАВ разделить на ток I , то получим треугольник сопротивлений с катетами r и x_C и гипотенузой z .

При последовательном соединении r , L и C будут справедливы все выводы, полученные для цепи с r - L и цепи с r - C . При этом возможны следующие комбинации:

$$\text{а) } x_L > x_C ; \text{ б) } x_L < x_C ; \text{ в) } x_L = x_C .$$

Рассмотрим с помощью векторных диаграмм каждый из этих вариантов.

а) Имеем цепь из последовательно соединенных r , L и C , причем

$x_L > x_C$. По всем трем сопротивлениям будет протекать один и тот же ток $\dot{I}$, вектор которого отложим в выбранном масштабе произвольно, например, горизонтально, т.е. направление первого вектора выбирается произвольно (рис. 2.7).

Вектор падения напряжения на активном сопротивлении будет совпадать с направлением тока, а падение напряжения на индуктивном элементе или $\dot{U}_L$ будет опережать вектор $\dot{I}$ на $\pi/2$. Падение напряжения на емкостном элементе $\dot{U}_C$ будет отставать от вектора тока на $\pi/2$ и согласно условию

$$\dot{U}_C < \dot{U}_L.$$

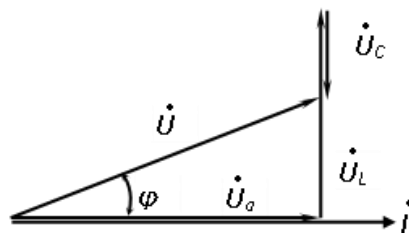


Рисунок 2.7 – Векторная диаграмма напряжений при $x_L > x_C$

Общее напряжение цепи будет равно сумме

$$\dot{U}_a + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{U}.$$

Из векторной диаграммы видно, что между током цепи $\dot{I}$ и напряжением $\dot{U}$ есть угол φ и ток имеет отстающий характер, а $\cos \varphi < 1,0$.

б) При $x_L < x_C$ падение напряжения на индуктивном сопротивлении будет меньше падения напряжения на емкостном сопротивлении, поэтому векторная диаграмма будет иметь вид (рис. 2.8):

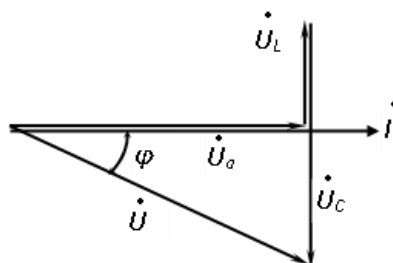


Рисунок 2.8 – Векторная диаграмма напряжений при $\dot{U}_C > \dot{U}_L$

в) При $x_L = x_C$ имеет место *резонанс напряжений*, т.е. $\dot{U}_C = \dot{U}_L$ и это будет при $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. При этом векторы $\dot{U}_L$ и $\dot{U}_C$ равны по модулю и противоположно направлены (рис. 2.9), поэтому их сумма равна нулю. Ток цепи при резонансе напряжений определяется только активным сопротивлением, поэтому угол сдвига фаз между током и напряжением цепи равен нулю, а $\cos \varphi = 1$. При этом надо иметь в виду, что результирующее сопротивление цепи резко уменьшится до значения $z = r$ и ток цепи при резонансе может резко возрастать.

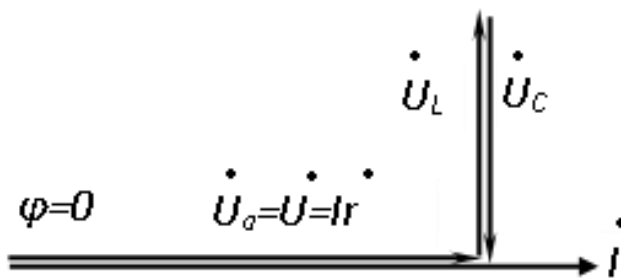


Рисунок 2.9 – Векторная диаграмма напряжений при резонансе

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Собрать схему с последовательным соединением R , L и C (рис. 2.10). В качестве активного сопротивления используется регулировочный реостат R , а в качестве емкости C – батарея конденсаторов.

Вольтметром V_1 измеряют входное (общее) напряжение цепи, а вольтметром V_2 с помощью щупов поочередно измеряют падение напряжения на активном сопротивлении R (в точках а и б), на индуктивности L (в точках в и г) и емкости C (в точках г и д).

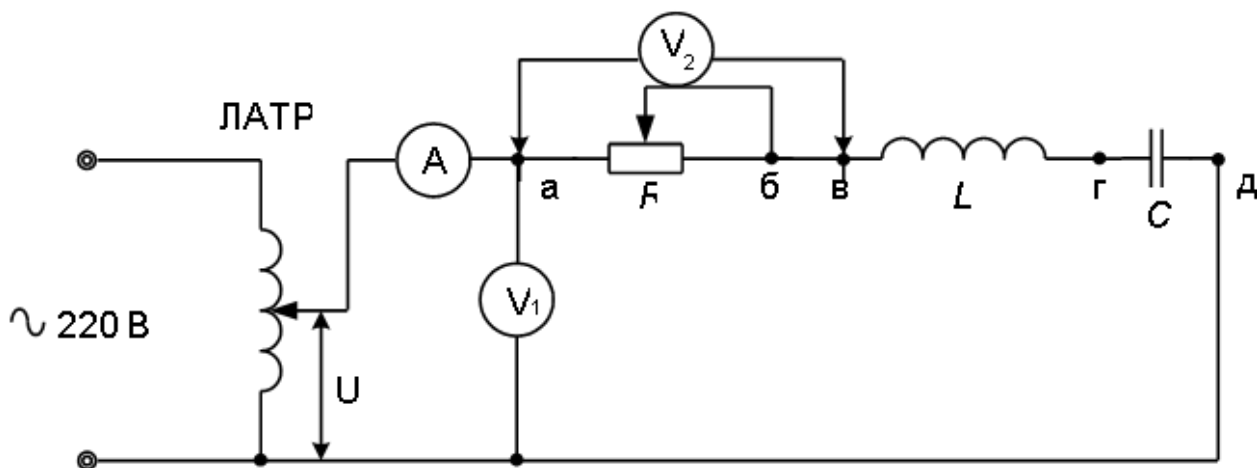


Рисунок 2.10 – Схема с последовательным соединением R , L и C

Измерения необходимо выполнять для трех режимов:

- 1) $U_L > U_C$; 2) $U_L < U_C$; 3) $U_L = U_C$.

Для каждого из режимов выполнить расчеты и вместе с результатами измерений занести в таблицу 2.1. По результатам расчетов для каждого из режимов построить векторную диаграмму напряжений, для чего необходимо выбрать масштаб напряжения m_U таким образом, чтобы вектор напряжения цепи U был примерно равен 8 – 12 см.

Таблица 2.1 – Результаты измерений и вычислений

№ опыта	Измеренные величины					Вычисленные величины			
	U	I	U_R	U_L	U_C	$\cos \varphi$	S	P	Q
	B	A	B	B	B	-	BA	Bm	BAp
1									
2									
3									

Внимание! При резонансе напряжений ток цепи определяется активным сопротивлением R , поэтому амперметр может зашкаливать. В этом случае необходимо подобрать амперметр с несколькими пределами измерений и при резонансе переключить его на больший предел по току.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Что понимают под индуктивностью и как она определяется?
2. Как и почему изменяется индуктивность при введении в катушку стального сердечника?
3. Что понимают под емкостью и как она определяется?
4. Что называют угловой частотой ω ?
5. По каким формулам определяют r ; x_L ; x_C и z цепи переменного тока?
6. Каковы основные соотношения и векторные диаграммы в цепях с активной, индуктивной и емкостной нагрузкой?
7. При каких условиях возникает резонанс напряжений?
8. Чему равен коэффициент мощности $\cos \varphi$ при различных условиях и как он определяется?

Лабораторная работа №6. Электрические однофазного синусоидального тока.
Электрическая цепь синусоидального тока при параллельном включении активного и реактивных сопротивлений.

Цель работы: Экспериментальная проверка зависимости активного и реактивных сопротивлений от частоты, а также соотношений между напряжением, сопротивлениями, проводимостями и токами в цепи с параллельно включенными активным сопротивлением, катушкой индуктивности и конденсатором.

Основы теории:

При параллельном включении активного сопротивления, катушки индуктивности и конденсатора (рис. 3.1) на все три элемента электрической цепи подаётся одно и то же напряжение u . Мгновенное значение тока i в не-разветвлённой части цепи равно сумме мгновенных значений токов резистора i_r , катушки i_k и конденсатора i_c :

$$i = i_r + i_k + i_c$$

Соответствующее равенство справедливо для комплексов токов:

$$\dot{I} = \dot{I}_r + \dot{I}_k + \dot{I}_c$$

Комплексы токов определяются комплексом напряжения $\dot{U}$ и комплексными сопротивлениями соответствующих элементов цепи:

$$\dot{I}_r = \dot{U}/r, \dot{I}_k = \dot{U}/Z_k, \dot{I}_c = \dot{U}/Z_c$$

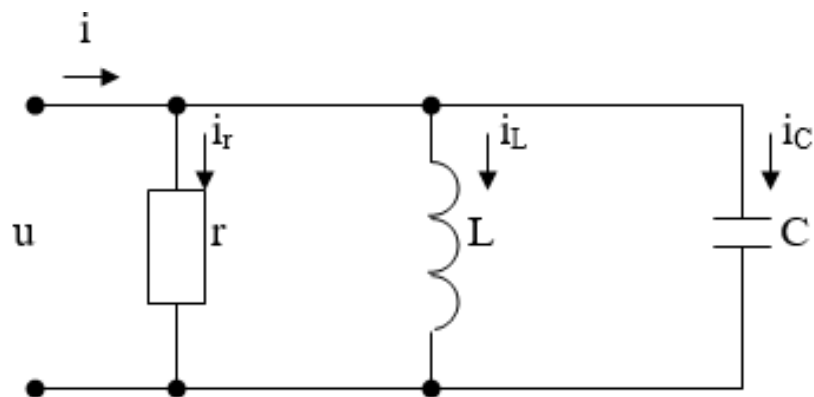


Рисунок 3.1 – Параллельное включение активного сопротивления, катушки индуктивности и конденсатора

Комплексное сопротивление резистора равно его активному сопротивлению r , комплексное сопротивление катушки индуктивности учитывает её активное сопротивление r_k и индуктивность L : $Z_k = r_k + j\omega L = r_k + jx_L$.

При расчёте цепей с параллельно включёнными элементами удобнее пользоваться не сопротивлениями, а проводимостями:

$$Y_r = 1/r = g_r,$$

$$Y_k = 1/Z_k = 1/(r_k + j\omega L) = r/(r^2 + x_L^2) - jx_L/(r^2 + x_L^2) = g_k - jb_k$$

Комплексная проводимость конденсатора с учётом проводимости изоляции между обкладками g_c :

$$Y_c = g_c + j\omega C = g_c + jb_c$$

$$\dot{I} = \dot{U}[(g_r + g_k + g_c) + j(b_c - b_k)] = \dot{U}Y$$

Ток, протекающий через катушку индуктивности, можно представить в виде двух составляющих: активной $\dot{I}_{ak} = \dot{U}g_k$, по фазе, совпадающей с напряжением, и реактивной $\dot{I}_L = -j\dot{U}b_L$, отстающей по фазе от напряжения на 90° .

Ток, протекающий через конденсатор, также можно представить в виде суммы активной $\dot{I}_{ac} = \dot{U}g_c$ и реактивной $\dot{I}_{pc} = j\dot{U}b_c$ составляющих; реактивная составляющая опережает по фазе напряжение на 90° . Схема замещения при замене сопротивлений проводимостями имеет вид, изображённый на рис.3.2.

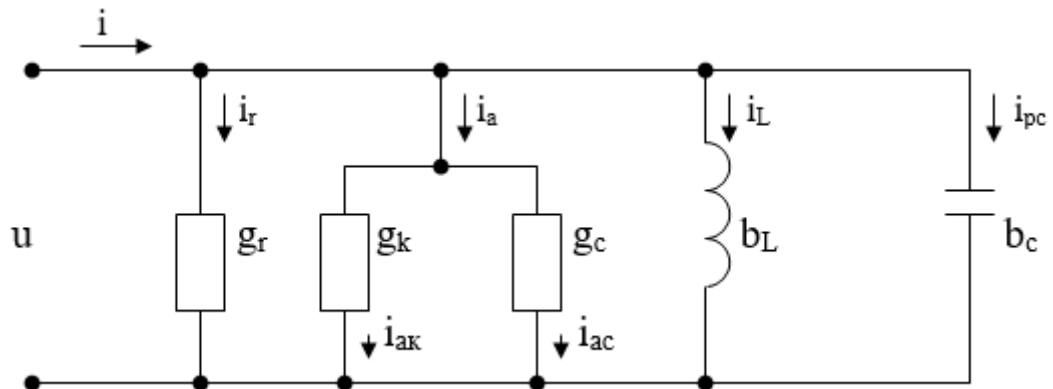


Рисунок 3.2 – Схема замещения

Вид векторных диаграмм напряжения и токов рассматриваемой схемы зависит от соотношения проводимостей b_k и b_c (рис.3.3).

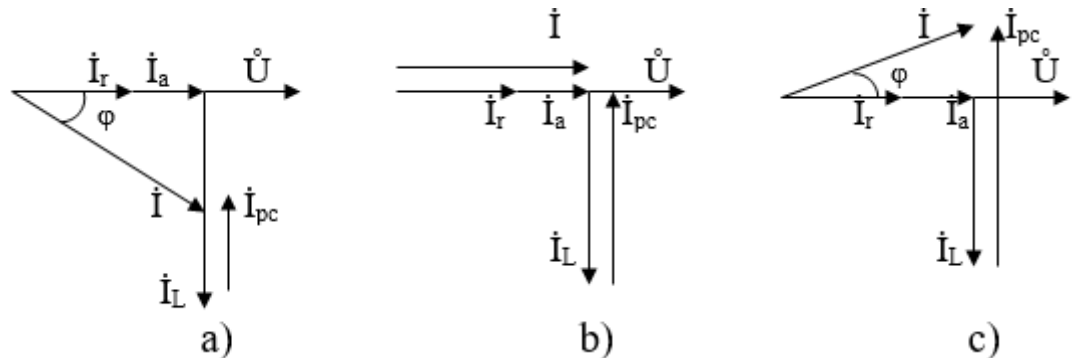


Рисунок 3.3 – Векторная диаграмма

Если $b_L > b_C$, то ток через индуктивность больше, чем через ёмкость, и ток в неразветвленной части цепи по фазе отстаёт от напряжения (рис 4.3а). Если $b_L < b_C$, то ток через индуктивность меньше, чем ток через ёмкость, а ток в неразветвленной части цепи по фазе опережает напряжение (рис.3.3с).

При равенстве индуктивной и ёмкостной проводимостей величина тока в неразветвленной части цепи определяется только суммой активных проводимостей $g_r + g_k + g_c = g$, при этом ток по фазе совпадает с напряжением (рис.4.3б):

$$\dot{I} = \dot{U}g.$$

Векторная диаграмма, изображённая на рис.4.3б соответствует режиму резонанса токов, в этом режиме токи через индуктивность и через ёмкость равны по величине и противоположны по фазе, в неразветвлённой части цепи ток принимает минимальное значение.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Детально ознакомившись с основными теоретическими положениями, собрать схему, изображённую на рис.3.4.

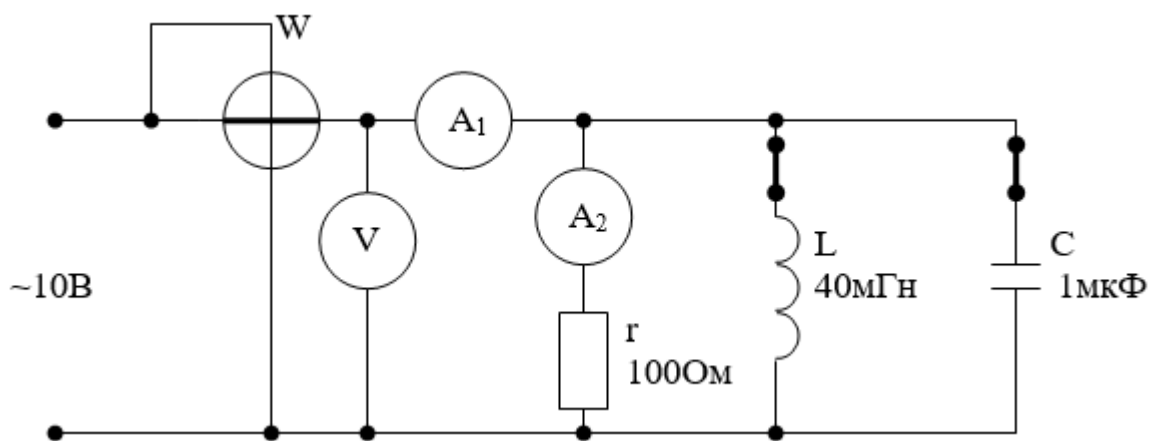


Рисунок 3.4 – Схема с параллельным соединением R, L и C

Установить пределы измерений: вольтметра – 20В, амперметров – 200мА.

Подать напряжение питания и установить частоту f_0 , при которой в неразветвлённой части цепи ток примет минимальное значение. Значение частоты f_0 занести в таблицу 3.1.

2. Убрать перемычки в цепи катушки и конденсатора, по показаниям амперметра и вольтметра или амперметра и ваттметра проверить сопротивление и вычислить проводимость резистора.

$$r=U/I=P/I^2, g_r=1/r=I/U=P/U^2.$$

3. Разорвать цепь резистора и установить перемычку в цепи катушки, по показаниям приборов вычислить сопротивления и проводимости катушки.

$$r=P/I^2, z_k=U/I, x_L=\sqrt{z_k^2-r^2},$$

$$g_k=P/U^2, y_k=I/U, b_L=\sqrt{y_k^2-g_k^2}.$$

4. Разорвать цепь катушки и установить перемычку в цепи конденсатора, используя формулы, аналогичные формулам п.3, по показаниям приборов вычислить сопротивления и проводимости конденсатора. Вычисленные значения сопротивлений и проводимостей занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1

f ₀ , Гц	Резистор		Катушка					Конденсатор					g, См
	г,	g _r ,	r _k ,	g _k ,	x _L ,	b _L ,	L,	r _c ,	g _c ,	x _c ,	b _c ,	C,	
	Ом	См	Ом	См	Ом	См	Гн	Ом	См	Ом	См	мкФ	

5. Установить все перемычки, подключить амперметр А2, при частоте f₀ измерить потребляемую мощность, напряжение, ток в неразветвленной части цепи и токи отдельных ветвей. Результаты замеров занести в таблицу 3.2.

6. Вычислить значения активных и реактивных составляющих токов через катушку и через конденсатор и коэффициент мощности, пользуясь выражениями:

$$I_{ak}=g_k U, I_{ac}=g_c U, I_a=I_{ak}+I_{ac}, I_L=\sqrt{I_k^2-I_{ak}^2}, I_{pc}=\sqrt{I_c^2-I_{ac}^2},$$

$$\cos\varphi=(I_r+I_{ak}+I_{ac})/I.$$

Результаты вычислений занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2

f, Гц	U, В	I, мА	I _r , мА	I _k , мА	I _c , мА	P, мВт	y, См	b, См	I _a , мА	I _L , мА	I _{pc} , мА	cosφ
f ₁ =												
f ₀ =												
f ₂ =												

7. При частотах f₁=f₀-200 Гц и f₂=f₀+200 Гц произвести те же измерения и вычисления, что и при частоте f₀, результаты измерений и вычислений занести в таблицу 4.2.

При выполнении расчётов не следует забывать, что сопротивления и проводимости индуктивности и ёмкости зависят от частоты.

8. По результатам измерений и вычислений построить векторные диаграммы, аналогичные представленным на рис.2.3.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Как определить активную и реактивную проводимости катушки, если известны её активное и индуктивное сопротивления?
2. Как зависят реактивные проводимости катушки индуктивности и конденсатора от частоты?
3. Как определить активную проводимость катушки индуктивности или конденсатора, пользуясь показаниями ваттметра, амперметра и вольтметра?
4. Как определить полную проводимость участка электрической цепи по показаниям электроизмерительных приборов?
5. Как отличаются по фазе приложенное напряжение и ток, протекающий по катушке индуктивности? через конденсатор?
6. Почему и как изменится ток через конденсатор (через катушку индуктивности) при увеличении частоты приложенного напряжения?
7. В какой электрической цепи может возникнуть режим резонанса токов? Каково условие его возникновения? Поясните физическую сущность режима резонанса токов.

Лабораторная работа №7. Трёхфазные цепи. Исследование трёхфазной системы при соединении потребителей звездой.

Цель работы: Ознакомиться опытным путем с особенностями соединения звездой приемников электрической энергии в цепи трехфазного тока. Исследовать режимы равномерной и неравномерной нагрузок, а также работу системы при обрыве одной из фаз. Получить практические навыки расчета и испытания трехфазных цепей, а также построения векторных диаграмм.

Основы теории:

Трёхфазной системой электрических цепей называется система, состоящая из трех однофазных электрических цепей, в каждой из которых действуют синусоидальные э.д.с. одинаковой частоты, но сдвинутые друг относительно друга на $1/3$ периода (120°) и создаваемые общим (трехфазным) источником электрической энергии.

Отдельные электрические цепи, входящие в состав трехфазной системы, называют *фазами*. Если э.д.с. каждой из фаз равны по величине, а полные сопротивления нагрузок всех трех фаз по величине и характеру нагрузки (по величине и знаку фазового сдвига) одинаковы, то такой режим называют *симметричным*. Невыполнение данных условий является причиной *несимметричного* режима. Нагрузка трехфазных цепей редко бывает симметричной, как правило, она в той или иной степени несимметрична из-за наличия однофазных потребителей.

Трёхфазные генераторы создают симметричную систему э.д.с., поэтому несимметричный режим возникает из-за несимметричной нагрузки фаз. Если концы обмоток фаз синхронного генератора или трансформатора соединить вместе звездой, а к началам присоединить провода, идущие к приемникам электрической энергии, которые тоже соединить звездой, то получим трехфазную систему (рис. 1). Провод, соединяющий нулевые точки источника и потребителя называется нулевым. Такую систему называют *четырёхпроводной*. В цепях трехфазного тока независимо от способа соединения обмоток генератора и потребителей различают напряжения – линейные U_L и фазные U_ϕ , а также токи – линейные I_L и фазные I_ϕ . Напряжение между линейным и нулевым проводом называется *фазным*, а между линейными проводами – *линейным*. Токи, протекающие в линейных проводах, называют *линейными*, а протекающие в фазах нагрузки или источника – *фазными*. В схеме (рис. 4.1) линейные токи равны фазным, т.е. линейный ток одновременно является и фазным. При равномерной нагрузке $U_L = \sqrt{3}U_\phi$, если схема соединения - звезда.

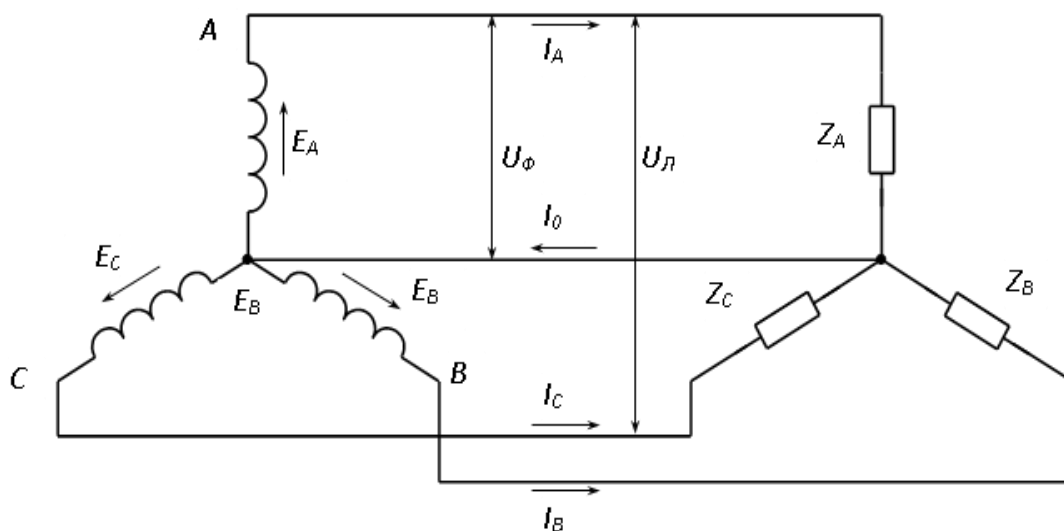


Рисунок 4.1 – Схема трехфазной четырехпроводной цепи при соединении звездой
При неравномерной нагрузке фаз в схеме с нулевым проводом (рис. 4.1), в нулевом проводе появляется ток, величина которого определяется по первому закону Кирхгофа:

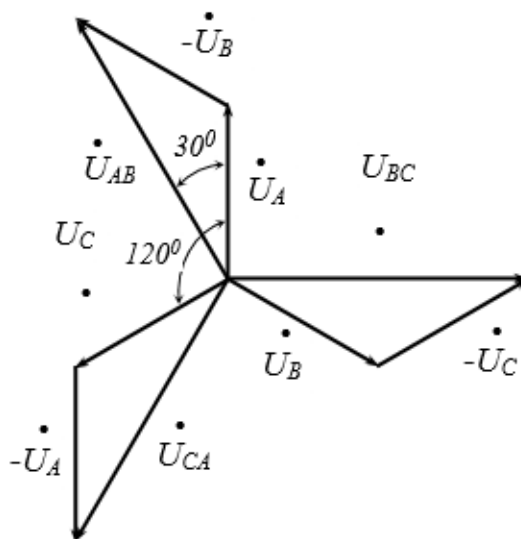


Рисунок 4.2 – Векторная диаграмма напряжений при соединении звездой

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

Наличие тока в нулевом проводе вызывает незначительное падение напряжения в нем, которым можно пренебречь и считать, что между нулевой точкой источника и приемника разность потенциалов отсутствует.

На рис. 4.2 показано графическое определение линейных напряжений с помощью векторной диаграммы. Отложим для произвольного момента времени комплексы фазных напряжений, сдвинутые по фазе на 120° .

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B ,$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C ,$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A ,$$

Для получения линейных напряжений Сложим геометрически векторы $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ с векторами $-\dot{U}_B$, $-\dot{U}_C$, $-\dot{U}_A$, которые равны соответственно $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$, $\dot{U}_A$, но противоположно направлены.

Векторная диаграмма линейных напряжений также может быть получена из векторной диаграммы фазных напряжений (рис. 3). Таким образом, звезда линейных напряжений опережает звезду фазных на 30° . Найдем соотношение между фазными и линейными напряжениями, учитывая, что все напряжения симметричны:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C = \dot{U}_\Phi$$

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{CA} = \dot{U}_\text{Л} .$$

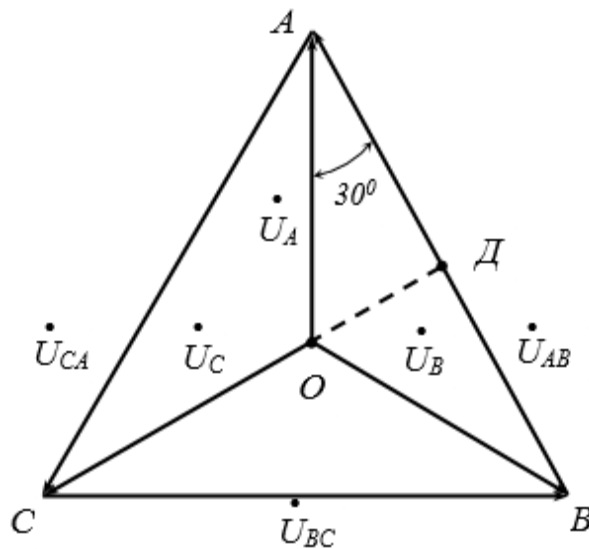


Рисунок 4.3 – Векторная диаграмма напряжений при соединении звездой

Из прямоугольного треугольника OAD имеем:

$$\frac{U_\text{Л}}{2} = \frac{U_{AB}}{2} = U_A \cdot \cos 30^\circ =$$

$$= U_\Phi \cdot \cos 30^\circ = U_\Phi \frac{\sqrt{3}}{2} ,$$

$$U_\text{Л} = \sqrt{3} U_\Phi$$

Фазные токи приемников определяются так же, как и в однофазных цепях:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{z_A} = \frac{\dot{U}_A}{\sqrt{r_A^2 + x_A^2}};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{z_B} = \frac{\dot{U}_B}{\sqrt{r_B^2 + x_B^2}};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{z_C} = \frac{\dot{U}_C}{\sqrt{r_C^2 + x_C^2}},$$

Углы сдвига между напряжениями и токами фаз можно определить из формул:

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{z_A}; \quad \cos \varphi_B = \frac{r_B}{z_B}; \quad \cos \varphi_C = \frac{r_C}{z_C}.$$

Если приемники обладают чисто активными сопротивлениями, то $z_A = r_A$, $z_B = r_B$, $z_C = r_C$, а углы сдвига между токами и напряжениями во всех трех фазах будут нулевыми. На рис. 4 представлена топографическая диаграмма напряжений и токов при активной несимметричной нагрузке.

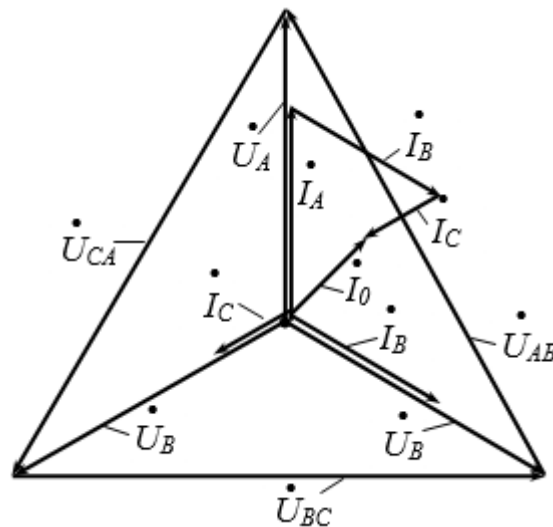


Рисунок 4.4 – Векторная диаграмма напряжений и токов четырехпроводной цепи при активной несимметричной нагрузке фаз

Ток нулевого провода $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$

Сечение нулевого провода зависит от степени несимметрии нагрузки фаз, но обычно его принимают равным 50% от сечения линейного провода.

При наличии нейтрали (нулевого провода) напряжения на фазах приемников остаются неизменными и равными фазным напряжениям источника даже при неравномерной

нагрузке, если пренебречь сопротивлением проводов линии и нулевого провода. Предельным случаем неравномерной нагрузки фаз в четырехпроводной системе трехфазного приемника, включенного звездой, можно считать обрыв одной из фаз. Например, если фаза *A* будет оборвана, то не будет напряжения и тока у потребителя, включенного в эту фазу, а в оставшихся под напряжением фазах режим работы не изменится. Что касается нулевого провода, то если до обрыва одной из фаз ток был равен $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ (рис. 4.4), то теперь он изменится и будет определяться по первому закону Кирхгофа: $\dot{I}_0 + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, откуда $-\dot{I}_0 = \dot{I}_B + \dot{I}_C$ (рис. 4.5)

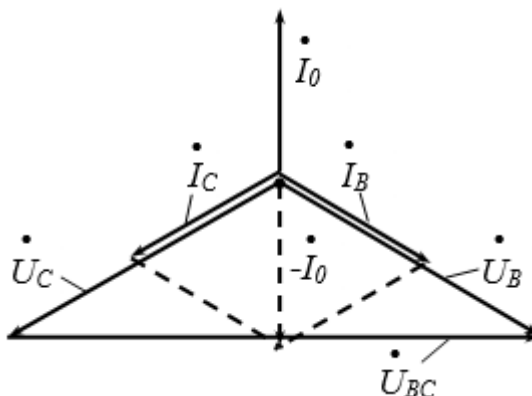


Рисунок 4.5 – Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве фазы *A*

При обрыве или отсутствии в схеме нулевого провода энергетические соотношения в этой цепи изменятся.

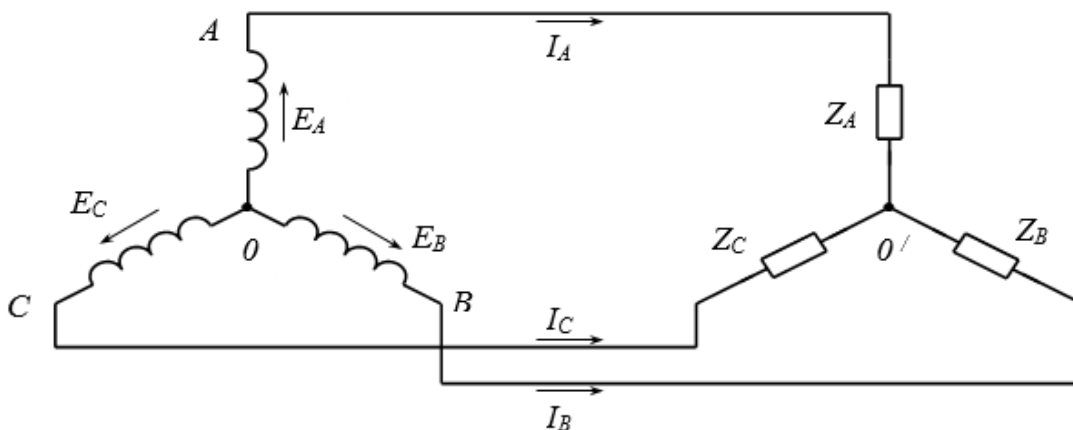


Рисунок 4.6 – Схема трехпроводной цепи трехфазного тока

При симметричной нагрузке в трехпроводной трехфазной системе (рис. 4.6) напряжение между нулевыми точками источника и приемника равно нулю и каждую фазу системы можно рассматривать как замкнутый контур.

При неравномерной нагрузке и отсутствии нулевого провода фазные напряжения будут изменяться прямо пропорционально сопротивлениям фаз. Если бы система была четырехпроводной, то по нулевому проводу протекал бы ток I_0 и таким образом практически выравнивались бы фазные напряжения. На рис. 4.7 изображена векторная диаграмма напряжений и токов при неравномерной нагрузке всех трех фаз и отсутствии нулевого провода.

Треугольник линейных напряжений остается таким же, а звезда фазных напряжений и точка O' могут быть легко получены методом засечек из вершин линейных напряжений.

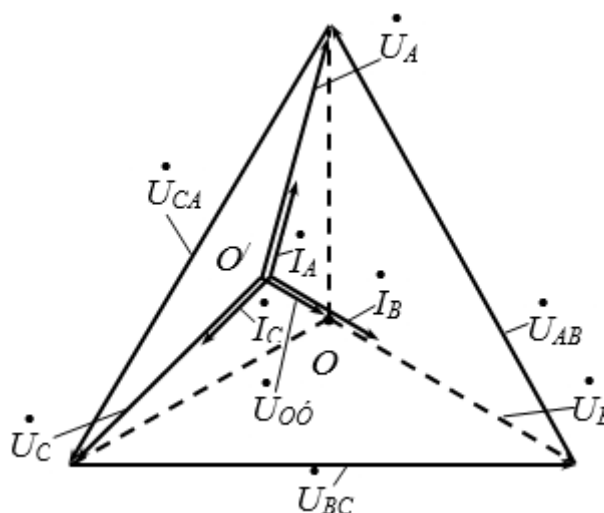


Рисунок 4.7 – Векторная диаграмма токов и напряжений при неравномерной нагрузке и отсутствие нулевого провода

Если одна из фаз, например, А, оборвется или все потребители этой фазы будут выключены, то при отсутствии нулевого провода оставшиеся под напряжением фазы В и С окажутся включенными последовательно. Фазные токи I_B и I_C , протекающие через последовательно включенные сопротивления приемника, в этом случае будут одинаковыми, а фазные напряжения будут пропорциональны сопротивлениям фаз (рис. 4.8). Поэтому на векторной диаграмме точка O' переместится на вектор линейного напряжения U_{BC} и будет делить его на части, равные фазным напряжениям U_B и U_C (в нашем случае $U_B = U_C$)

$$\dot{U}_C = \dot{U}_B = \frac{1}{2} \dot{U}_L = \frac{1}{2} \sqrt{3} \dot{U}_\phi = 0,87 \dot{U}_\phi$$

Напряжение фазы А возрастет:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{AB} \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_\phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,5 \dot{U}_\phi$$

Поэтому в четырехпроводных цепях на нулевой провод не ставят предохранитель, т.к. его перегорание изменяет распределение напряжений фаз.

При коротком замыкании какой-либо фазы, например, C , нулевая точка O' приобретает потенциал линейного провода BC , а фазы A и B оказываются под линейным напряжением. Векторная диаграмма для этого случая представлена на рис. 4.9. Точка O' перемещается в точку C .

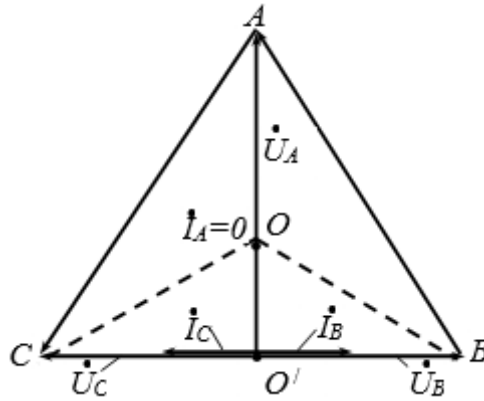


Рисунок 4.8 – Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве фазы в схеме без нулевого провода

Напряжения фаз A и B становятся равными линейным (рис. 4.9):

$$U_A = U_{CA} = U_L = U_\phi \cdot \sqrt{3},$$

$$U_B = U_{BC} = U_L = U_\phi \cdot \sqrt{3},$$

$$U_C = 0.$$

Ток короткого замыкания фазы C распределяется на фазы B и A , т.е. $I_C = I_K = -(I_A + I_B)$. Таким образом, две фазы приемника оказываются под линейным напряжением, на которое они не рассчитаны, и они могут выйти из строя.

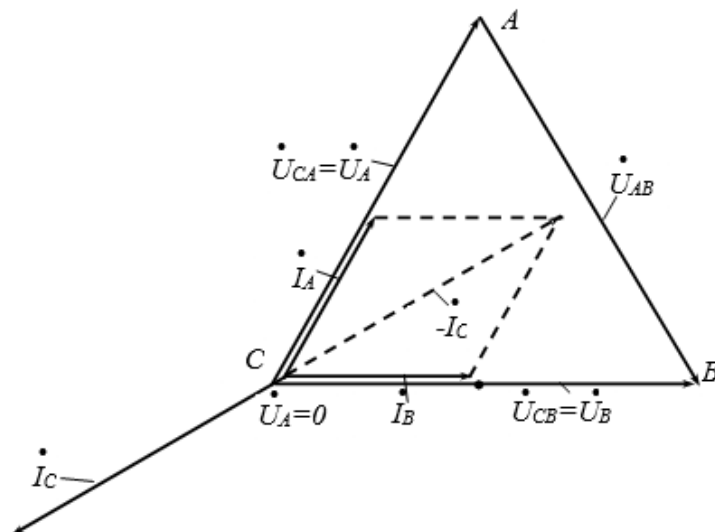


Рисунок 4.9 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании фазы C приёмника трёхпроводной системе

В цепи трехфазного тока активная мощность равна сумме активных мощностей фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C = I_A \cdot U_A \cdot \cos \varphi_A + I_B \cdot U_B \cdot \cos \varphi_B + I_C \cdot U_C \cdot \cos \varphi_C$$

Для измерения мощности в четырехпроводной цепи можно использовать три однофазных ваттметра, суммируя их показания, или использовать однофазный ваттметр с переключением его поочередно во все три фазы. Этот метод может быть использован как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Ознакомиться с приборами, необходимыми для выполнения работы и записать их технические данные.
2. Собрать схему (рис. 4.10) для исследования четырехпроводной цепи при соединении звездой.
3. Произвести испытания при следующих условиях:
 - а) при равномерной нагрузке всех фаз ($R_A=R_B=R_C$), используя в качестве нагрузки фаз ламповые реостаты;
 - б) при неравномерной нагрузке фаз ламповыми реостатами (в одной фазе 4 лампы, во второй – 3 и в третьей – 2 лампы);
 - в) при обрыве фазы А (в одной фазе все лампы отключены, а в двух других – включены).
4. Собрать схему для исследования трехпроводной трехфазной цепи при соединении звездой (рис. 4.11).
5. Произвести испытания при следующих режимах работы:
 - а) равномерная нагрузка всех фаз ламповыми реостатами;
 - б) неравномерная нагрузка фаз (аналогично 4,б)
 - в) обрыв фазы (в одной фазе все лампы отключены, а в двух других – включены);

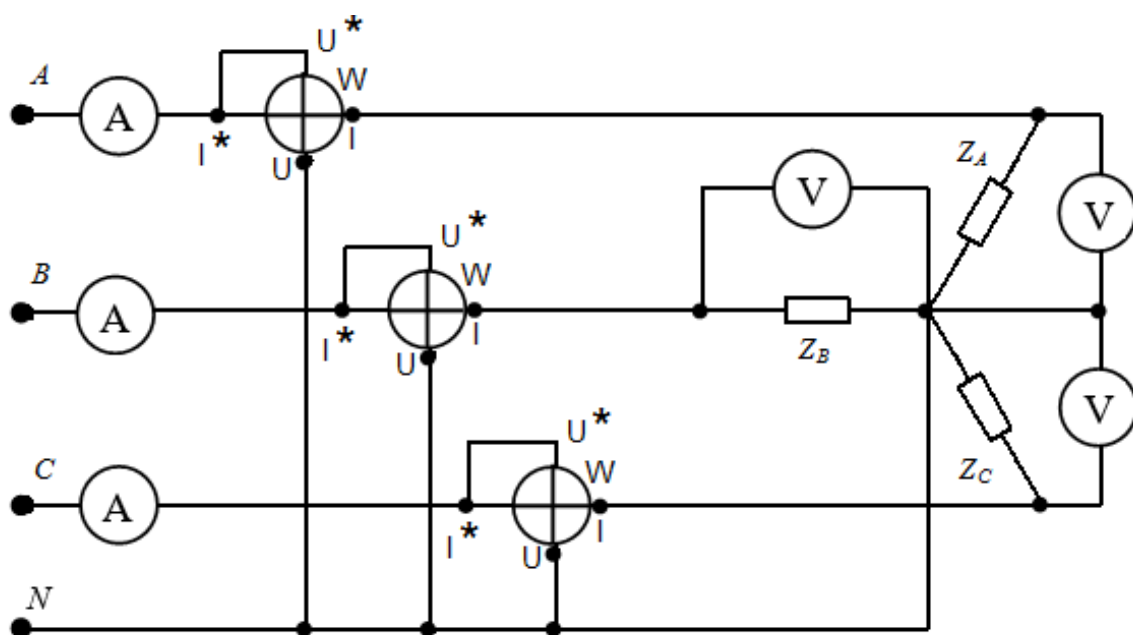


Рисунок 4.10 – Схема для исследования четырехпроводной трехфазной цепи при соединении звездой

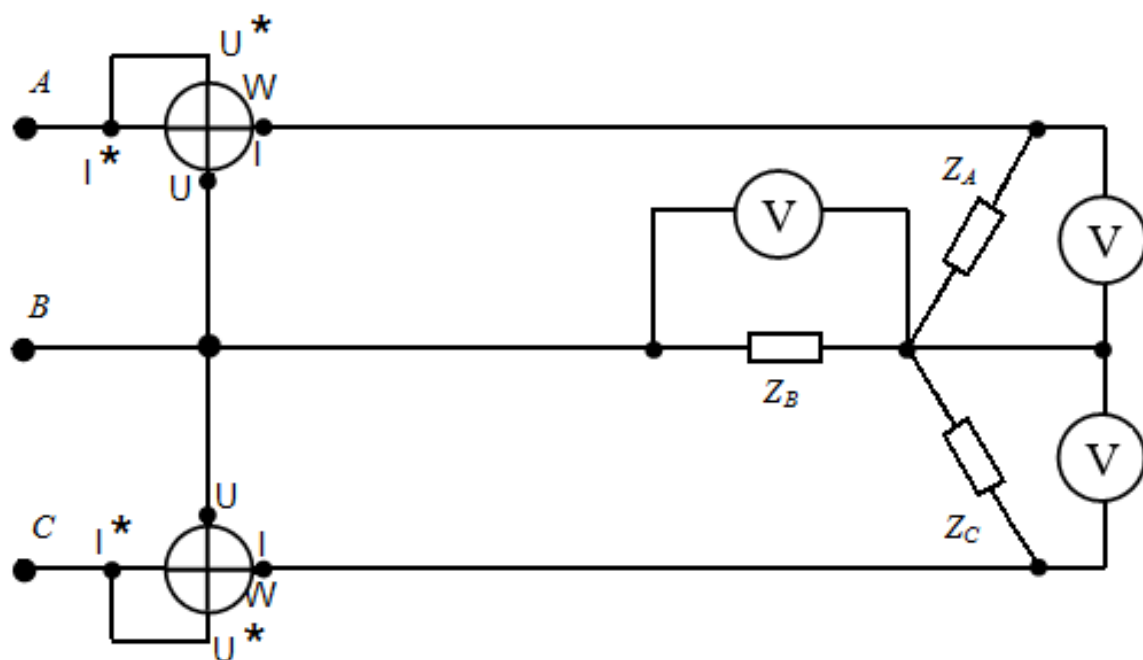


Рисунок 4.11 – Схема для исследования трехпроводной трехфазной цепи при соединении звездой

Показания приборов записать в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 Результаты измерений и вычислений

Величины	Параметр	Режим работы						
		С нулевым проводом			Без нулевого провода			
Измеренные величины		а	б	в	а	б	в	г
	I_A, A							
	P_A, Bm							
	I_B, A							
	P_B, Bm							
	I_C, A							
	P_C, Bm							
	I_0, A							
	U_A, B							
	U_B, B							
	U_C, B							
	U_{AB}, B							
	U_{BC}, B							
	U_{CA}, B							
Вычисленные величины	$r_A, Ом$							
	$r_B, Ом$							
	$r_C, Ом$							
	P_3, Bm							
Величины, найденные из диаграмм	I_0, A				-	-	-	-
	$U_{00'}, B$							

Сопротивление нагрузки фаз вычислять по формулам:

$$r_A = \frac{U_A}{I_A}; \quad r_B = \frac{U_B}{I_B}; \quad r_C = \frac{U_C}{I_C}.$$

Мощность цепи определять по формулам:

$$P_3 = I_A \cdot U_A + I_B \cdot U_B + I_C \cdot U_C$$

$$P_3 = I_A \cdot U_{AC} + I_B \cdot U_{BC}$$

Ввиду того, что в данной лабораторной работе используется измерительный комплекс К505, все измерения и вычисления проводятся аналогично четырехпроводной схеме.

По результатам измерений построить в масштабе векторные диаграммы для всех рассмотренных случаев. Определить на векторных диаграммах I_0 и $U_{00'}$ и занести результаты в таблицу 4.1.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;

3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Какое соединение называется соединением звездой?
2. Как строится векторная диаграмма токов и напряжений при симметричной нагрузке?
3. В каком случае отсутствует ток в нулевом проводе?
4. Почему на нулевой провод не ставят предохранитель?
5. Каковы особенности режима работы потребителей, соединенных звездой, при неравномерной нагрузке фаз систем с нулевым проводом?
6. Каковы особенности режима работы потребителей, соединенных звездой, при обрыве фазы систем с нулевым проводом или без него?
7. Как измеряют мощность трехфазного тока в четырехпроводной схеме?

Лабораторная работа №8. Трёхфазные цепи. Трёхфазная цепь при соединении потребителей по схеме треугольник.

Цель работы: Исследовать особенности работы трёхфазной цепи при соединении симметричного и несимметричного потребителей треугольником, усвоить построение векторных диаграмм по результатам эксперимента.

Основы теории:

Потребители электрической энергии при питании от трёхфазного источника, как и источники электрической энергии, могут быть соединены в треугольник (рис. 5.1). Следует помнить, что схема включения обмоток трёхфазного генератора не предопределяет схему соединения нагрузки. Так, при соединении фаз генератора в звезду нагрузка может быть соединена в звезду с нейтральным проводом, в звезду без нейтрального провода или в треугольник.

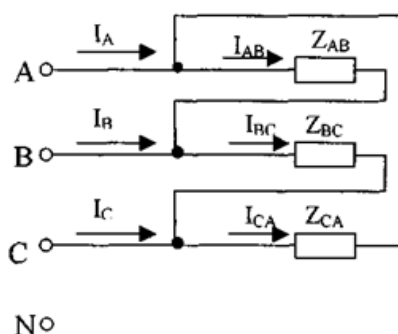


Рисунок 5.1 – Схема соединения фаз в «треугольник»

При соединении в треугольник симметричной трёхфазной нагрузки линейные напряжения оказываются равными фазным напряжениям $U_\phi = U_\Delta$, а линейные токи в $\sqrt{3}$ раз больше, чем токи в фазах потребителя:

$$I_\Delta = \sqrt{3} \cdot I_\phi$$

При этом все фазные токи равны по величине и отличаются друг от друга по фазе на 120° . То же самое относится и к линейным токам (рис. 5.2).

При несимметричной нагрузке связь между линейными и фазными токами выражается уравнениями, записанными на основании первого закона Кирхгофа в комплексной или векторной форме:

$$\overline{I}_A = \overline{I}_{AB} - \overline{I}_{CA}, \quad \overline{I}_B = \overline{I}_{BC} - \overline{I}_{AB}, \quad \overline{I}_C = \overline{I}_{CA} - \overline{I}_{BC}$$

При соединении в треугольник нулевой провод отсутствует, но все фазные потребители в этом случае должны быть рассчитаны на номинальное линейное напряжение

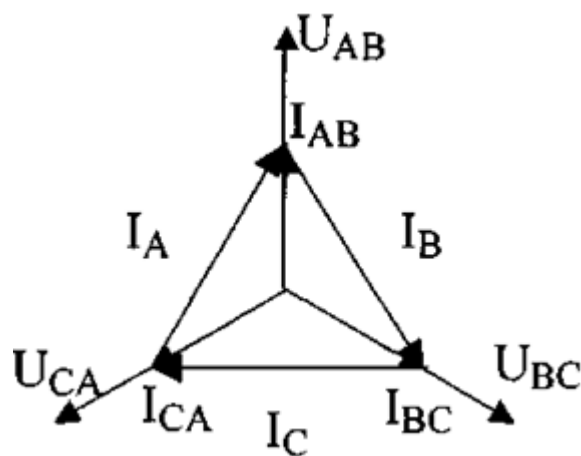


Рисунок 5.2 – Векторная диаграмма трехфазного напряжения

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Ознакомиться с лабораторной установкой (модуль трехфазного трансформатора, модуль резисторов, модуль амперметров переменного тока, модуль вольтметров).
2. Включить модуль питания модуль трехфазного трансформатора (выключатель QF1).
3. Измерить стрелочным вольтметром на модуле трехфазного трансформатора линейные напряжения источника питания на холостом ходу (при разомкнутой цепи). Результаты измерений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$

4. В соответствии с рис. 3. собрать схему соединений потребителей в треугольник. Предъявить схему для проверки.
5. Установить в фазах потребителя по указанию преподавателя одинаковые значения сопротивлений резисторов (симметричную нагрузку). Измерить фазные и линейные токи. Результаты занести в табл. 5.2.
6. Разомкнуть поочередно линейный провод фазы «А» и фазы «В» и провести измерения фазного и линейных токов. Результаты занести в табл. 2.

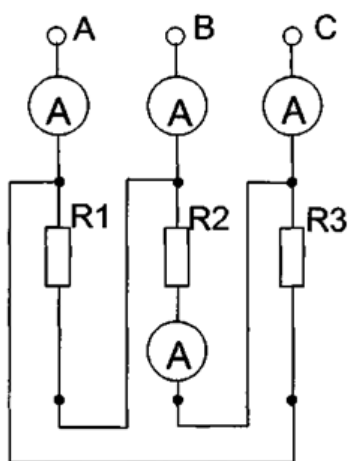


Рисунок 5.3 – Схема соединений потребителей «треугольником»

7. По указанию преподавателя изменить нагрузку в фазах потребителя так, чтобы в каждой фазе были включены различные значения сопротивлений. Результаты записать в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Режим нагрузки	Ток нагрузки, А					
	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}
Симметричная нагрузка						
Обрыв линейного провода «А»						
Обрыв линейного провода «В»						
Обрыв фазы потребителя «АВ»						
Несимметричная нагрузка						

8. Для всех опытов построить в масштабе векторные диаграммы.
9. Сравнить результаты измерений линейных и фазных токов при соединении в треугольник при симметричной и несимметричной нагрузке.
10. Проанализировать влияние обрыва линейного провода на режим работы потребителей.
11. Сравнить режимы работы при включении потребителей в звезду и треугольник при симметричной и несимметричной нагрузке.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;

3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Каким образом три однофазных потребителя соединяют в треугольник?
2. Куда следует подключать вольтметр, чтобы измерить фазное и линейное напряжения трехфазного потребителя?
3. В каком соотношении находятся фазные и линейные напряжения симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
4. Какое соотношение между фазными и линейными токами симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
5. Всегда ли справедливы при соединении в треугольник соотношения:

$$\overline{I_A} = \overline{I_{AB}} - \overline{I_{CA}}, \quad \overline{I_B} = \overline{I_{BC}} - \overline{I_{AB}}, \quad \overline{I_C} = \overline{I_{CA}} + \overline{I_{BC}}$$
6. Всегда ли при соединении в треугольник справедливо $\overline{I_A} + \overline{I_B} + \overline{I_C} = 0$
7. Как отразится отключение одной фазы потребителя на режим работы других фаз и на режим работы всей трехфазной цепи, соединенной в треугольник?

Лабораторная работа №9. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Частотные характеристики последовательного резонансного контура.

Цель работы: Исследовать частотные характеристики последовательного резонансного контура

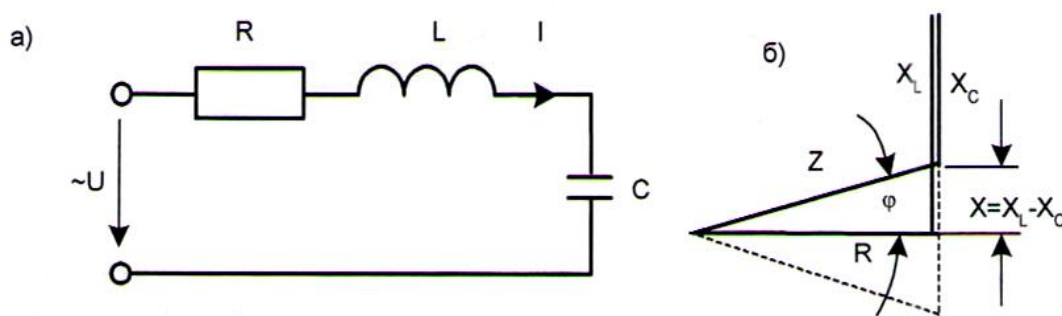
Основы теории:

Частотными характеристиками называют зависимости сопротивлений и проводимостей электрической цепи от частоты приложенного синусоидального напряжения. К ним также относят зависимости от частоты токов, напряжений, фазовых сдвигов и мощности. В последовательном резонансном контуре, изображенном на рис, активное сопротивление не зависит от частоты, а индуктивное, емкостное и реактивное сопротивления изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$X_L(\omega) = \omega L, X_C(\omega) = 1/\omega C, X(\omega) = X_L(\omega) - X_C(\omega).$$

Полное сопротивление контура, как следует из треугольника сопротивлений (рис.6.1,б):

$$z(\omega) = \sqrt{R^2 + X^2}$$



При равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений имеет место режим резонанса напряжений, при котором напряжения на ёмкости и индуктивности равны по величине и противоположны по фазе. В этом режиме величина тока в контуре равна отношению приложенного напряжения к активному сопротивлению цепи, т.к. реактивное сопротивление равно нулю.

Частота, при которой возникает резонанс, называется резонансной

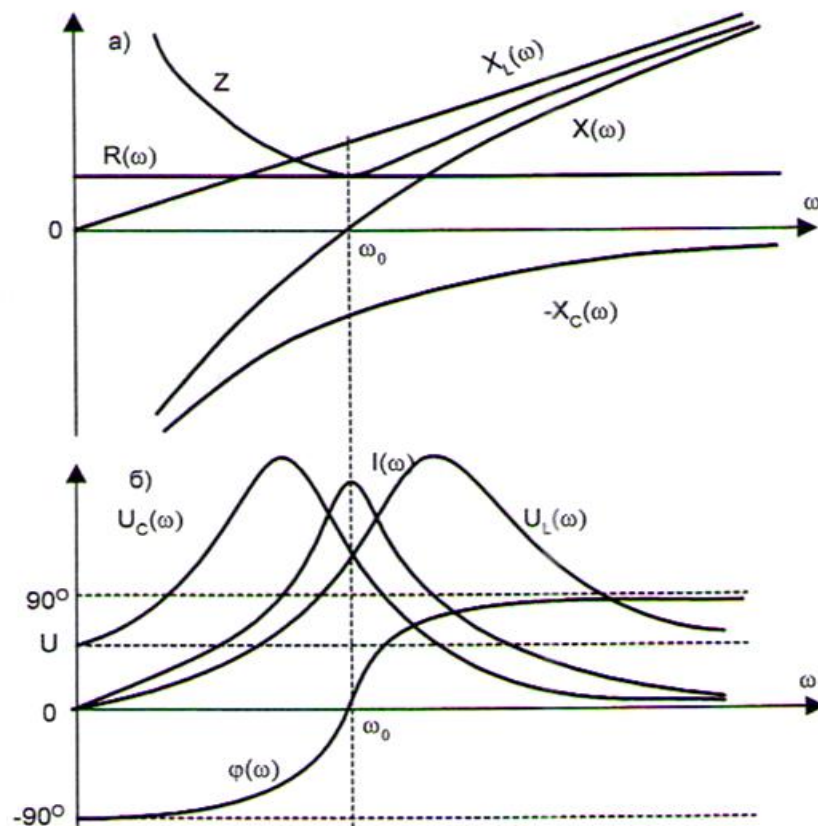
$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC},$$

а сопротивление при этой частоте

$$X_L(\omega_0) = X_C(\omega_0) = \sqrt{L/C} = \rho$$

называется характеристическим сопротивлением резонансного контура.

Отношение сопротивлений $\rho/R=Q$ называется добротностью резонансного контура.



На рис. показаны графики изменения сопротивлений рассматриваемого контура от частоты. На рис. представлены графики зависимости от частоты тока, напряжений на элементах контура и угла фазового сдвига между током и приложенным напряжением, которое остаётся постоянным по амплитуде при всех частотах. Эти величины изменяются в соответствии с выражениями:

$$I(\omega)=U/Z(\omega); U_L(\omega)=\omega L \cdot I(\omega); U_C=I(\omega)/(\omega C);$$

$$\phi(\omega)=\arctg[(\omega L-1/(\omega C))/R].$$

Если добротность $Q>1$, то при резонансе напряжения на индуктивности и ёмкости превышают приложенное напряжение в Q раз.

При $\omega < \omega_0$ $\phi(\omega) < 0$, т.е. ток по фазе опережает напряжение и цепь но-

сит емкостный характер, при $\omega > \omega_0$ $\phi(\omega) > 0$, т.е. цепь носит индуктивный характер.

В режиме резонанса $\phi(\omega)=0$, коэффициент мощности $\cos\phi=1$.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

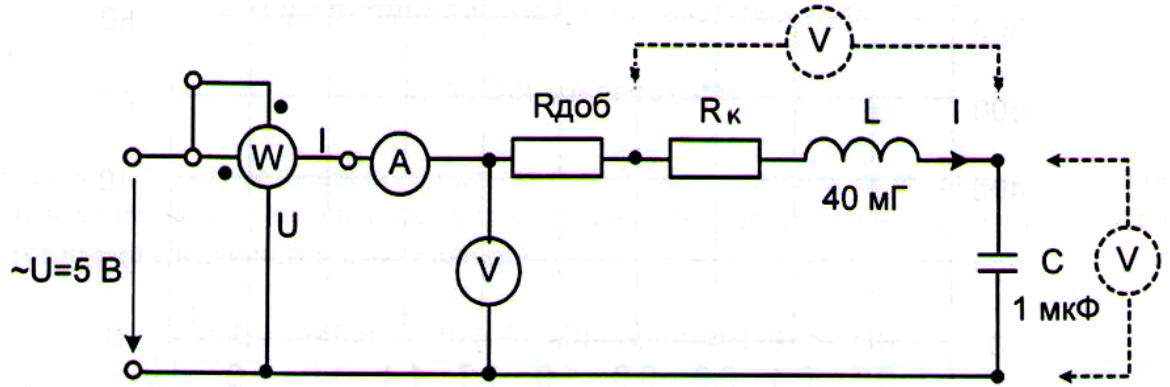
Указания по выполнению лабораторной работы:

В данной лабораторной работе необходимо получить экспериментальным путём частотные характеристики последовательного резонансного контура:

$$R(\omega), X(\omega), Z(\omega), I(\omega), U_L(\omega), U_C(\omega), \varphi(\omega).$$

Порядок выполнения работы следующий.

Соберите схему, изображённую на рисунке



Используйте добавочное сопротивление 100 Ом. Установите пределы измерения: тока – 200 мА, напряжения – 20 В.

Омметром измерьте сумму сопротивлений $R = R_k + R_{доб}$.

Вычислите резонансную частоту и добротность контура, соответствующие измеренному сопротивлению и $C = 1 \text{ мкФ}$ и $L = 0,04 \text{ Гн}$:

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC} = \quad \text{Гц}, \quad \rho = \sqrt{L/C} = \quad \text{Ом}, \quad Q = \rho/R =$$

Подайте напряжение на приборы и на генератор синусоидального напряжения. Изменяя частоту напряжения, подайте такое её значение, при котором ток в цепи примет максимальное значение. Сравните вычисленное и экспериментальное значения резонансной частоты.

Изменяя частоту от 0,3 до 1,5 кГц с интервалом 0,1 кГц, запишите в таблицу 6.1 значения частоты, мощности, тока, напряжений на конденсаторе и на катушке индуктивности совместно с добавочным сопротивлением. Напряжения измеряйте поочерёдно одним и тем же вольтметром. При каждой частоте проверяйте величину поданного напряжения, которое должно равняться 5 В.

6. По экспериментальным данным рассчитайте

$$Z = U/I, \quad Z_{RL} = U_{RL}/I, \quad X_L = \sqrt{Z_{RL}^2 - R^2}, \quad X_C = U_C/I, \\ X = X_L - X_C, \quad U_L = I \cdot X_L, \quad \varphi(\omega) = \arccos P/(UI).$$

Вычисленные значения внесите в таблицу.

f , Гц .	P , мВт	I , мА	U_C , В	U_{RL} , В	Z , Ом	Z_{RL} , Ом	X_L , Ом	X_C , Ом	U_L , В	X , Ом	φ , град
0,3											
0,4											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
f_0											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1,5											

Постройте графики частотных характеристик по экспериментально полученным и вычисленным значениям сопротивлений, напряжений, тока и угла фазового сдвига, аналогичные представленным на рис.

Включите в цепь добавочное сопротивление 220 Ом и убедитесь, что резонансная частота не изменилась, а ток и напряжения на катушке индуктивности и на конденсаторе стали меньше. Запишите их значения.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Как зависят от частоты сопротивления катушки индуктивности и конденсатора?
2. Каково условие возникновения резонанса напряжений в последовательном резонансном контуре?
3. Поясните физическую сущность резонанса напряжений.
4. Как вычислить резонансную частоту?

5. Что понимают под добротностью резонансного контура?
6. Как изменяется в последовательном резонансном контуре угол фазового сдвига между током и приложенным к контуру напряжением при изменении частоты?
7. Как вычислить значения индуктивности катушки и ёмкости конденсатора по измеренным значениям тока и напряжений и заданному значению частоты?

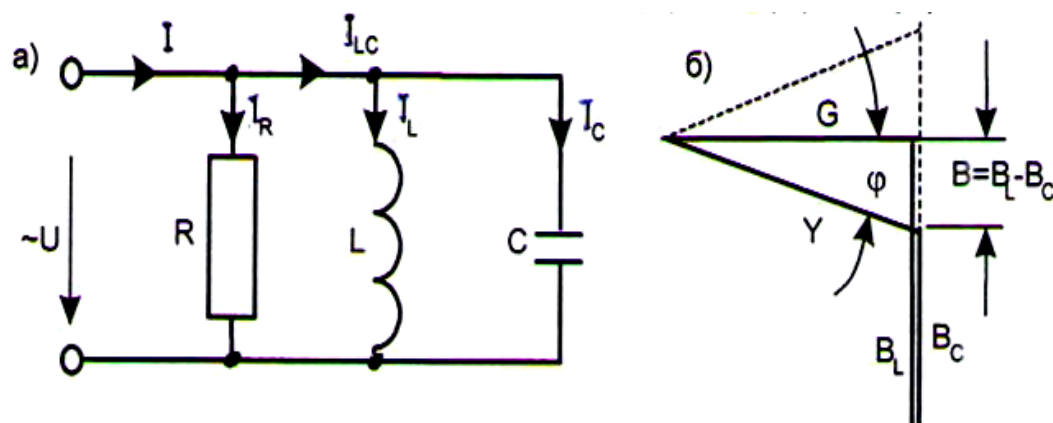
Лабораторная работа №10. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Частотные характеристики параллельного резонансного контура.

Цель работы: Исследовать частотные характеристики параллельного резонансного контура

Основы теории:

В параллельном резонансном контуре активная проводимость G не зависит от частоты, а индуктивная B_L , емкостная B_C и реактивная B изменяются в соответствии со следующими выражениями:

$$B_L(\omega) = \frac{1}{\omega L}; \quad B_C(\omega) = \omega C; \quad B(\omega) = B_L(\omega) - B_C(\omega).$$



Полная проводимость, как следует из треугольника проводимостей рис.

$$Y(\omega) = \sqrt{G^2 + B^2}.$$

Вид этих зависимостей представлен на рис.7.2. При резонансной частоте $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ индуктивная и емкостная проводимости равны друг другу:

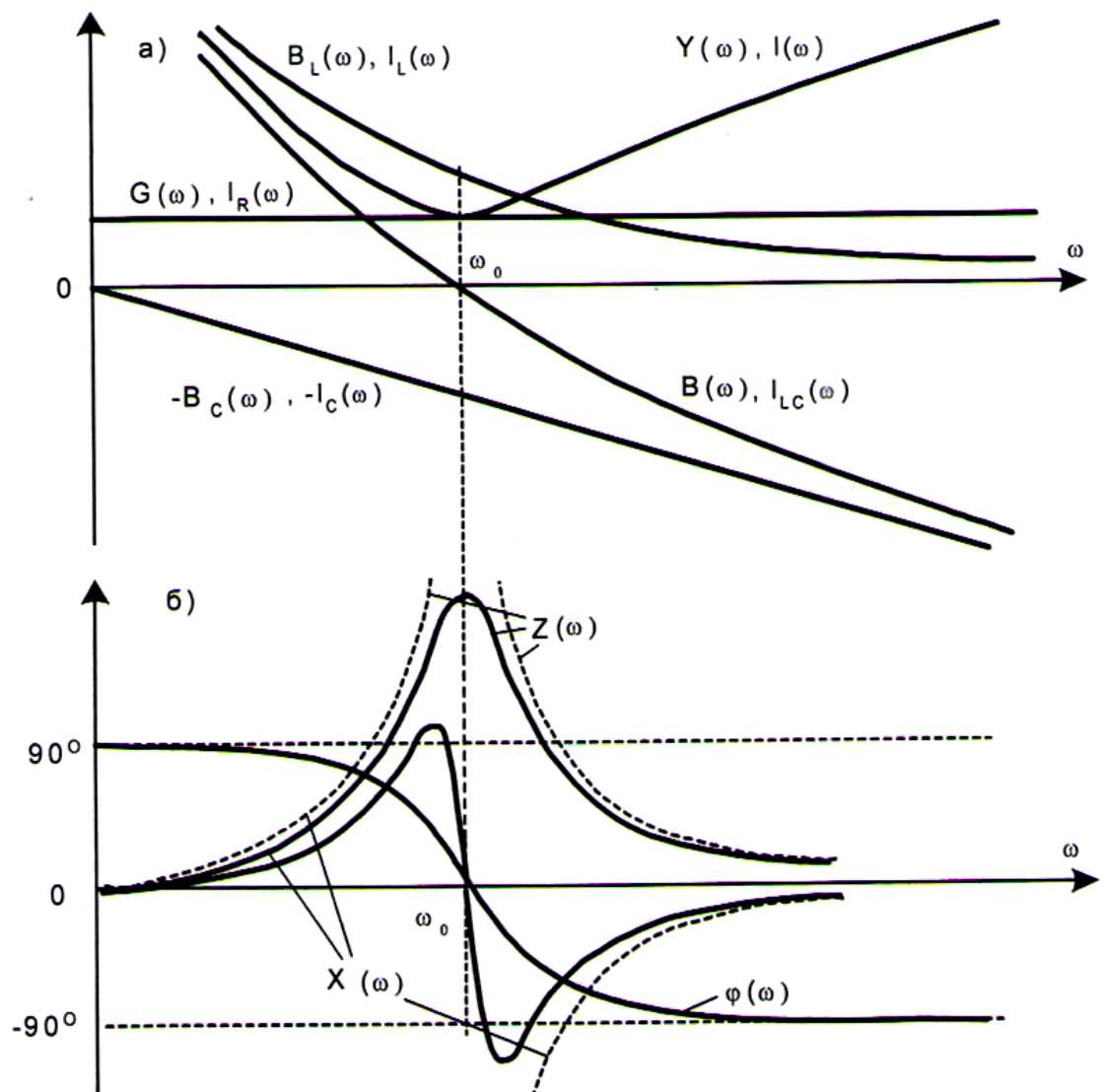
$$B_L(\omega_0) = B_C(\omega_0) = \sqrt{C/L} = \gamma.$$

Проводимость γ называют *характеристической проводимостью* параллельного резонансного контура, а отношение

$$\gamma/G = Q$$

называют *добротностью* резонансного контура.

При резонансе в рассматриваемом контуре токи через ёмкость и через индуктивность равны друг другу и противоположны по фазе, ток, потребляемый от источника, равен току в ветви с активной проводимостью, по фазе он совпадает с приложенным напряжением, ток I_{LC} реактивной части цепи равен нулю, угол $\varphi = 0$, коэффициент мощности $\cos \varphi = 1$. Описанный режим называют режимом *резонанса токов*.



При изменении частоты приложенного к цепи напряжения и неизменной его амплитуде токи изменяются пропорционально соответствующим проводимостям:

$$I(\omega) = U \cdot Y(\omega), \quad I_L(\omega) = U / (\omega L), \quad I_C(\omega) = U \cdot \omega C, \\ I_{LC}(\omega) = U \cdot B(\omega).$$

Угол фазового сдвига между током в неразветвлённой части цепи и приложенным напряжением изменяется в соответствии с выражением:

$$\varphi = \arctg[(1/(\omega L) - \omega C)/G].$$

Графики изменения токов, проводимостей, сопротивлений контура и угла фазового сдвига представлены на рис.

Реальные кривые будут несколько отличаться от изображенных на рисунке, т.к. катушка индуктивности обладает сопротивлением, которое в приведенных выше зависимостях не учитывалось.

При $\omega < \omega_0$ цепь носит индуктивный характер (ток по фазе отстаёт от напряжения), при $\omega = \omega_0$ - активный, при $\omega > \omega_0$ - емкостный (ток по фазе опережает напряжение).

Если добротность $Q > 1$, то при резонансе токи в индуктивной и емкостной ветвях превышают потребляемый от источника ток в Q раз.

На рис. представлены также зависимости полного Z и реактивного X сопротивлений цепи от частоты. В общем случае

$$Z(\omega) = 1/Y(\omega) = 1/\sqrt{G^2 + B^2}, \quad X(\omega) = B/(G^2 + B^2).$$

Пунктирные кривые на рисунке соответствуют идеализированному случаю, когда активная проводимость контура равна нулю. В этом случае при резонансной частоте кривые $Z(\omega)$ и $X(\omega)$ имеют разрыв.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

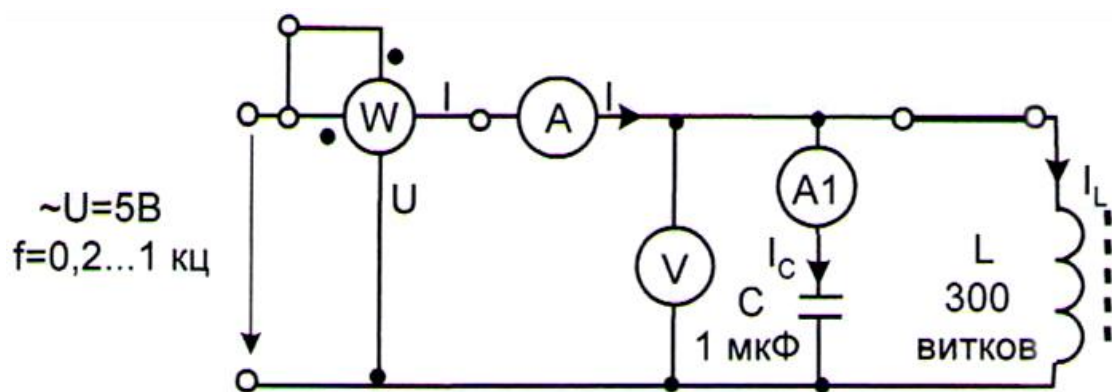
Указания по выполнению лабораторной работы:

В данной лабораторной работе необходимо получить экспериментальным путём частотные характеристики параллельного резонансного контура:

$$I(\omega), I_L(\omega), I_C(\omega), B(\omega), X(\omega), Z(\omega), \varphi(\omega).$$

Порядок выполнения работы следующий.

Соберите схему, изображенную на рис. В качестве катушки индуктивности с малым активным сопротивлением используйте обмотку трансформатора с числом витков $w=300$. В зазоры разъемного сердечника вставьте полоски бумаги в один слой. Используйте конденсатор емкостью 1 мкФ. В цепи предусмотрите перемычки для измерения токов мультиметров. Установите следующие пределы измерения: для вольтметра – 20 В, для амперметра – 200 мА. Питание на схему подайте от генератора переменного синусоидального напряжения.



Омметром измерьте сопротивление катушки R .

Подайте напряжение питания на приборы и на генератор. Установите напряжение 5В и, изменяя частоту, добейтесь резонанса токов, ориентируясь по току в неразветвлённой части цепи. Запишите значения резонансной частоты, мощности и токов.

По показаниям приборов рассчитайте:

- сопротивления и проводимости катушки

$$Z_K = U/I_K, \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}, \quad G_K = \frac{R_K}{Z_K^2}, \quad B_K = \gamma = \frac{X_K}{Z_K^2},$$

- индуктивность катушки

$$L = 1/(2\pi f_0 B_K);$$

- резонансную частоту

$$f_0 = 1/(2\pi\sqrt{LC});$$

- полное сопротивление и активную проводимость контура

$$Z = U/I, \quad G = R/Z^2;$$

- добротность контура

$$Q = \gamma/G.$$

Сравните расчётную резонансную частоту с фактической, а также добротность контура с отношением токов I_C/I .

Изменяя частоту от 0,2 до 1кГц, при постоянном напряжении 5В запишите в таблицу значения мощности P и токов I , I_k и I_c .

(ω) , f , Гц	P , мВт	I , мА	I_K , мА	I_C , мА	$Y(\omega)$, См	$BL(\omega)$, См	$BC(\omega)$, См	$B(\omega)$, См	$Z(\omega)$, Ом	$\varphi(\omega)$, град	$X(\omega)$, Ом
200											
300											

---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
f_0											
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
1000											

По результатам измерений вычислите, пренебрегая активным сопротивлением катушки (которое значительно меньше индуктивного):

$$Y(\omega) = I/U, B_L(\omega) = I_K/U, B_C(\omega) = I_C/U, B(\omega) = B_L(\omega) - B_C(\omega),$$

$$Z(\omega) = I/Y(\omega), \varphi(\omega) = \arccos [P/(UI)], X(\omega) = Z \cdot \sin \varphi.$$

Постройте графики частотных характеристик.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Как от частоты зависят проводимости катушки индуктивности и конденсатора?
2. Каково условие возникновения резонанса токов в параллельном резонансном контуре?
3. Поясните физическую сущность резонанса токов.
4. Как вычислить резонансную частоту, если известны параметры элементов резонансного контура?
5. Как вычислить добротность параллельного резонансного контура?
6. Как изменяется в параллельном резонансном контуре угол фазового сдвига между током в неразветвленной части цепи и напряжением при изменении частоты?
7. От чего и как зависит соотношение токов в реактивных элементах и в неразветвленной части цепи при резонансе токов?

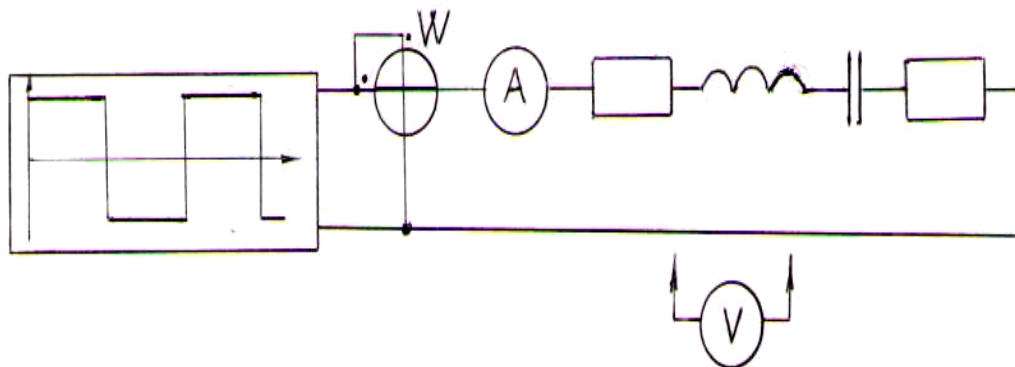
8. Как с учётом активного сопротивления вычислить индуктивную проводимость и индуктивность катушки, если известны ток, протекающий по катушке, а также величина и частота приложенного напряжения?

Лабораторная работа №11. Периодические несинусоидальные токи в линейных электрических цепях. Исследование линейной электрической цепи при периодическом несинусоидальном напряжении.

Цель работы: Приобрести практические навыки сборки и анализа линейных электрических цепей при периодическом несинусоидальном напряжении

Основы теории:

В данной лабораторной работе рассматривается электрическая цепь, представленная на рис. и состоящая из последовательно включенных индуктивного, емкостного и активного сопротивлений. На зажимы цепи подаётся напряжение прямоугольной формы, имеющее амплитуду U_m и частоту $\omega = 2\pi \cdot f = 2\pi/T$.



Представленная на рисунке функция напряжения разлагается в ряд Фурье

$$f(\omega t) = 4U_m/\pi \cdot (\sin \omega t + 1/3 \cdot \sin 3 \omega t + 1/5 \cdot \sin 5 \omega t + \dots) \quad (8.1)$$

Действующие значения гармоник:

$$U_1 = 4U_m/(\sqrt{2} \cdot \pi); U_3 = U_1/3; U_5 = U_1/5; \text{ и т.д.} \quad (8.2)$$

При сравнительно небольших значениях частоты ω когда эффект вытеснения тока незначителен, активное сопротивление цепи можно считать постоянным, в то время как индуктивное сопротивление повышается, а емкостное – снижается пропорционально кратности частот k

$$X_{Lk} = k \omega L; X_{Ck} = 1/(k \omega C) \quad (8.3)$$

Если в рассматриваемой электрической цепи при основной частоте $X_{L1} = X_{C1}$, то ток основной гармоники будет определяться только амплитудой напряжения этой гармоники и активным сопротивлением цепи:

$$I_1 = U_1/R \quad (8.4)$$

Для остальных гармоник действующие значения токов определяются соответствующими напряжениями и полными сопротивлениями:

$$I_3 = U_3/z_3 = U_3/\sqrt{R^2 + [3 \omega L - 1/(3 \omega C)]^2},$$

$$I_5 = U_5 / z_5 = U_5 / \sqrt{R^2 + [5\omega L - 1/(5\omega C)]^2}, \quad (8.5)$$

Чем выше гармоника, тем меньше ток и тем больше угол фазового сдвига φ_k между напряжением и током данной гармоники. Углы фазового сдвига могут быть вычислены в соответствии с выражениями:

$$\varphi_3 = \arccos(R/z_3), \quad \varphi_5 = \arccos(R/z_5), \quad (8.6)$$

Активная мощность при резонансной частоте $\omega = 1/\sqrt{LC}$:

$$P = P_1 + P_3 + P_5 + \dots = U_1 I_1 + U_3 I_3 \cos \varphi_3 + U_5 I_5 \cos \varphi_5 + \dots \quad (8.7)$$

Действующее значение несинусоидального тока

$$I = \sqrt{(I_1^2 + I_3^2 + I_5^2 + \dots)} \quad (8.8)$$

Следует отметить, что если в цепи имеет место резонанс напряжений для первой гармоники, то токи остальных гармоник будут незначительными, потому напряжение на активном сопротивлении будет близким к синусоидальному, а сумма напряжений остальных гармоник будет приложена к LC-фильтру.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Собрать схему, в схеме использовать в качестве катушки индуктивности обмотку трансформатора с числом витков $w=300$, конденсатор ёмкостью $0,47\text{мкФ}$ и сопротивление 100 Ом . Цепь подключить к генератору переменного напряжения. Установить предел измерения тока на мультиметре 200 мА .

Вторым мультиметром измерить активное сопротивление катушки индуктивности R_k и сопротивление нагрузки R_n , затем переключить мультиметр для измерения напряжения, установив предел измерения 20 В .

Включить генератор синусоидального напряжения, установить частоту 500Гц и напряжение 5 В . Измерить ток в цепи и напряжение на катушке. Вычислить индуктивность катушки, пользуясь выражениями:

$$Z_k = U/I_k,$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2},$$

$$L = X_k / (2\pi f)$$

4. Вычислить резонансную частоту основной (первой) гармоники

$$\omega_1 = 1/\sqrt{LC}, \quad f_1 = \omega_1 / (2\pi).$$

Частоту f_1 установить на генераторе, переключив его на сигнал прямоугольной формы. Медленно вращая рукоятку изменения частоты, добиться максимального тока в цепи, сравнить полученную резонансную частоту f_1' с расчётной.

Для напряжения на выходе генератора $U_m = 5$ В вычислить амплитудные и действующие значения напряжений 3-й, 5-й и 7-й гармоник, пользуясь формулами 8.1 и 8.2.

Для экспериментально найденной частоты f_1' вычислить действующие значения токов 3-й, 5-й и 7-й гармоник, пользуясь формулами 8.5.

По формулам 8.6 вычислить углы фазовых сдвигов гармоник, а затем – активную мощность.

Вычислить по 8.8 действующее значение несинусоидального тока.

Вычисленные значения тока и мощности сравнить с показаниями амперметра и ваттметра при установленном на выходе генератора напряжении 5В.

Измерить напряжение на активном сопротивлении нагрузки и сравнить его с вычисленным по 8.4 действующим напряжением первой гармоники.

Подключая осциллограф поочерёдно к выходу генератора, к активному сопротивлению и к последовательно включенным конденсатору и катушке индуктивности, зарисовать на кальке, приложенной к экрану, кривые напряжений. Убедиться, что кривая напряжения на выходе генератора имеет прямоугольную форму, на активном сопротивлении – близка по форме к синусоиде, а на LC-фильтре кривая представляет сумму всех высших гармонических составляющих.

Результаты вычислений и измерений занести в таблицу 8.1.

$f1$		$f1'$		Rk		Rн		X3		X5		X7		Z3		Z5		Z7	
Гц		Гц		Ом		Ом		Ом		Ом		Ом		Ом		Ом		Ом	
U1	U3	U5	U7	I1	I3	I5	I7	Ірасч.	Іэксп.	φ3	φ5	φ7	Ррасч	Рэксп					
В	В	В	В	мА	мА	мА	мА	мА	мА	град	град	град	мВт	мВт					

Сравнить по осциллографу амплитудные значения напряжений на выходе генератора и на активном сопротивлении нагрузки, найдите их отношение и сравните с числом $4/\pi = 1.273$.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;

2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

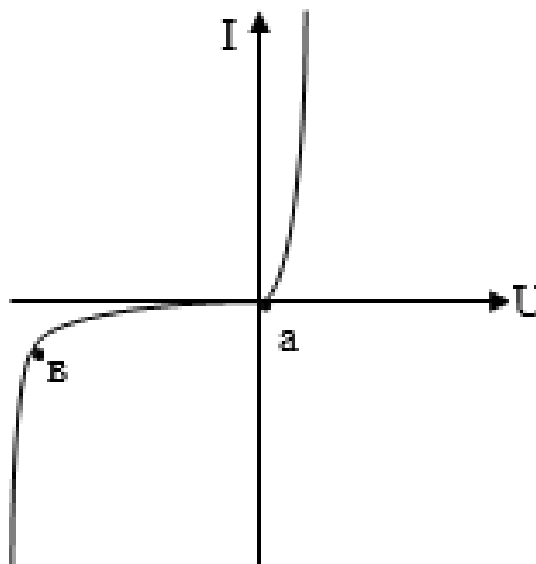
1. Какие гармоники содержит сигнал, симметричный относительно оси абсцисс?
2. Как вычислить сопротивление активно-реактивной цепи для отдельных гармоник тока?
3. Как вычислить углы фазового сдвига между током и напряжением для отдельных гармоник?
4. Как вычислить действующее значение периодического несинусоидального тока?
5. Как вычислить активную мощность в цепи периодического несинусоидального тока?
6. Как можно выделить одну из гармоник периодического несинусоидального тока или напряжения?

Лабораторная работа №12. Периодические несинусоидальные токи в линейных электрических цепях. Вольтамперные характеристики нелинейных сопротивлений.

Цель работы: Изучение студентами вольтамперных характеристик диодов и биполярных транзисторов

Основы теории:

Полупроводниковый диод состоит из двух слоёв полупроводника, один из которых обладает дырочной проводимостью (р – слой), второй – электронной проводимостью (п – слой). Вследствие диффузии электронов и дырок на р-п-переходе образуется потенциальный барьер, который обуславливает нелинейные свойства диода. Вольтамперная характеристика диода представлена на рис. 9.1.



Если диод включить в электрическую цепь так, чтобы напряжение от источника э.д.с. было направлено от слоя р к слою п, то потенциальный барьер ликвидируется и по цепи потечёт ток. При этом сопротивление диода с увеличением напряжения уменьшается, так что падение напряжения на диоде не превышает долей вольта, а величина тока в цепи определяется в основном сопротивлением остальной части цепи и величиной э.д.с. источника (в.а.х. правее точки «а»). Если же напряжение от источника э.д.с. направлено от слоя п к слою р, то под действием приложенного напряжения потенциальный барьер р-п-перехода увеличивается и ток, который в напряжения потенциальный барьер р-п – перехода увеличивается и величина тока, который в этом случае обусловлен наличием неосновных подвижных носителей зарядов, будет ничтожно малым (участок в.а.х. между точками «а» и «в»). При достаточной величине обратного напряжения происходит пробой диода (участок

в.а.х. левее точки «в»). Различают три вида пробоя: лавинный, туннельный и тепловой. Лавинный пробой происходит в результате того, что при довольно высокой напряженности электрического поля, создаваемой источником э.д.с., неосновные носители зарядов (тепловые свободные электроны) разгоняются, получая энергию, достаточную для ионизации атомов кристалла кремния. Образующиеся в результате ионизации заряды, в свою очередь, тоже разгоняются и ионизируют другие атомы. Процесс ионизации нарастает лавинообразно, в результате чего сопротивление р-п – перехода резко падает, и величина тока через диод определяется сопротивлением остальной части цепи.

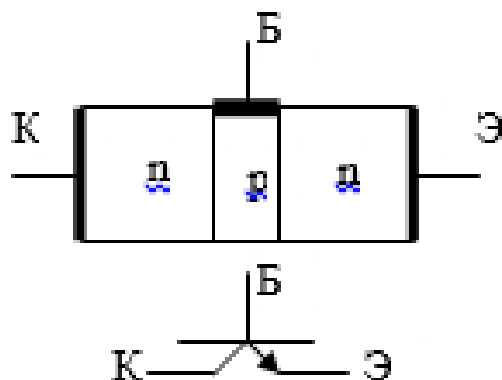
Туннельный пробой происходит у диодов с достаточно высокой концентрацией примесей, когда толщина обеднённой зоны р-п- перехода (лишенной основных носителей зарядов – электронов и дырок) мала. В этом случае под действием высокой напряженности внешнего электрического поля, создаваемого источником э.д.с., электроны преодолевают потенциальный барьер.

Если при пробое диода величина тока настолько велика, что количество выделяемого на диоде тепла превышает количество отводимого, то температура диода повышается, происходит тепловая ионизация, в результате которой разрушается структура полупроводника, лавинный или туннельный пробой переходит в тепловой, диод выходит из строя. Если же теплового пробоя не происходит, то все свойства диода сохраняются.

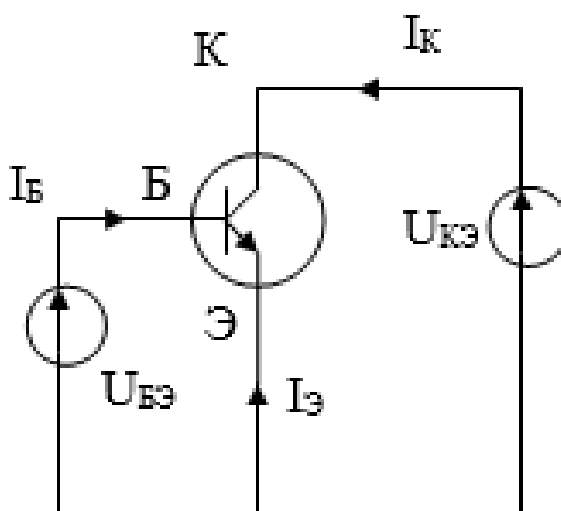
Диоды, используемые в схемах выпрямителей, преобразующих переменный ток в постоянный, работают на участке вольтамперной характеристики правее точки «в». Т.е. в этих схемах напряжение не должно превышать напряжения пробоя. На участке характеристики левее точки «в» работают диоды в схемах стабилизаторов напряжения. Эти диоды имеют специальную конструкцию, предотвращающую тепловую ионизацию при достаточно больших токах в режиме пробоя. Такие диоды называют стабилитронами.

Наиболее широко используемыми управляемыми нелинейными сопротивлениями являются транзисторы, которые подразделяются на биполярные, управляемые током, и полевые, управляемые электрическим полем. В настоящей лабораторной работе рассматриваются характеристики биполярного транзистора.

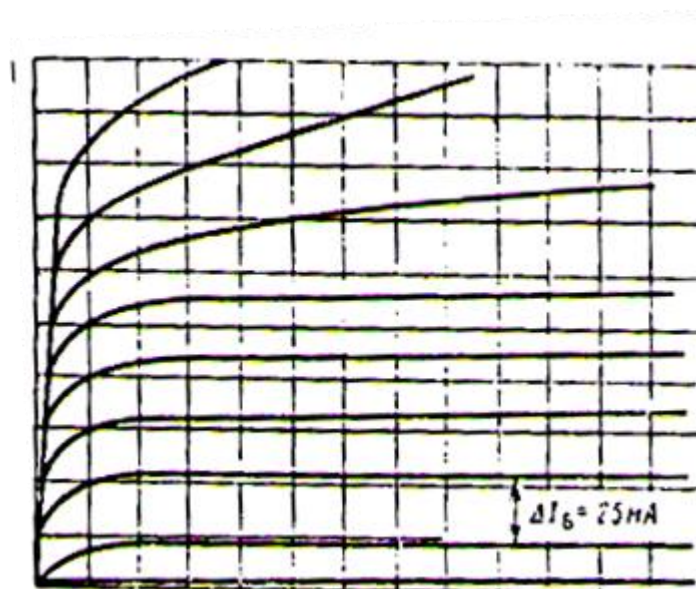
Биполярные транзисторы имеют трёхслойную структуру с двумя р-п – переходами. Существуют транзисторы п-р-п типа и р-п-р типа. Схема конструкции п-р-п – транзистора представлена на рис. На этом же рисунке имеется условное графическое изображение данного транзистора.



Два крайних слоя транзистора состоят из полупроводника, обладающего электронной проводимостью, средний слой – дырочной проводимостью. Каждый из трёх слоёв контактирует с металлическими электродами, которые служат для подключения транзистора к электрическим цепям. Средний слой называют базой, крайние – коллектор и эмиттер. Если между коллектором и эмиттером подать напряжение, как это показано на рис, то эмиттерный переход будет включён в проводящем направлении, а коллекторный – в непроводящем.



При отсутствии тока базы i_b транзистор между коллектором и эмиттером будет иметь достаточно большое сопротивление, ток в цепи коллектора i_k будет незначительным (это так называемый обратный ток коллектора, определяемый неосновными носителями зарядов). Если же в цепи базы создать ток, подключив источник напряжения между эмиттером и базой, то сопротивление коллекторного перехода уменьшится, в результате чего появится ток коллектора i_k . С увеличением тока базы сопротивление транзистора уменьшается.



Вольтамперные характеристики транзистора, представляющие собой зависимость тока коллектора от напряжения между коллектором и эмиттером при различных значениях тока базы, изображены на рис.

Эти характеристики называют выходными, в отличие от входных, представляющих зависимость тока базы от напряжения эмиттер-база.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

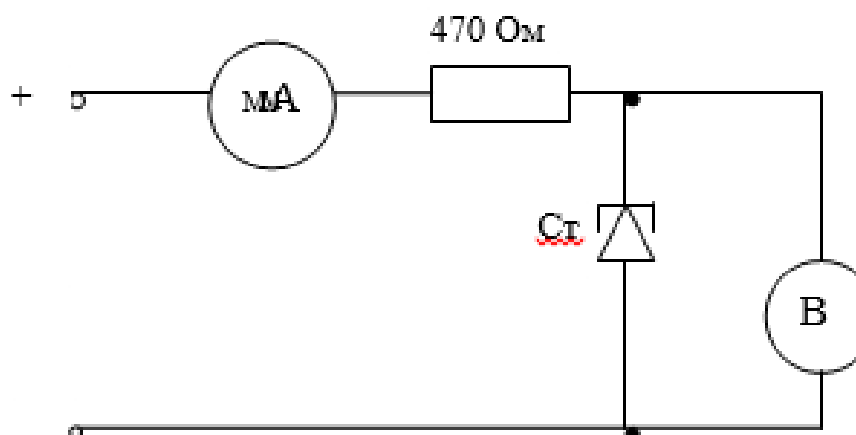
В данной лабораторной работе студенты снимают вольтамперную характеристику стабилитрона и выходные характеристики биполярного транзистора.

Собрать схему, представленную на рис. В качестве источника напряжения использовать регулируемый источник 0...15 В. Установить пределы измерения тока 20 мА, напряжения – 20В.

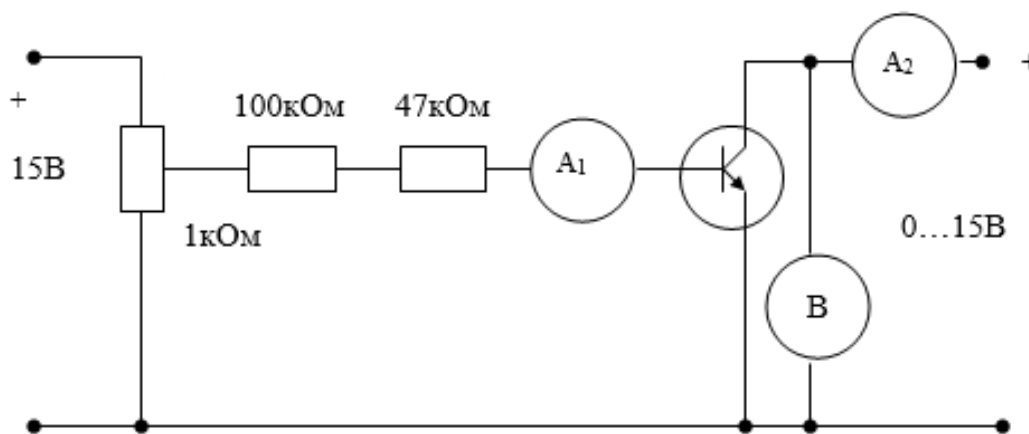
Постепенно увеличивая напряжение, зафиксировать такое его значение, при котором появится в цепи ток. В дальнейшем, повышая ток до 5 мА с интервалом в 1 мА, записать соответствующие каждому току значения напряжения. Результаты замеров записать в таблицу.

Снизить напряжение до нуля и затем поменять его полярность. Постепенно увеличивая напряжение, зафиксировать его значение, при котором в цепи появится ток (оно будет значительно ниже полученного в предыдущем случае). Увеличивая ток до 5 мА с интервалом в 1 мА, записать в таблицу соответствующие каждому току напряжения.

Построить график вольтамперной характеристики на миллиметровой бумаге в масштабе.



Для снятия выходных характеристик транзистора собрать схему, изображенную на рис. На потенциометр 1кОм напряжение подать от нерегулируемого источника питания 15В, в цепь коллектора – от регулируемого источника 0...15В. Пределы измерения приборов установить с учётом того, что ток в цепи базы не будет превышать 100 мкА, в цепи коллектора – 10 мА, напряжение – 5 В.



Установить ток базы 20мкА. Постепенно повышая напряжение в цепи коллектор-эмиттер, найти его значение, после которого ток коллектора изменяется незначительно. До этого значения снять 3 – 4 точки характеристики, после этого значения – 2 – 3 точки.

Проделать опыты, аналогичные п.7, при токах базы 40, 60, 80мкА. Значения напряжений и токов занести в таблицы.

Построить в масштабе на миллиметровой бумаге выходные вольтамперные характеристики транзистора.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

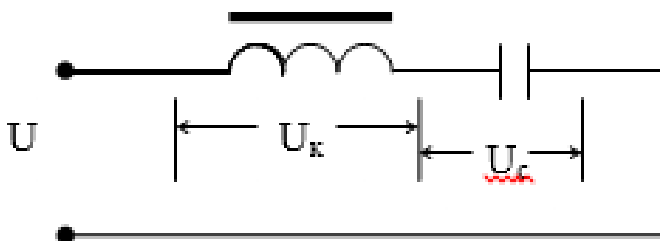
- 1.Опишите конструкцию диода и биполярного транзистора.
- 2.В результате чего образуется потенциальный барьер p-n – перехода?
- 3.Почему диод обладает односторонней проводимостью?
- 4.Чем определяется величина обратного тока диода?
- 5.Какие различают виды пробоя диода? Опишите физические процессы при различных видах пробоя.
- 6.Зависимость между какими величинами отражают входные и выходные характеристики биполярных транзисторов?
- 7.Опишите схемы и способы экспериментального определения вольтамперных характеристик диодов и транзисторов.

Лабораторная работа №13. Феррорезонанс в электрических цепях. Феррорезонанс в последовательной цепи.

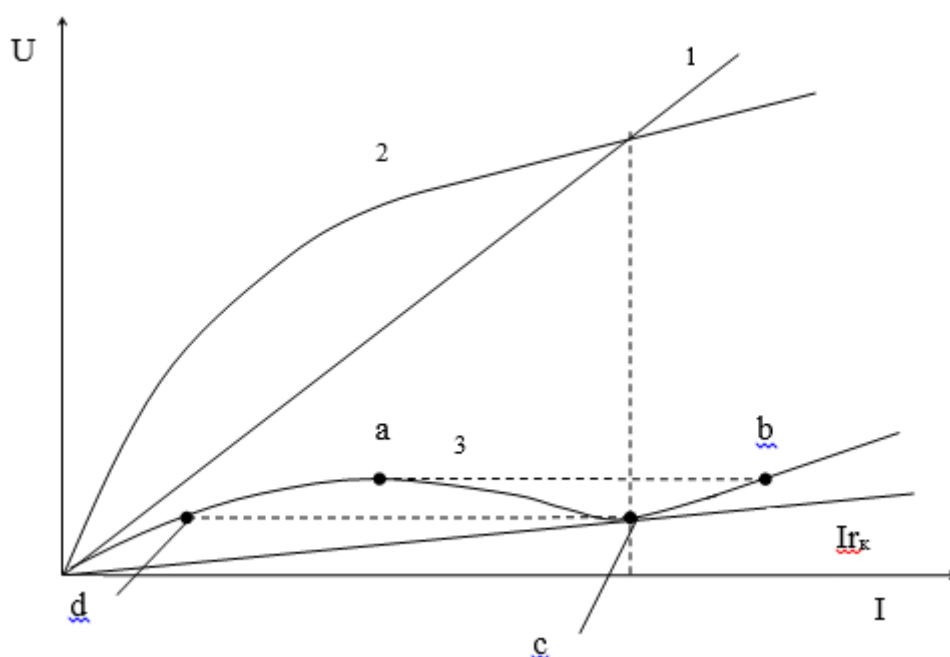
Цель работы: Изучение студентами вольтамперных характеристик и триггерного эффекта в последовательной феррорезонансной цепи.

Основы теории:

Последовательная феррорезонансная цепь состоит из катушки со стальным сердечником и конденсатора.



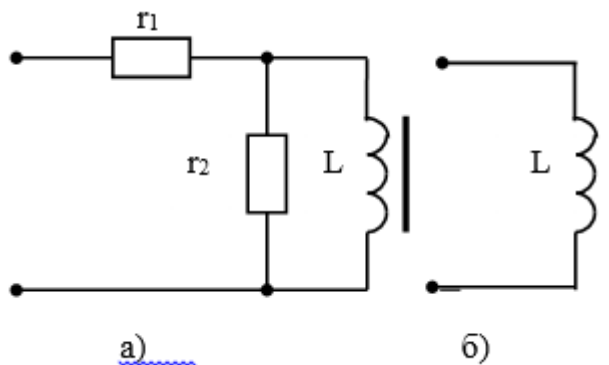
К зажимам цепи подведено синусоидально изменяющееся напряжение определенной частоты.



При увеличении напряжения на конденсаторе U_c ток увеличивается пропорционально напряжению, т.к. сопротивление конденсатора $x_c = 1/(\omega C)$ остаётся постоянным. Вольтамперная характеристика конденсатора линейна (кривая 1 на рис.10.2).

Вольтамперная характеристика катушки со стальным сердечником носит ярко выраженный нелинейный характер (кривая 2 на рис. 10.2). Нелинейность характеристики обусловлена нелинейной зависимостью магнитной индукции в стальном сердечнике от напряжённости магнитного поля.

Если учесть активное сопротивление катушки и потери в сердечнике на гистерезис и вихревые токи, то схема замещения катушки выглядит так, как представлено на рис. 10.3, а. Сопротивление r_1 равно активному сопротивлению обмотки катушки, сопротивление r_2 учитывает потери мощности в магнитопроводе.



Ввиду того, что катушки мотают обычно медным проводом, их сопротивление r_1 существенно меньше индуктивного. Кроме того, потери в магнитопроводе также не оказывают при низких частотах существенного влияния на режим работы электрической цепи, т.к. сопротивление r_2 оказывается намного больше индуктивного сопротивления катушки. Таким образом, с достаточной для практических целей точностью индуктивное сопротивление катушки можно считать равным её полному сопротивлению. С учётом данного допущения схема замещения катушки со стальным сердечником изображена на рис.

При последовательном включении катушки и конденсатора по ним протекает один и тот же ток. Ввиду того, что напряжение на катушке опережает ток на угол $\pi/2$ а на конденсаторе отстаёт от тока на такой же угол, напряжение на зажимах рассматриваемой цепи будет равно разности напряжений на катушке и конденсаторе (кривая 3 на рис. 10.2). Если напряжение на зажимах цепи увеличивать, начиная с нуля, то ток будет постепенно расти до значения, соответствующего точке «а», затем он скачком увеличится до значения, соответствующего точке «б», при этом резко возрастёт мощность, потребляемая цепью, а угол фазового сдвига между током и напряжением изменит свой знак: в точке «а» ток отстаёт от напряжения, в точке «б» - опережает напряжение. При дальнейшем увеличении напряжения ток плавно растёт по кривой 3.

При снижении напряжения ток уменьшается до значения, соответствующего точке «с», затем уменьшается скачком (точка «d») и в дальнейшем плавно уменьшается до нуля.

Скачкообразное изменение тока при незначительном изменении напряжения называют триггерным эффектом.

Точка «с» на кривой 3 соответствует режиму резонанса напряжений. В этой точке напряжение на индуктивности по величине равно напряжению на ёмкости и находится с ним в противофазе. Напряжение на зажимах цепи в этой точке равно падению напряжения на активном сопротивлении цепи. Режим резонанса возникает вследствие нелинейности вольтамперной характеристики катушки со стальным сердечником, поэтому его называют феррорезонансом. Следует напомнить, что в линейных цепях резонанс возникает только при определённой частоте и не зависит от амплитуды тока или напряжения.

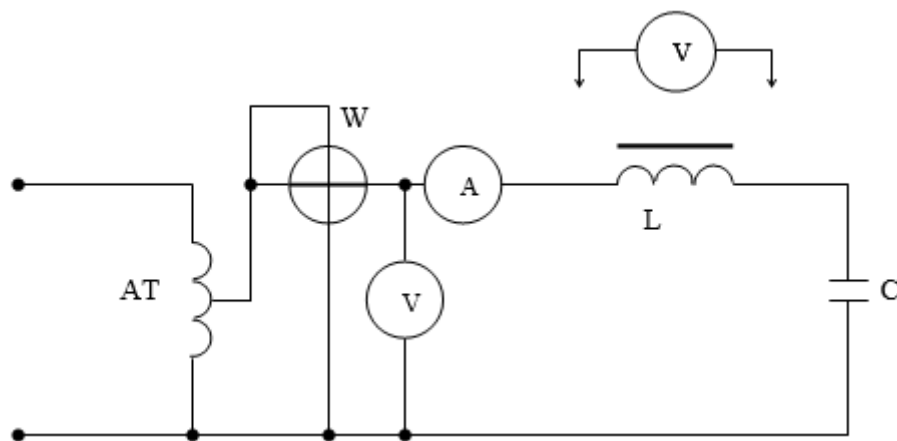
Явление феррорезонанса используется в некоторых электротехнических устройствах, например, в стабилизаторах напряжения. Триггерный эффект используется в некоторых устройствах автоматики.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Собрать схему, изображённую на рис.10.4. Установить следующие пределы измерения: амперметра – 200мА, вольтметра – 20В



Перед подачей напряжения установить рукоятку автотрансформатора АТ в крайнее левое положение. Подать на схему напряжение питания и, очень плавно увеличивая напряжение поворотом рукоятки трансформатора, найти такое его значение, при котором ток в цепи изменится скачкообразно. Это напряжение U_a соответствует точке «а» на рис.10.3.

Уменьшить напряжение до нуля и, увеличивая его снова до значения U_a , зафиксировать при 3 – 4 его значениях ток в цепи, потребляемую мощность и напряжения на катушке U_k и на конденсаторе U_c , которые поочередно замерять вольтметром V_2 .

После прохождения режима резонанса, увеличив напряжение на 1 – 1,5В, снять значения 2 – 3 точек вольтамперной характеристики, затем снизить напряжение до значения U_a , при котором произошёл скачок тока.

Продолжая снижать напряжение интервалами по 0,1В и записывая соответствующие значения тока, мощности и напряжений на катушке и конденсаторе, найти такое его значение, при котором ток уменьшится скачкообразно.

Уменьшая ток до нуля, снять последние 2 – 3 точки вольтамперных характеристик. Результаты замеров записать в таблицу.

	При увеличении напряжения							При уменьшении напряжения					
U,В													
I,мА													
U_k ,В													
U_c ,В													
P,мВт													
φ													

Значения угла фазового сдвига $\varphi = \arctg P/(UI)$ вычислить, учитывая, что $\varphi > 0$, если $U_k > U_c$, и $\varphi < 0$, если $U_k < U_c$.

На миллиметровой бумаге построить графики зависимостей

$$U=f(I), U_k=f(I), U_c=f(I), \varphi=f(I).$$

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. По какой причине изменяется индуктивность катушки со стальным сердечником при изменении тока?
2. Вследствие чего возникает феррорезонанс напряжений?
3. Что такое триггерный эффект в последовательной феррорезонансной цепи?
4. Как изменяется угол фазового сдвига между током и напряжением в последовательной феррорезонансной цепи при триггерном эффекте?
5. Как влияет ёмкость конденсатора на величину тока и напряжения, при которых возникает феррорезонанс?
6. Как влияют сечение магнитопровода и число витков катушки на ток, при котором возникает феррорезонанс?
7. Как влияет форма кривой намагничивания материала сердечника на положение точки феррорезонанса на вольтамперной характеристике последовательной феррорезонансной цепи?

Лабораторная работа №14. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Исследование переходных процессов в цепи с ёмкостью.

Цель работы: Закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих ёмкость, практическая проверка результатов расчёта.

Основы теории:

Электрическая цепь с одним конденсатором и сопротивлениями описывается дифференциальным уравнением первого порядка, поэтому свободные составляющие токов в ветвях и напряжений имеют одно слагаемое вида Ae^{pt} , где p – корень характеристического уравнения, A – постоянная интегрирования.

Характеристическое уравнение может быть представлено в виде:

$$Z(p)=0,$$

где $Z(p)$ – входное операторное сопротивление цепи.

Постоянные интегрирования A определяются для каждого тока и напряжения из начальных условий. Значение A равно начальному значению функции в первый момент времени после коммутации.

Начальное значение напряжения на конденсаторе определяется в соответствии с законом коммутации $u_c(0_-)=u_c(0_+)$. В свою очередь, $u_c(0_-)$ определяется из расчёта цепи до коммутации. Начальные значения других величин, называемые зависимыми начальными условиями, (значения токов и напряжений, которые могут изменяться скачком) рассчитываются по законам Кирхгофа и Ома в момент коммутации $t=0_+$. В электрической цепи с одним конденсатором в результате коммутации свободные составляющие всех токов и напряжений изменяются по экспоненциальному закону с одной постоянной времени $\tau=1/|p|$. В данной работе коммутация (замыкание и размыкание цепи) осуществляется транзистором, работающим в ключевом режиме. Отпирающие импульсы тока на базу транзистора подаются от источника синусоидального напряжения с частотой 50 Гц. Таким образом, процесс замыкания и размыкания цепи периодически повторяется и его можно наблюдать на осциллографе. Длительность каждого включения и отключения составляет 0,01с.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Ознакомиться с электрической схемой и выполнить расчёт докоммутационных и послекоммутационных начальных условий, а также вынужденных (установившихся) значений токов и напряжений при замыкании и размыкании электрической цепи. Составить характеристическое уравнение для замкнутой и разомкнутой (в ветви с сопротивлением R_2) цепи и найти постоянные времени. Результаты расчётов занести в таблицу.

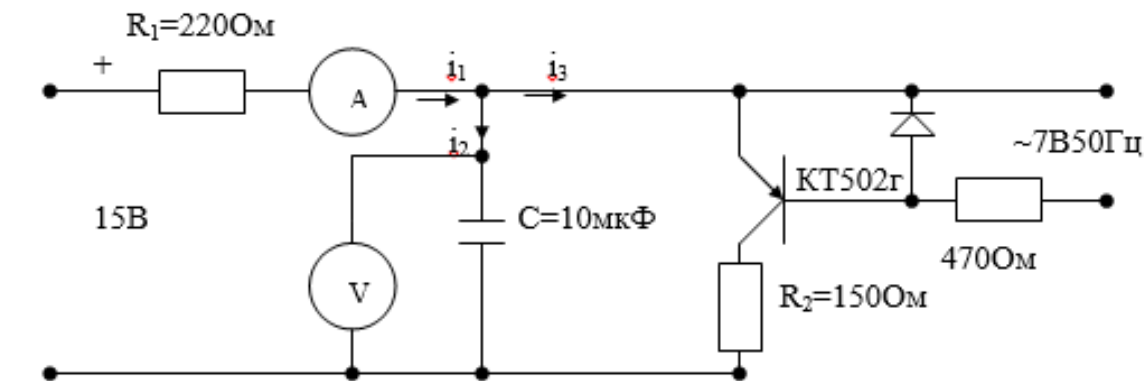


Таблица – Ключ замыкается

t	u_c , В	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	τ , мс
0-, расчёт					
0-, эксперимент					
0+, расчёт					
∞ , расчёт					
∞ , эксперимент					
Свободные составляющие					

Таблица – Ключ размыкается

t	u_c , В	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	τ , мс
0-, расчёт					
0-, эксперимент					
0+, расчёт					
∞ , расчёт					
∞ , эксперимент					
Свободные составляющие					

Собрать схему, обратив внимание на полярность электролитического конденсатора. Подать напряжение 15 В. Из схемы убрать транзистор, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при замыкании ключа, а также $t = \infty$ при размыкании ключа; значения напряжения u_c и токов занести в таблицу.

Вместо цепи транзистора коллектор-эмиттер установить перемычку, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при размыкании ключа и $t=\infty$ при замыкании ключа; значения величин замерить и занести в таблицу.

Рассчитать свободные составляющие токов и напряжения на конденсаторе при замыкании и при размыкании цепи как разность между полными значениями переменных при $t=0_+$ и при $t= \infty$. Вычисленные значения переменных занести в таблицу.

Составить характеристические уравнения и найти постоянные времени τ при замкнутом и разомкнутом положениях ключа.

Установить в цепи транзистор и подать напряжение $\sim 7В$ в цепь базы. На экране осциллографа наблюдать кривые напряжений:

$$U_c(t), U_{R1}(t)=R_1 i_1(t), U_{R2}(t)=R_2 i_3(t).$$

Кривые зарисовать на кальку, а затем перенести их на миллиметровку, приняв следующие масштабы времени и напряжения:

$$1\text{мс}=1\text{см}, \quad 1\text{В}=1\text{см}.$$

Учесть, что при частоте напряжения, поданного в цепь базы транзистора, $f=50\text{Гц}$ цикл замыкания-размыкания равен 20мс. При определении ординат использовать экспериментально полученные значения напряжений при замкнутом и разомкнутом состояниях ключа.

Записать выражения для токов и напряжений, как функций времени, используя вычисленные значения постоянных времени, вынужденных и свободных составляющих величин. Построить на миллиметровой бумаге соответствующие кривые и сравнить их с экспериментальными.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;

7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Почему на конденсаторе напряжение не может изменяться скачком?
2. Что понимают под коммутацией?
3. Чем определяется степень характеристического уравнения?
4. Как получить характеристическое уравнение цепи через её входное сопротивление?
5. Как вычисляют докоммутационные и послекоммутационные начальные условия?
6. Что такое постоянная времени переходного процесса?
7. Как изменится постоянная времени цепи с конденсатором при увеличении его ёмкости?
8. Как влияет активное сопротивление электрической цепи, содержащей ёмкость, на длительность переходного процесса?
9. Как рассчитывают зависимые начальные условия?

Лабораторная работа №15. Переходные процессы в линейных электрических цепях. Исследование переходных процессов в цепи с индуктивностью.

Цель работы: Закрепление методики расчёта переходных процессов классическим методом в цепях, содержащих индуктивность, практическая проверка результатов расчёта.

Основы теории:

Электрическая цепь с одной индуктивностью и сопротивлениями описывается дифференциальным уравнением первого порядка, поэтому свободные составляющие токов в ветвях и напряжений имеют одно слагаемое вида Ae^{pt} , где p – корень характеристического уравнения, A – постоянная интегрирования.

Характеристическое уравнение может быть представлено в виде:

$$Z(p)=0,$$

где $Z(p)$ – входное операторное сопротивление цепи.

Постоянные интегрирования A определяются для каждого тока и напряжения из начальных условий. Значение A равно начальному значению функции в первый момент времени после коммутации. Начальное значение тока в индуктивности определяется в соответствии с законом коммутации $i_L(0_-)=i_L(0_+)$. В свою очередь, $i_L(0_-)$ определяется из расчёта цепи до коммутации. Начальные значения других величин, называемые зависимыми начальными условиями, (значения токов и напряжений, которые могут изменяться скачком) рассчитываются по законам Кирхгофа и Ома в момент коммутации $t=0_+$.

В электрической цепи с одной индуктивностью в результате коммутации свободные составляющие всех токов и напряжений изменяются по экспоненциальному закону с одной постоянной времени $\tau=1/|p|$.

В данной работе коммутация (замыкание и размыкание цепи) осуществляется транзистором, работающим в ключевом режиме. Отпирающие импульсы тока на базу транзистора подаются от импульсного генератора однополярного прямоугольного напряжения с частотой 200 Гц. Таким образом, процесс замыкания и размыкания цепи периодически повторяется и его можно наблюдать на осциллографе. Длительность каждого включения и отключения составляет 2,5мс.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Ознакомиться с электрической схемой и выполнить расчёт докоммутационных и послекоммутационных начальных условий, а также вынужденных (установившихся) значений токов и напряжений при замыкании и размыкании электрической цепи.

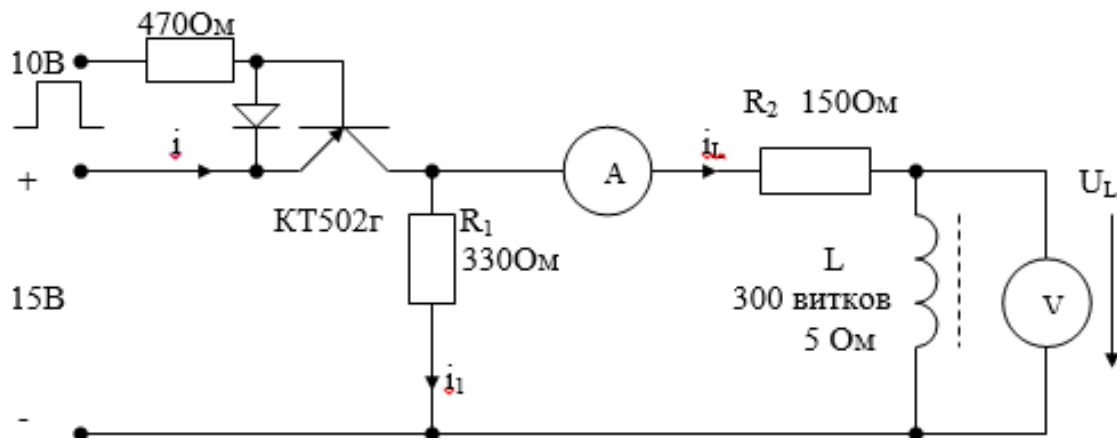


Таблица – Ключ замыкается

t	u_c , В	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	τ , мс
0-, расчёт					
0-, эксперимент					
0+, расчёт					
∞ , расчёт					
∞ , эксперимент					
Свободные составляющие					

Таблица – Ключ размыкается

t	u_c , В	i_1 , мА	i_2 , мА	i_3 , мА	τ , мс
0-, расчёт					
0-, эксперимент					
0+, расчёт					
∞ , расчёт					
∞ , эксперимент					
Свободные составляющие					

Составить характеристическое уравнение для замкнутой и разомкнутой цепи и найти постоянные времени. Результаты расчётов занести в таблицу

Собрать схему. Подать напряжение 15 В. Из схемы убрать транзистор, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при замыкании ключа, а также $t=\infty$ при размыкании ключа; значения напряжений и токов занести в таблицу.

Вместо цепи транзистора коллектор-эмиттер установить перемычку, при этом токи и напряжения будут соответствовать докоммутационному режиму при размыкании ключа и $t=\infty$ при замыкании ключа; значения величин замерить и занести в таблицу.

Рассчитать свободные составляющие токов и напряжений при замыкании и при размыкании цепи как разность между полными значениями переменных при $t=0_+$ и при $t=\infty$. Вычисленные значения переменных занести в таблицу.

Составить характеристические уравнения и найти постоянные времени τ при замкнутом и разомкнутом положениях ключа.

Установить в цепи транзистор и подать напряжение генератора импульсов в цепь базы. На экране осциллографа наблюдать кривые напряжений:

$$U_L(t), U_{R1}(t)=R_1 i_1(t), U_{R2}(t)=R_2 i_L(t).$$

Кривые зарисовать на кальку, а затем перенести их на миллиметровку, приняв следующие масштабы времени, напряжения и тока:

$$1\text{ мс}=5\text{ см}, 1\text{ В}=0,2\text{ см}, 1\text{ мА}=0,1\text{ см}.$$

Учесть, что при частоте сигнала, поданного в цепь базы транзистора, $f=200\text{ Гц}$ цикл замыкания-размыкания равен 5 мс. При определении ординат использовать экспериментально полученные значения напряжений при замкнутом и разомкнутом состояниях ключа и сопротивления соответствующих ветвей.

Записать выражения для токов и напряжений, как функций времени, используя вычисленные значения постоянных времени, вынужденных и свободных составляющих величин. Построить на миллиметровой бумаге соответствующие кривые и сравнить их с экспериментальными.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;

6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Почему ток в индуктивности не может изменяться скачком?
2. Что понимают под коммутацией?
3. Чем определяется степень характеристического уравнения?
4. Как получить характеристическое уравнение цепи через её входное сопротивление?
5. Как вычисляют докоммутационные и послекоммутационные начальные условия?
6. Что такое постоянная времени переходного процесса?
7. Как изменится постоянная времени цепи с катушкой при увеличении её индуктивности?
8. Как влияет активное сопротивление электрической цепи, содержащей индуктивность, на длительность переходного процесса?
9. Как рассчитывают зависимые начальные условия?

Лабораторная работа №16. Постоянная распространения и волновое сопротивление. Исследование режимов цепи с распределёнными параметрами.

Цель работы: Исследовать установившиеся электромагнитные процессы в длинной линии без потерь в режимах холостого хода и короткого замыкания; изучить влияние величины и характера нагрузки на режим работы линии.

Основы теории:

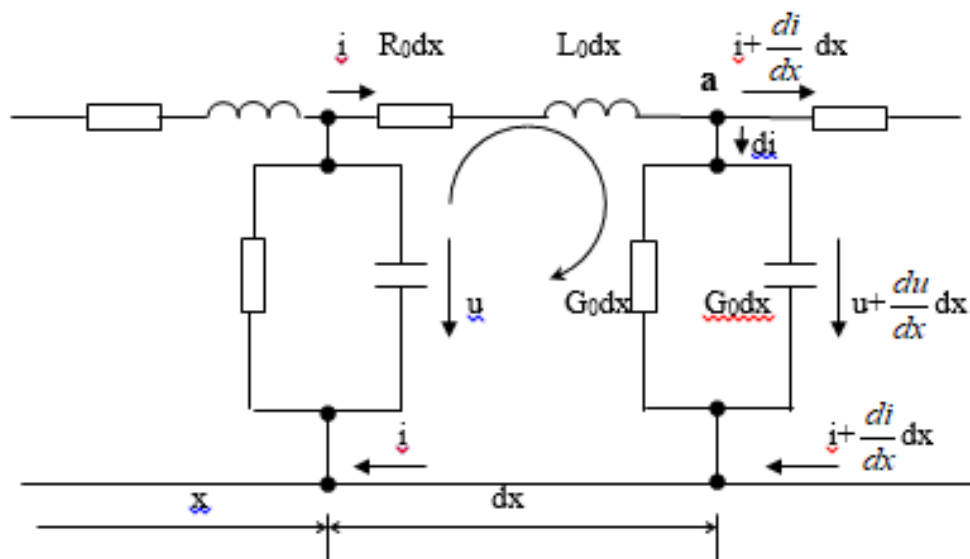
В мощных линиях передачи электрической энергии переменного тока на большие расстояния, в информационных линиях связи, в антеннах радиотехнических устройств и других установках, линейные размеры которых соизмеримы с длиной волн колебательного электромагнитного процесса, все изменения и превращения энергии электромагнитного поля распределены вдоль линии передачи энергии. Такие электрические цепи, в отличие от цепей с сосредоточенными параметрами, называются цепями с сосредоточенными параметрами.

На практике в подавляющем числе случаев приходится иметь дело с однородными линиями, параметры которых (активное сопротивление проводников, проводимость изоляции, индуктивность и ёмкость) равномерно распределены вдоль линии и постоянны на единицу её длины. Кроме того, эти параметры обычно не зависят от напряжения и величины протекающего тока, поэтому протекающие в них процессы могут быть описаны линейными дифференциальными уравнениями. Ввиду того, что напряжения и токи являются функциями не только времени, но и расстояния от начала (или конца) линии эти процессы описываются уравнениями в частных производных.

Схема длинной линии на бесконечно малом участке dx представлена на рис.

Параметры линии зависят от типа линии (воздушная или кабельная), геометрических размеров и расположения проводов, их материала, от частоты приложенного напряжения. Зависимость основных параметров двухпроводной линии и коаксиального кабеля от геометрических размеров и расположения приведена в таблице.

Обозначения на рисунке: x - расстояние от начала линии, м, dx – бесконечно малый участок линии, длины линии, А/м, $\frac{du}{dx}$ - изменение напряжения на единицу длины линии, В/м, R_0 – сопротивление единицы длины линии (прямого и обратного проводов), Ом/м, L_0 – индуктивность единицы длины линии, Гн/м, G_0 – проводимость изоляции на единицу длины линии, См/м, C_0 – ёмкость единицы длины линии, Ф/м.



	Двухпроводная линия	Коаксиальная линия
Параметры линии		
Емкость на единицу длины	$C_0 \approx \frac{\pi \epsilon}{\ln \frac{d}{r_0}}$	$C_0 = \frac{2\pi \epsilon}{\ln \frac{r_e}{r_i}}$
Индуктивность на единицу длины	$L_0 \approx \frac{\mu}{\pi} \ln \frac{d}{r_0}$	$L_0 = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{r_e}{r_i}$
Волновое сопротивление	$Z_B \approx \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{d}{r_0}$	$Z_B = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \ln \frac{r_e}{r_i}$
В приведенных формулах $\mu = \mu_0 \mu_r$ $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м; $\epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-12}$ Ф/м		

Составим уравнение по второму закону Кирхгофа для замкнутого контура, образованного участком линии длиной dx , обойдя его по часовой стрелке:

$$-u + R_0 dx \cdot i + L_0 dx \frac{di}{dt} + u + \frac{du}{dx} dx = 0.$$

После упрощения и деления на dx получим:

$$-\frac{du}{dx} = L_0 \frac{di}{dt} + R_0 i \quad (14.1).$$

По первому закону Кирхгофа для точки «а»:

$$i = di + i + \frac{di}{dx} dx,$$

Ток di равен сумме токов, протекающих через проводимость $G_0 dx$ и ёмкость $C_0 dx$:

$$di = (u + \frac{du}{dx} dx) G_0 dx + \frac{d}{dt} C_0 dx (u + \frac{du}{dx} dx).$$

Пренебрегая слагаемыми второго порядка малости, получим:

$$di = u G_0 dx + C_0 dx \frac{du}{dt}.$$

Подставим найденное значение di в уравнение, составленное по первому закону Кирхгофа, и разделим уравнение на dx :

$$-\frac{di}{dx} = G_0 u + C_0 \frac{du}{dt} \quad (14.2).$$

Уравнения (14.1) и (14.2) являются основными дифференциальными уравнениями для линии с распределёнными параметрами. Рассмотрим решение этих уравнений при установившемся синусоидальном процессе. Воспользуемся символическим методом. Изображение синусоидально изменяющегося тока $i = I_m \sin(\omega t + \psi_i)$ равно $\dot{I} e^{j\omega t}$, где $\dot{I} = I_m e^{j\psi_i} / \sqrt{2}$. Изображение напряжения $u = U_m \sin(\omega t + \psi_u)$ равно $\dot{U} e^{j\omega t}$, где $\dot{U} = U_m e^{j\psi_u} / \sqrt{2}$.

Комплексы $\dot{I}$ и $\dot{U}$ являются функциями расстояния x , но не являются функциями времени, множитель $e^{j\omega t}$ есть функция времени и не зависит от x . Представление изображений тока и напряжения в виде произведения двух множителей, один из которых зависит только от x , а второй – только от t , даёт возможность перейти от уравнений в частных производных к уравнениям в простых производных. Действительно,

$$\frac{du}{dx} = e^{j\omega t} d\dot{U}/dx, \quad L_0 \frac{di}{dt} = L_0 \dot{I} d(e^{j\omega t})/dt = j\omega L_0 \dot{I} e^{j\omega t};$$

$$\frac{di}{dx} = e^{j\omega t} d\dot{I}/dx, \quad C_0 \frac{du}{dt} = j\omega C_0 \dot{U} e^{j\omega t}.$$

Подставим полученные значения частных производных в уравнения (14.1), (14.2) и сократим уравнения на множитель $e^{j\omega t}$:

$$\begin{aligned} -d\dot{U}/dx &= (R_0 + j\omega L_0) \dot{I}; \\ -d\dot{I}/dx &= (G_0 + j\omega C_0) \dot{U}. \end{aligned}$$

Обозначим:

$R_0 + j\omega L_0 = Z_0$ – комплексное сопротивление единицы длины линии,
 $G_0 + j\omega C_0 = Y_0$ – комплексная проводимость единицы длины линии.

С учётом этих обозначений система двух последних уравнений примет вид:

$$-d\dot{U}/dx = Z_0 \dot{I} \quad (14.3)$$

$$-d\dot{I}/dx = Y_0 \dot{U}. \quad (14.4)$$

Решим полученную систему уравнений относительно $\dot{U}$, для этого продифференцируем (14.3) по x :

$$-d^2 \dot{U}/dx^2 = Z_0 d\dot{I}/dx,$$

и в полученное уравнение подставим $d\dot{I}/dx$ из (14.4). Получим:

$$d^2 \dot{U}/dx^2 = Z_0 Y_0 \dot{U} \quad (14.5)$$

Уравнение (14.5) представляет собой линейное дифференциальное уравнение второго порядка, его решение имеет вид:

$$\dot{U} = \dot{A}_1 e^{\gamma x} + \dot{A}_2 e^{-\gamma x} \quad (14.6)$$

Комплексные числа $\dot{A}_1$ и $\dot{A}_2$ – постоянные интегрирования, значение которых определяется напряжением и током в начале или в конце линии. Коэффициент

$$\gamma = \sqrt{(Z_0 Y_0)} \quad (14.7)$$

называют *постоянной распространения*, γ – комплексное число:

$$\gamma = \beta + j\alpha,$$

где β – *коэффициент затухания*, определяющий степень затухания падающей волны на единицу длины линии, α – *коэффициент фазы*, определяющий изменение фазы падающей волны на единицу длины линии.

Ток $\dot{I}$ найдём из уравнения (14.3):

$$\dot{I} = -(1/Z_0)(d\dot{U}/dx) = \gamma(\dot{A}_2 e^{-\gamma x} - \dot{A}_1 e^{\gamma x})/Z_0.$$

Величина $Z_0/\gamma = Z_0/\sqrt{(Z_0 Y_0)} = \sqrt{(Z_0/Y_0)}$ имеет размерность сопротивления, её обозначают Z_B и называют *волновым сопротивлением*:

$$Z_B = \sqrt{(Z_0/Y_0)} = \sqrt{[(R_0 + j\omega L_0)/(G_0 + j\omega C_0)]} = Z_B e^{j\varphi_B} \quad (14.8),$$

где Z_B – модуль, а φ_B – аргумент волнового сопротивления. Таким образом,

$$\dot{I} = (\dot{A}_2/Z_B) e^{-\gamma x} - (\dot{A}_1/Z_B) e^{\gamma x} \quad (14.9).$$

В начале линии $x=0$, напряжение и ток обозначим $\dot{U}_1$ и $\dot{I}_1$. Подставив эти значения в (14.6) и (14.9), найдём постоянные интегрирования:

$$\dot{A}_1 = (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_B)/2 = A_1 e^{j\psi_0}, \quad \dot{A}_2 = (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_B)/2 = A_2 e^{j\psi_n},$$

где ψ_0 и ψ_n – фазы отражённой и падающей волн.

Подставим значения постоянных интегрирования в (14.6) и (14.9):

$$\begin{aligned} \dot{U} &= (\dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_B) e^{\gamma x}/2 + (\dot{U}_1 + \dot{I}_1 Z_B) e^{-\gamma x}/2 = \\ &= \dot{U}_1 (e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})/2 - \dot{I}_1 Z_B (e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})/2. \end{aligned}$$

В полученном выражении $(e^{\gamma x} + e^{-\gamma x})/2 = \text{ch} \gamma x$, $(e^{\gamma x} - e^{-\gamma x})/2 = \text{sh} \gamma x$ – гиперболические косинус и синус. Таким образом, напряжение вдоль линии изменяется в соответствии с выражением:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 \text{ch} \gamma x - \dot{I}_1 Z_B \text{sh} \gamma x \quad (14.10).$$

Аналогично получим выражение для тока:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 \text{ch} \gamma x - (\dot{U}_1 / Z_B) \text{sh} \gamma x \quad (14.11).$$

Формулы для определения комплексов напряжения и тока можно получить, используя комплексы напряжения $\dot{U}_2$ и тока $\dot{I}_2$ в конце линии:

$$\dot{A}_1 = (\dot{U}_2 - \dot{I}_2 Z_B) e^{-\gamma \ell} / 2 = A_1 e^{j\psi_0} \quad (14.12)$$

$$\dot{A}_2 = (\dot{U}_2 + \dot{I}_2 Z_B) e^{\gamma \ell} / 2 = A_2 e^{j\psi_m} \quad (14.13)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \text{ch} \gamma y + \dot{I}_2 Z_B \text{sh} \gamma y \quad (14.14)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 \text{ch} \gamma y + (\dot{U}_2 / Z_B) \text{sh} \gamma y \quad (14.15)$$

где $y = \ell - x$ – расстояние от конца линии до точки, в которой определяются комплексы напряжения и тока.

Для перехода от комплексов напряжения и тока к функциям времени формулы (14.6) и (14.9) преобразуем следующим образом:

- подставим $\dot{A}_1 = A_1 e^{j\psi_0}$, $\dot{A}_2 = A_2 e^{j\psi_m}$, $Z_B = Z_B e^{j\varphi_B}$,
- заменим $\gamma = \beta + j\alpha$,
- умножим правые части на $\sqrt{2}e^{j\omega t}$ и от произведений возьмём мнимую часть:

$$u = A_1 \sqrt{2} e^{\beta x} \sin(\omega t + \psi_0 + \alpha x) + A_2 \sqrt{2} e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_m - \alpha x) \quad (14.16)$$

$$i = -(A_1 \sqrt{2} / Z_B) e^{\beta x} \sin(\omega t + \psi_0 + \alpha x - \varphi_B) + (A_2 \sqrt{2} / Z_B) e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_m - \alpha x - \varphi_B) \quad (14.17)$$

Из полученных выражений видно, что напряжение и ток могут быть представлены в виде двух периодически изменяющихся слагаемых. Фазы вторых из них с течением времени остаются постоянными с увеличением расстояния от начала линии, т.е. эти слагаемые представляет собой волны, перемещающиеся от начала к концу линии. Эти волны принято называть падающими, их амплитуда с увеличением x уменьшается по экспоненте. Фазы первых слагаемых с течением времени остаются постоянными с уменьшением расстояния x , эти волны напряжения и тока называют отражёнными, их амплитуда увеличивается по экспоненте от начала линии к её концу (иначе – уменьшается от конца к началу). Физически уменьшение амплитуд при продвижении волн от начала к концу и от конца к началу линии объясняется наличием в линии активных потерь.

Скорость перемещения волны вдоль линии называют фазовой скоростью v_ϕ . Иначе можно сказать, что фазовая скорость – это скорость перемещения по линии неизменного фазового состояния. Если фаза, например, падающей волны напряжения неизменна, то в соответствии с (14.16)

$$\omega t + \psi_n - \alpha x = \text{const.}$$

Возьмём производную по времени от обеих частей последнего равенства:

$$\omega - \alpha(dx/dt) = 0, \text{ отсюда с учётом того, что } \alpha = \omega \sqrt{L_0 C_0}$$

$$v_\phi = dx/dt = \omega/\alpha = 1/\sqrt{L_0 C_0} \quad (14.18)$$

Таким образом, фазовая скорость определяется параметрами линии и не зависит от частоты. Фазовая скорость, частота $f = \omega/(2\pi)$ и длина волны λ связаны соотношением:

$$\lambda = v_\phi / f \quad (14.19)$$

В ряде случаев R_0 и G_0 значительно меньше L_0 и C_0 . В этих случаях активными потерями можно пренебречь, тогда

$$Z_0 = j\omega L_0, Y_0 = j\omega C_0, \gamma = \sqrt{Z_0 Y_0} = j\omega \sqrt{L_0 C_0}, \text{ т.е.}$$

$$\beta = 0, \alpha = \omega \sqrt{L_0 C_0}, Z_B = \sqrt{Z_0/Y_0} = \sqrt{L_0/C_0} - \text{волновое сопротивление}$$

вещественное, т.е. является чисто активным. При пренебрежении активными сопротивлением и проводимостью в выражениях (14.10) и (14.11), а также (14.14) и (14.15) под знаками гиперболических функций аргумент становится чисто мнимым, но т.к. $\text{ch} j\alpha y = \cos \alpha y$ и $\text{sh} j\alpha y = j \sin \alpha y$, то последние выражения принимают вид:

$$\dot{U} = \dot{U}_1 \cos \alpha x - j \dot{I}_1 Z_B \sin \alpha x \quad (14.20)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 \cos \alpha x - j(\dot{U}_1 / Z_B) \sin \alpha x \quad (14.21)$$

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos \alpha y + j \dot{I}_2 Z_B \sin \alpha y \quad (14.22)$$

$$\dot{I} = \dot{I}_2 \cos \alpha y + j(\dot{U}_2 / Z_B) \sin \alpha y \quad (14.23)$$

Последние выражения справедливы для линии без потерь.

Линия с распределёнными параметрами может находиться в трёх режимах:

- в согласованном режиме,
- в режиме стоячих волн,
- в режиме смешанных волн.

Согласованный режим имеет место тогда, когда сопротивление нагрузки Z_H , подключённой в конце линии, равно волновому сопротивлению Z_B .

В этом случае $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_H = \dot{I}_2 Z_B$ и согласно (14.12) $\dot{A}_1 = 0$, т.е. отраженные волны напряжения и тока при $Z_H = Z_B$ отсутствуют и

$$u = A_2 \sqrt{2} e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_n - \alpha x) \quad (14.24)$$

$$i = (A_2 \sqrt{2} / Z_B) e^{-\beta x} \sin(\omega t + \psi_n - \alpha x - \varphi_B) \quad (14.25)$$

Нагрузку, имеющую такое сопротивление, называют согласованной.

Для линии без потерь при согласованной нагрузке

$$u = \sqrt{2} U_1 \sin(\omega t - \alpha x) \quad (14.26)$$

$$i = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \alpha x) \quad (14.27)$$

Из последних выражений следует, что при согласованном режиме работы линии без потерь возникают только бегущие волны напряжения и тока, вся энергия, передаваемая от генератора к приёмнику, расходуется в приёмнике. В любой точке линии и ток, и напряжение изменяются синусоидально с одинаковыми амплитудами, совпадая по фазе. Действующие значения тока и напряжения вдоль линии остаются постоянными, меняется только их фаза. Отношение напряжения к току в любой точке линии равно полному сопротивлению, следовательно $Z_{BX}=Z_B=Z_H=R_H$.

Режим стоячих волн возникает в трёх случаях: при отсутствии нагрузки в конце линии (режим *холостого хода*, когда $Z_H=\infty$), при коротком замыкании в конце линии (режим *короткого замыкания*, когда $Z_H=0$) и при чисто реактивной нагрузке ($Z_H=jX$). Стоячие волны возникают в результате наложения прямой и отражённой волн. При стоячих волнах в одних точках линии напряжение или ток в любой момент времени равны нулю (эти точки называют узлами), в других точках, отстоящих на четверть волны от первых, напряжение или ток изменяются с максимальной амплитудой (эти точки называют пучностями). Математически стоячая волна напряжения и стоячая волна тока описываются произведением двух тригонометрических функций, одна из которых – функция времени, вторая – функция координаты x или y – расстояния от начала или конца линии.

Найдём уравнения стоячих волн напряжения и тока в линии без потерь при отсутствии нагрузки на её конце, т.е. когда $I_2=0$. В этом случае (14.22) и (14.23) примут вид:

$$\begin{aligned}\dot{U} &= \dot{U}_2 \cos \alpha y, \\ \dot{I} &= j(\dot{U}_2 / Z_B) \sin \alpha y.\end{aligned}$$

Для перехода от комплексов $\dot{U}$ и $\dot{I}$ к функциям времени необходимо правые части последних выражений домножить на $\sqrt{2}e^{j\omega t}$ и выделить мнимые части, которые и будут напряжением и током, как функциями и расстояния, и времени:

$$u = \sqrt{2}U_2 \cos \alpha y \sin \omega t \quad (14.28)$$

$$i = \sqrt{2}(U_2 / Z_B) \sin \alpha y \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (14.29)$$

В точках линии, где $\alpha y = n\pi + \pi/2$, амплитуда напряжения $\sqrt{2}U_2 \cos \alpha y = 0$, т.е. в этих точках имеют место узлы напряжения. В этих же точках амплитуда тока имеет максимум $\sqrt{2}(U_2 / Z_B)$, т.е. в этих точках будут пучности тока. В точках линии, где $\alpha y = n\pi$, имеют место пучности напряжения и узлы тока.

Входное сопротивление линии без потерь при холостом ходе

$$Z_{BXxx} = \dot{U} / \dot{I} = -j Z_B \operatorname{ctg} \alpha y = -j Z_B \operatorname{ctg}(2\pi/\lambda)y \quad (14.30)$$

при длине линии $y = (\lambda n)/4$, где $n=1,3,5,\dots$, $Z_{BXxx}=0$,

при длине линии $y = (\lambda n)/2$, где $n=1,2,3,\dots$, $Z_{BXxx}=\infty$.

При длине линии $0 < y < \lambda/4$ входное сопротивление разомкнутой линии имеет ёмкостный характер, при длине $\lambda/4 < y < \lambda/2$ – индуктивный характер.

Стоячие волны образуются также при коротком замыкании в конце линии.

В этом случае $\dot{U}_2=0$, вследствие чего уравнения (14.22) и (14.23) имеют вид:

$$\dot{U} = jI_2 Z_B \sin \alpha y,$$

$$\dot{I} = I_2 \cos \alpha y.$$

Переходя к функциям времени, получим:

$$u = \sqrt{2}I_2 Z_B \sin \alpha y \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (14.31)$$

$$i = \sqrt{2}I_2 \cos \alpha y \sin \omega t \quad (14.32)$$

Из полученных зависимостей следует, что картина стоячей волны напряжения при коротком замыкании повторяет картину стоячей волны при холостом ходе, а картина стоячей волны тока при коротком замыкании – картину стоячей волны напряжения при холостом ходе.

Входное сопротивление короткозамкнутой линии без потерь

$$Z_{BXK3} = jZ_B \operatorname{tg}(\alpha y) = jZ_B \operatorname{tg}(2\pi/\lambda)y \quad (14.33)$$

при длине линии $y = (\lambda n)/4$, где $n=1,3,5,\dots$, $Z_{BXK3} = \infty$,

при длине линии $y = (\lambda n)/2$, где $n=1,2,3,\dots$, $Z_{BXK3} = 0$.

При длине линии $0 < y < \lambda/4$ входное сопротивление разомкнутой линии имеет индуктивный характер, при длине $\lambda/4 < y < \lambda/2$ – ёмкостный характер.

Рассмотренные свойства четвертьволновых и полуволновых отрезков длинных линий используют в радиотехнических устройствах для получения колебательных контуров с высокой добротностью.

Таким образом, режим стоячих волн имеет следующие особенности:

- напряжение и ток в любой точке линии сдвинуты по фазе на угол $\pi/2$;
- расхода энергии в этом режиме нет, т.к. падающая волна полностью отражается от конца линии;
- действующие значения напряжения и тока меняются вдоль линии по синусоидальному закону, достигая максимальных значений (пучностей) и нулевых значений (узлов) через четверть волны в результате наложения падающей и отражённой волн.

Режим смешанных волн в линии без потерь возникает, если линия замкнута на сопротивление, отличное от волнового. В этом режиме существуют одновременно и бегущая, стоячая волны. Мгновенные значения напряжения и тока в любой точке линии в этом случае определяются выражениями (14.16) и (14.17) (напомним, что в линии без потерь $\beta=0$). Распределение действующих значений напряжения и тока вдоль линии характеризуется наличием максимумов и минимумов, но минимумы не принимают нулевых значений. Если

$Z_B > R_H$ (так же, как и при $Z_B = R_H$), то к концу линии устанавливается минимум напряжения и максимум тока. Если сопротивление нагрузки комплексное, то экстремальные значения напряжения и тока сдвигаются относительно конца линии. Если $Z_H < R_H$, то в конце линии устанавливается максимум напряжения и минимум тока.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

В данной лабораторной работе необходимо провести испытания линии с распределенными параметрами, состоящей из отрезка коаксиального кабеля. Линию необходимо испытать в согласованном режиме, в режиме стоячих волн при холостом ходе и при коротком замыкании и в режиме смешанных волн при $R_H < Z_B$ и $R_H > Z_B$. Синусоидальное напряжение на начало кабеля подаётся от высокочастотного генератора. Для измерения действующего значения напряжения, которое производится с помощью вольтметра, на кабеле через равные промежутки имеются контактные выводы.

Порядок выполнения работы следующий.

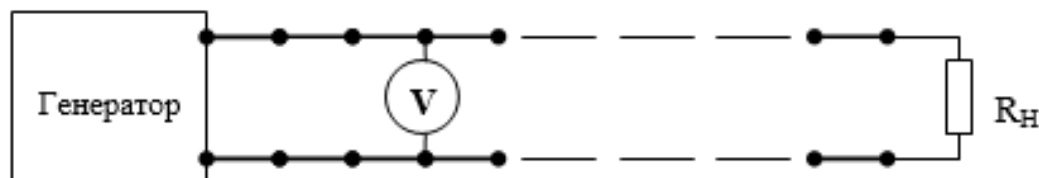
Изучить основные теоретические положения.

Собрать лабораторную установку, схема которой изображена на рис.14.2.

Подключив $R_H = Z_B$, исследовать распределение напряжения вдоль линии. Результаты замеров занести в таблицу 14.2.

Исследовать распределение напряжения вдоль разомкнутого на конце кабеля.

Исследовать распределение напряжения вдоль кабеля, замкнутого на конце коротко.



Исследовать распределение напряжения в режиме смешанных волн при $R_H > Z_B$ и $R_H < Z_B$. При каждом включении линии на её входе следует устанавливать одно и тоже напряжение 0.5 В. Частота напряжения для всех режимов задаётся преподавателем.

По данным измерений построить графики распределения действующего значения напряжения вдоль линии для всех режимов нагрузки. При подготовке отчёта по лабораторной работе определить длину волны λ и фазовую скорость v_{ϕ} .

Таблица

Номер Контакта	Напряжение, В				
	$R_H = Z_B$	$R_H = 0$	$R_H = \infty$	$R_H > Z_B$	$R_H < Z_B$
0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
1					
...					
24					

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Какие линии относят к линиям с распределёнными параметрами?
2. Перечислите электрические параметры длинной линии. Их размерность?
3. Справедливо ли для параметров длинной линии соотношение $Z_0 = 1/G_0$?
4. Функциями каких переменных являются напряжение и ток в линии с распределёнными параметрами?
5. Чем определяются значения параметров длинной линии?
6. Как получить основные уравнения длинной линии?
7. Каким образом при решении уравнений длинной линии переходят от уравнений в частных производных к уравнениям в простых производных?
8. Как относительно комплексов напряжения и тока выглядит общий вид решения уравнений длинной линии?
9. Что представляют собой постоянная распространения, коэффициент затухания, коэффициент фазы? Что определяют эти коэффициенты?
10. Как определяют постоянные интегрирования в решении уравнений длинной линии?
11. Как перейти от комплексов напряжения и тока к функциям времени?

12. Объясните, почему в общем случае напряжение и ток в длинной линии можно представить как сумму падающей и отражённой волн?

13. Что понимают под фазовой скоростью? Как она связана с частотой напряжения и длиной волны?

14. Какую линию называют линией без потерь?

15. Какие режимы могут существовать в длинной линии? Охарактеризуйте эти режимы. Чем они определяются?

16. Каким может быть и чем определяется входное сопротивление длинной линии? Что понимают под волновым сопротивлением линии?

Лабораторная работа №17. Электростатическое поле. Моделирование плоскопараллельных электростатических и магнитных полей током в проводящем листе.

Цель работы: Получение картины силовых линий, моделируемых плоскопараллельным электромагнитным и электростатическим полем на токопроводящем листе и определение его напряженности или индуктивности в отдельных точках.

Основы теории:

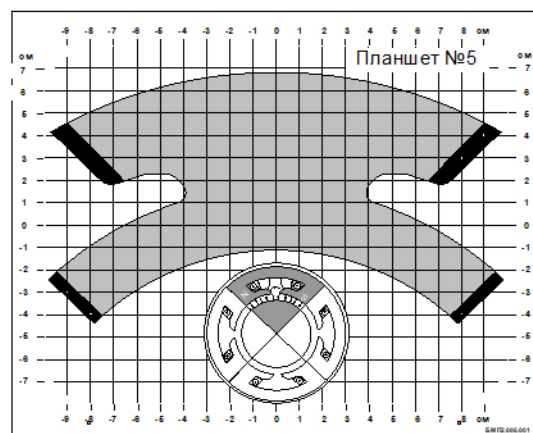
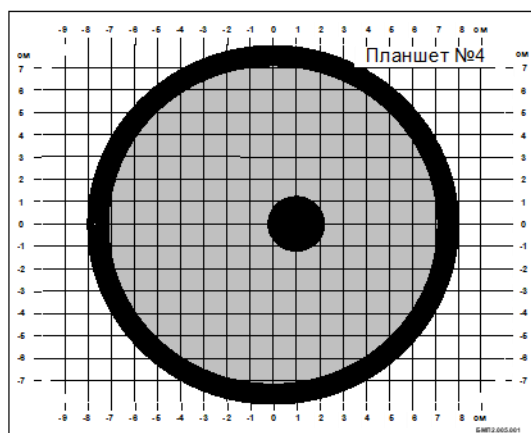
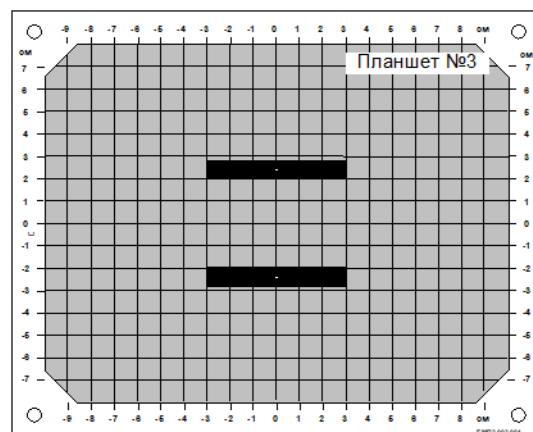
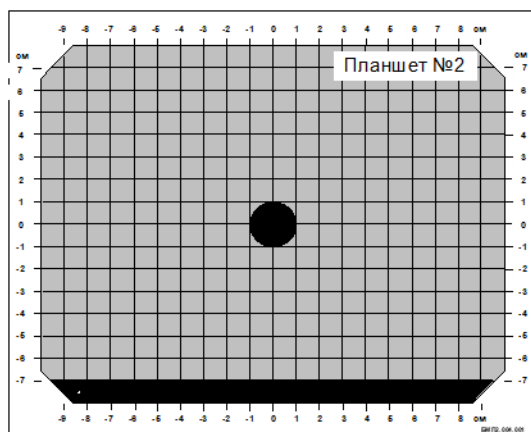
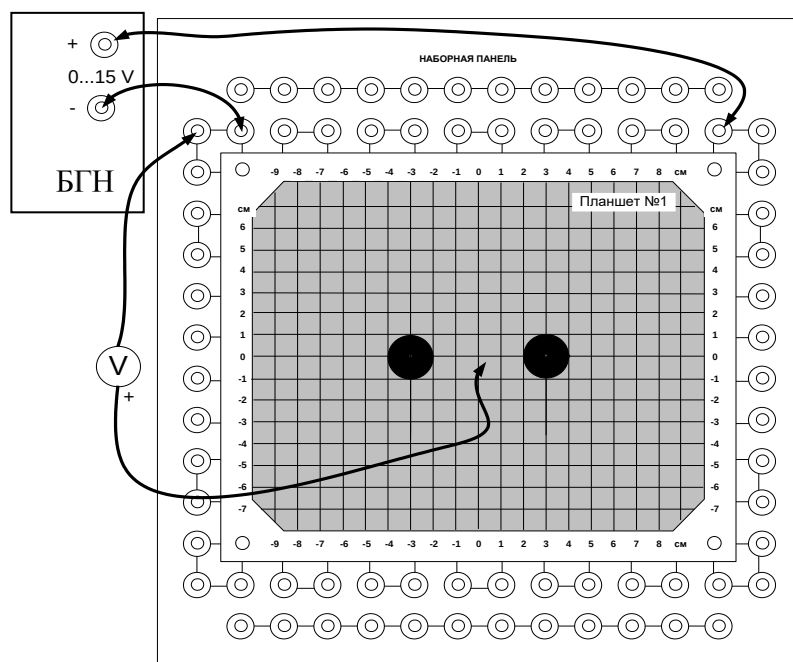
Известно, что электростатическое поле в области, где нет свободных зарядов, а также постоянное магнитное поле в области, где нет токов, описывается такими же уравнениями, как и поле постоянного тока в проводящей среде вне источников энергии, в частности, уравнением Лапласа:

$$\nabla^2 \varphi = 0.$$

Поскольку уравнение Лапласа имеет единственное решение при заданных граничных условиях, то при подобных граничных условиях в диэлектрике и в проводящей среде распределение потенциала будет одинаковым в обеих средах. Это подобие позволяет моделировать как электростатические, так и магнитные поля полем электрического тока в проводящей среде. Соблюдение подобных граничных условий сводится к геометрическому подобию областей, в которых исследуется поле.

Плоский проводящий лист позволяет моделировать распределение электрического потенциала или магнитных силовых линий в сечении плоскопараллельного поля, перпендикулярном длинным заряженным проводникам или проводникам с током. Эквипотенциальные линии в проводящем листе соответствуют эквипотенциальным линиям в электростатическом поле между заряженными проводниками. При моделировании магнитного поля эквипотенциальные линии в проводящем листе соответствуют магнитным силовым линиям при протекании тока в проводниках. Собранный установка для моделирования с одним из планшетов показана на рис. 1.1. Остальные четыре планшета – на рис. 1.2.

Планшеты №№ 1, 2, 3, 4 используются для моделирования электростатических полей заряженных длинных проводов соответствующих сечений. Планшет №1 и, в меньшей степени, №3 и №4 пригодны также и для моделирования магнитного поля двухпроводной линии с током. На планшете №5 моделируется магнитное поле между полюсами и в зазоре явнополюсной электрической машины. На планшетах №3 и №4 при моделировании магнитного поля граничные условия обеспечиваются неточно, поэтому картина поля вблизи проводников, полученная с помощью модели, несколько отличается от реальной.



Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Установите на наборную панель один из вариантов конфигурации проводящего листа (планшет 1, 2, 3 или 4) и подключите питание от генератора постоянных напряжений и мультиметр в режиме вольтметра, как показано на рис. 1.1.

Приготовьте рисунок расположения электродов с координатной сеткой (см. приложение 1).

Включите выключатель сети блока генераторов напряжений (БГН) и убедитесь, что один из электродов имеет потенциал, равный нулю, а другой – потенциал, равный напряжению источника питания.

Выберите такое напряжение питания $U = 10 \dots 15$ В и шаг изменения потенциала ΔU (например 1; 2 или 2,5 В), чтобы на картине поля получилось 7...10 эквипотенциальных линий.

Перемещая зонд от точки нулевого потенциала по оси симметрии к другому электроду, найдите точки с потенциалами ΔU , $2\Delta U$, $3\Delta U$... Найденные точки отмечайте на подготовленном рисунке с координатной сеткой.

Перемещая зонд из точки с потенциалом ΔU вокруг электрода (слегка приближаясь или удаляясь от него), находите точки равного потенциала и отмечайте их на рисунке. Точки равного потенциала соедините плавной кривой. Аналогично постройте другие эквипотенциальные линии.

Примечание: В каждом варианте проводящего листа имеются одна или две оси симметрии, поэтому можно ограничиться исследованием половины или четверти проводящей области листа.

Пользуясь известными правилами графического построения картины поля, по эквипотенциальным линиям электростатического поля постройте силовые линии напряжённости поля.

Вычислите напряженность электрического поля в двух - трёх точках проводящего листа и покажите направление вектора напряженности в этих точках на рисунке ($E \cong \Delta U / \Delta l$).

Установите на наборную панель один из вариантов конфигурации проводящего листа (планшет 1, 3, 4 или 5) и подключите питание от генератора постоянных напряжений и мультиметр в режиме вольтметра, как показано на рис. 1.1.

Приготовьте рисунок расположения электродов с координатной сеткой (см. приложение 1).

Включите выключатель «Сеть» блока генераторов напряжений (БГН) и убедитесь, что один из электродов имеет потенциал, равный нулю, а другой – потенциал, равный напряжению источника питания.

Выберите такое напряжение питания $U = 3 \dots 15$ В и шаг изменения потенциала ΔU (например 1; 2 или 2,5 В), чтобы на картине поля получилось 7...10 эквипотенциальных линий.

Перемещая зонд от точки нулевого потенциала по оси симметрии к другому электроду, найдите точки с потенциалами ΔU , $2\Delta U$, $3\Delta U$... Найденные точки отмечайте на подготовленном рисунке с координатной сеткой.

Перемещая зонд из точки с потенциалом ΔU вокруг электрода (слегка приближаясь или удаляясь от него), находите точки равного потенциала и отмечайте их на рисунке. Точки равного потенциала соедините плавной кривой. Аналогично постройте другие эквипотенциальные линии.

Примечание: В каждом варианте проводящего листа имеются одна или две оси симметрии, поэтому можно ограничиться исследованием половины или четверти проводящей области листа.

Считая снятые эквипотенциальные линии электрического поля магнитными силовыми линиями, постройте линии равного магнитного потенциала, пользуясь известными правилами графического построения картины поля. Примите конкретное значение тока в шинах или МДС катушек и укажите для каждой эквипотенциальной линии значение магнитного потенциала.

Вычислите магнитную индукцию $B = \mu_0 \frac{\Delta U_m}{\Delta l}$ в двух – трёх точках поля и покажите направление вектора магнитной индукции в этих точках на рисунке

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

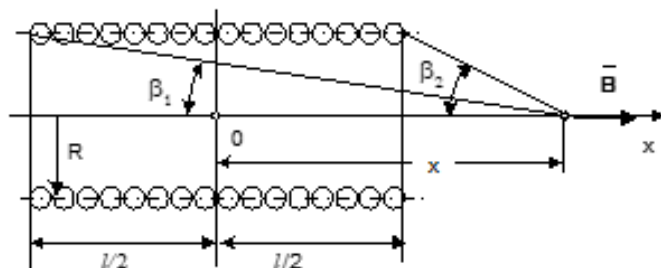
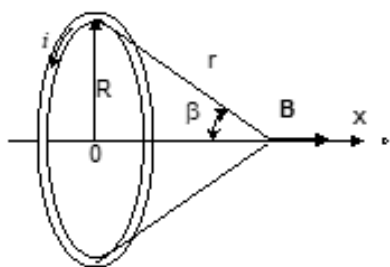
Лабораторная работа №18. Магнитное поле постоянного тока. Исследование постоянного магнитного поля на оси катушек с помощью датчика Холла.

Цель работы: Измерение и расчет индуктивности вдоль оси цилиндрической и кольцевых катушек.

Основы теории:

На основе закона Био-Савара-Лапласа можно получить формулу для определения напряжённости магнитного поля на оси кругового витка радиуса R , по которому протекает ток i , (рис.2.1):

$$H = \frac{iR^2}{2r^3} = \frac{i}{2R} \sin^3 \beta = \frac{i}{2} \frac{R^2}{(\sqrt{R^2 + x^2})^3}$$



Пользуясь этим выражением в [1] выведена также формула для определения напряжённости поля на оси однослойной цилиндрической катушки, имеющей радиус витка R и длину l (рис. 2.2):

$$H = \frac{i}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2)$$

Эти формулы с некоторой погрешностью пригодны и для вычисления напряжённости на оси реальных многослойных катушек, если их толщина мала по сравнению с радиусом.

С учётом того, что магнитная индукция $B = \mu_0 H$ и число витков катушки равно w , получим:

$$\text{для кольцевой катушки - } B = \frac{\mu_0 w i R^2}{2r^3} = \frac{\mu_0 w i}{2R} \sin^3 \beta = \frac{\mu_0 w i}{2} \frac{R^2}{(\sqrt{R^2 + x^2})^3};$$

$$\text{для цилиндрической катушки - } B = \mu_0 \frac{i w}{2l} (\cos \beta_1 - \cos \beta_2).$$

В наборе миниблоков этого комплекта имеется миниблок с цилиндрической катушкой и миниблок с двумя одинаковыми соосными кольцевыми катушками, одна из которых

может перемещаться относительно другой. Параметры катушек указаны на этикетках миниблоков.

Для измерения магнитной индукции используется датчик Холла с усилителем (миниблок «Тесламетр»). Для измерения магнитной индукции необходимо подвести к «Тесламетру» питание +15 В, к его выходу подключить вольтметр (предел измерения 200 мВ), ручкой остановки нуля добиться напряжения на выходе, близкого к нулю, и ввести зонд с датчиком Холла внутрь катушки на нужное расстояние от её края. Показание вольтметра на выходе усилителя пропорционально магнитной индукции.

Чувствительность системы «датчик – усилитель» указана на этикетке миниблока. Если требуется изменить или уточнить чувствительность, то необходимо открыть крышку миниблока, ввести зонд в магнитное поле с известной магнитной индукцией и подстроечным резистором установить необходимое напряжение на выходе усилителя. **Непосредственно перед последней операцией обязательно проверить установку нуля!**

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

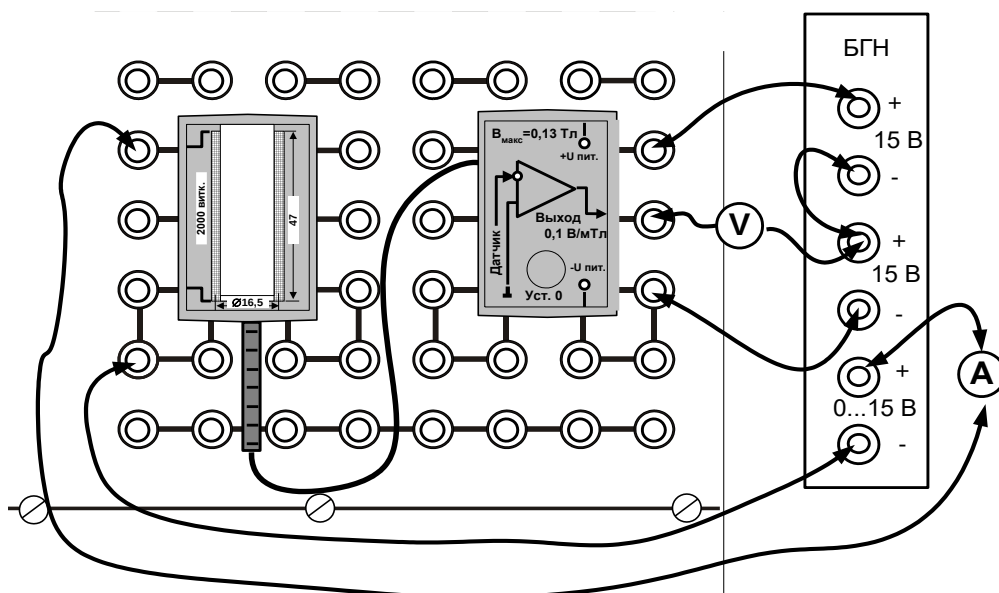
Установите исследуемую катушку на наборную панель, как показано на рис. 2.3 и подведите к ней питание от регулируемого источника постоянного напряжения 0...15 В блока генераторов напряжений (БГН) через амперметр.

Установите на наборную панель миниблок для измерения магнитной индукции («Тесламетр») и подключите к нему питание +15 В, соединив два нерегулируемых источника постоянного напряжения БГН последовательно (рис. 2.3).

Разомкните цепь питания катушки (выньте из гнезда наборной панели штырёк провода от амперметра) и включите БГН.

При нулевом токе в катушке установите как можно точнее нулевое показание вольтметра на выходе тесламетра ручкой установки нуля (обычно удаётся получить $U_{\text{вых}} < 20 \text{ мВ}$).

Замкните цепь питания катушки и установите максимально допустимый ток 0,2 А регулятором напряжения источника. При меньшем токе погрешность измерения магнитной индукции возрастает из-за слишком слабого магнитного поля.



Перемещая зонд с датчиком Холла вдоль оси катушки с шагом 5 мм, запишите координаты и соответствующие им значения магнитной индукции в табл. 2.1. Координату $x = 0$ удобно принять в центре катушки. Значение магнитной индукции $B \text{ [мТл]} = 10U_{\text{вых}} \text{ [В]}$. В ходе эксперимента время от времени отключайте питание катушки и корректируйте установку нуля тесламетра.

Постройте график изменения магнитной индукции вдоль оси катушки $B(x)$. Предварительно выберите удобные масштабы и нанесите шкалы по осям.

Вычислите магнитную индукцию в некоторых характерных точках (в точке симметрии, на краю катушки и т. п.) по формуле для однослойной цилиндрической катушки, приведенной в разделе «Общие сведения».

Нанесите расчётные точки на экспериментальном графике, либо сделайте расчёт всего графика на компьютере, используя, например, программу MathCAD. Тогда удобнее экспериментальные точки нанести на расчётном графике. MathCAD- программа с результатами расчёта и эксперимента приведена в приложении 2.

Таблица

х, мм	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15	20	25
U, В											
B, мТл											

Порядок выполнения работы: установите миниблок «Кольцевые катушки» на наборную панель (рис. 2.4). Если Вы исследуете поле двух катушек, то соедините катушки между собой согласно или встречно и установите поводком заданное расстояние между катушками. Подведите к катушкам питание от регулируемого источника постоянного напряжения 0...15 В БГН через амперметр.

Установите на наборную панель миниблок для измерения магнитной индукции («Тесламетр») и подведите к нему питание +15 В, соединив два нерегулируемых источника постоянного напряжения БГН последовательно.

Разомкните цепь питания катушек (выньте из гнезда наборной панели штырёк провода от амперметра) и включите блок генераторов.

При разомкнутой цепи питания катушек установите как можно точнее нулевое показание вольтметра на выходе тесламетра ручкой установки нуля (обычно удаётся получить $U_{\text{вых}} < 20 \text{ мВ}$).

Замкните цепь питания катушек и установите максимально допустимый ток 0,2 А регулятором напряжения источника. При меньшем токе погрешность измерения магнитной индукции возрастает из-за слишком слабого магнитного поля.

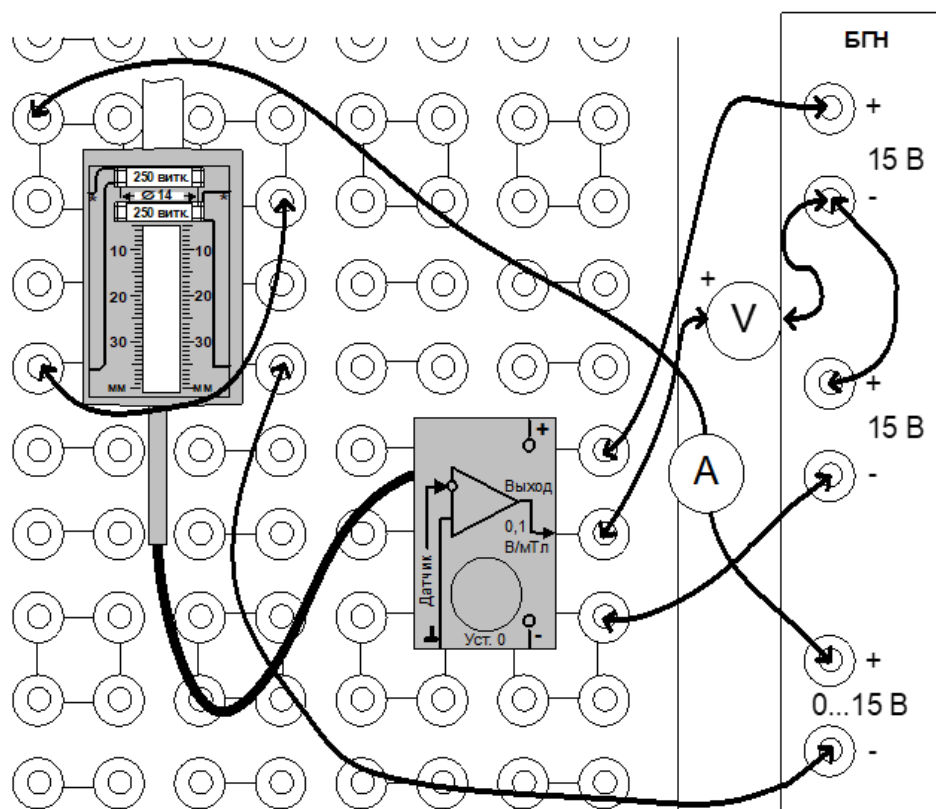
Перемещая зонд с датчиком Холла вдоль оси катушек с шагом 2,5 мм, запишите координаты и соответствующие им значения магнитной индукции в табл. 2.3.1. Координату $x = 0$ удобно принять в центре неподвижной кольцевой катушки. Значение магнитной индукции $B \text{ [мТл]} = 10U_{\text{вых}} \text{ [В]}$. В ходе эксперимента время от времени отключайте питание катушки и корректируйте установку нуля тесламетра.

Постройте график изменения магнитной индукции вдоль оси катушек $B(x)$. Предварительно выберите удобные масштабы и нанесите шкалы по осям.

Вычислите магнитную индукцию в некоторых характерных точках (в точке симметрии, в центре одной из катушек и т. п.) по формуле для тонкой кольцевой катушки, приведённой в разделе «Краткие сведения из теории».

Нанесите расчётные точки на экспериментальном графике либо сделайте расчёт всего графика на компьютере, используя, например, программу MathCAD. Тогда удобнее экспериментальные точки нанести на расчётном графике. MathCAD- программа с результатами расчёта и эксперимента приведена в приложении 3.

х, мм	-10	-7,5	-5	-2,5	0	2,5	5	7,5	10	12,5	15
U, В											
B, мТл											



Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

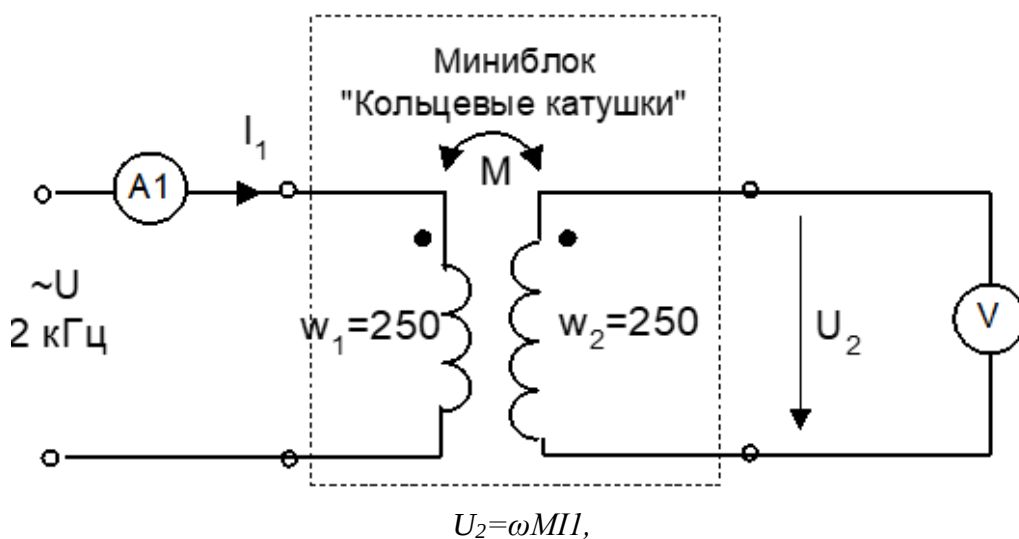
1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Лабораторная работа №19. Магнитное поле постоянного тока. Исследование взаимной индуктивности кольцевых катушек.

Цель работы: Определение опытным и расчётным путем зависимости взаимной индуктивности двух соосных одинаковых катушек от расстояния между ними.

Основы теории:

Опытным путём взаимная индуктивность двух катушек определяется из опыта, принципиальная схема которого изображена на рис. 3.1. Напряжение, индуцируемое во второй катушке изменением тока в первой:



где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота переменного тока

Отсюда:

$$M = U_2 / \omega I_1.$$

Расчетным путем взаимную индуктивность 2х катушек, изображенных на рисунке 3.2 определяем по формуле

$$M = k \cdot l = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot 8,497 \omega^2 k d,$$

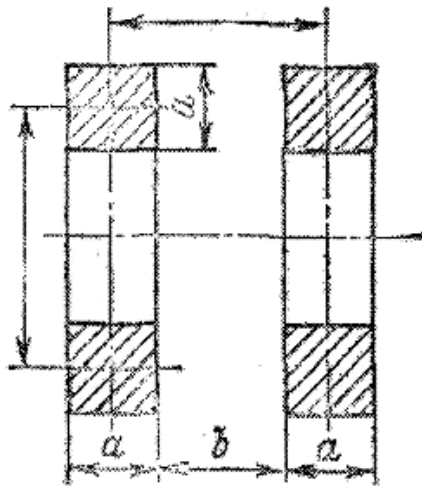
где: k – коэффициент связности катушек

l – индуктивность одной из катушек;

ω – число витков одной из катушек

d – средний диаметр катушек

значения коэффициента связи k в зависимости от отношения b/a или обратного отношения a/b даны в таблице Приложение 4.



Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Установите на наборную панель миниблок «Кольцевые катушки» и сделайте все необходимые соединения согласно принципиальной схеме опыта (рис. 3.1)

Установите на генераторе напряжений специальной формы БГН синусоидальное напряжение частотой 2...3 кГц и задайте регулятором амплитуды ток в катушке 150...200 мА. Запишите эти значения и определите круговую частоту:

$I = \dots\dots\dots \text{А}, \quad f = \dots\dots\dots \text{Гц}, \quad \omega = \dots\dots\dots \text{рад/с}.$

Изменяя расстояние между катушками b от минимально возможного 5 мм до 25 мм с шагом 5 мм, запишите в табл. 3.1 значения напряжения взаимной индукции

Опытные данные				
$b, \text{мм}$	$U_2, \text{В}$	$M, \text{мГн}$	k	M
5				
10				
15				
20				
25				

По формуле, приведённой в разделе «Краткие сведения из теории», вычислите опытные значения взаимной индукции и постройте график $M = f(b)$.

По расчётным формулам, приведённым также в разделе «Краткие сведения из теории», рассчитайте зависимость $M(b)$, занесите результаты в табл. 3.1 и постройте расчётный график (для сравнения с опытным).

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Лабораторная работа №20. Магнитное поле постоянного тока. Измерение магнитодвижущих сил и разности магнитных потенциалов.

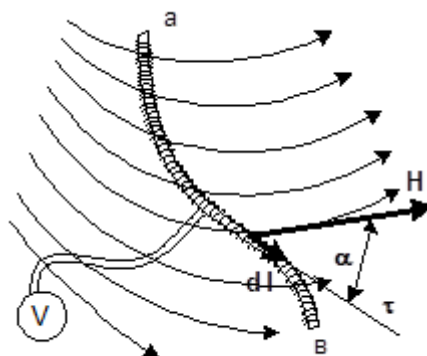
Цель работы: Проверка закона полного тока

Основы теории:

Разностью магнитных потенциалов или магнитным напряжением вдоль некоторого пути «а-в» в магнитном поле (рис. 4.1) называется величина

$$F_{ав} = \int_a^b \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_a^b H \cdot dl \cdot \cos \alpha$$

В области вне электрических токов, магнитное напряжение не зависит от пути интегрирования, а определяется положением конечных точек этого пути.



Магнитное напряжение вдоль замкнутого контура согласно закону полного тока равно полному току $i\omega$, охватываемому этим контуром:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i\omega$$

Замкнутый контур может быть разбит на участки, тогда для него: $F = i\omega$ или, если участки однородные, то $Hl = i\omega$.

Как для измерения магнитодвижущих сил в замкнутом контуре, так и для измерения магнитных напряжений вдоль любого отрезка применяют гибкую ленту из изолирующего материала, равномерно обмотанную изолированным проводом по всей длине, коротко - магнитный пояс или пояс Роговского (рис. 4.1). Поперечное сечение пояса (S) одинаково по всей длине и достаточно мало. Тогда, магнитный поток, сцеплённый с одним витком пояса:

$$\Phi = S\mu_0 H_0 \cos \alpha$$

где α – угол между направлением магнитной силовой линии и продольной осью пояса в данной точке.

На единицу длины пояса приходится w_0 витков, поэтому полное потокосцепление пояса:

$$\Psi = \int_a^B \Phi w_0 dl = \int_a^B S \mu_0 H w_0 \cos \alpha dl = \mu_0 S w_0 F_{ав}.$$

Отсюда:

$$F_{ав} = \frac{1}{\mu_0 S w_0} \Psi = K \cdot \Psi.$$

Постоянная пояса K зависит только от его сечения и числа витков на единицу длины.

Потокосцепление Ψ можно измерить тем или иным способом. В случае постоянного магнитного поля обычно измеряют заряд, протекающий через обмотку пояса при включении или выключении тока, создающего поле. Этот заряд пропорционален установившемуся значению потокосцепления. При синусоидальном токе измеряют непосредственно напряжение индуктируемое переменным магнитным потоком в обмотке пояса. Действующее значение этого напряжения:

$$U = 4,44 f U_m, \text{ откуда } U_m = U / 4,44 f,$$

где U_m – амплитуда потокосцепления.

Отсюда имеем формулу для вычисления амплитуды магнитного напряжения:

$$F_m = \frac{K}{4,44 f} U = K' U, \text{ где } K' = \frac{K}{4,44 f} = \frac{1}{4,44 \mu_0 S w_0 f}.$$

При известной постоянной K или K' , магнитный пояс можно использовать для измерения магнитных напряжений на участках магнитной цепи, магнитодвижущих сил, больших токов без разрыва цепи, определения числа витков катушек.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Порядок выполнения работы: рассчитайте постоянную пояса при частоте синусоидального тока 1000 Гц, (значения w_0 и S указаны на поясе):

$$K' = \frac{1}{4,44 \mu_0 S w_0 f}, \text{ А/В.}$$

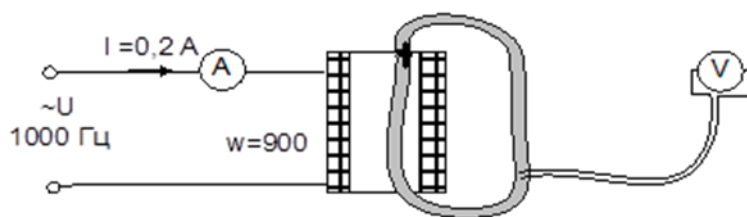
Установите катушку $w = 900$ витков на наборную панель, соберите цепь по схеме рис. 4.2, подайте напряжение частотой 1000 Гц, установите максимально возможный ток в катушке и определите постоянную по формуле из закона полного тока:

$$K' = \frac{\sqrt{2} I w}{U}, \text{ A/B.}$$

Сравните полученную величину с расчётным значением.

Замените катушку на такую же с другим числом витков (например, 300 витков), измерьте магнитное напряжение по замкнутому контуру и определите число витков:

$$w = \frac{K' U}{\sqrt{2} I}.$$



Сравните полученную величину с паспортным значением, указанным на катушке.

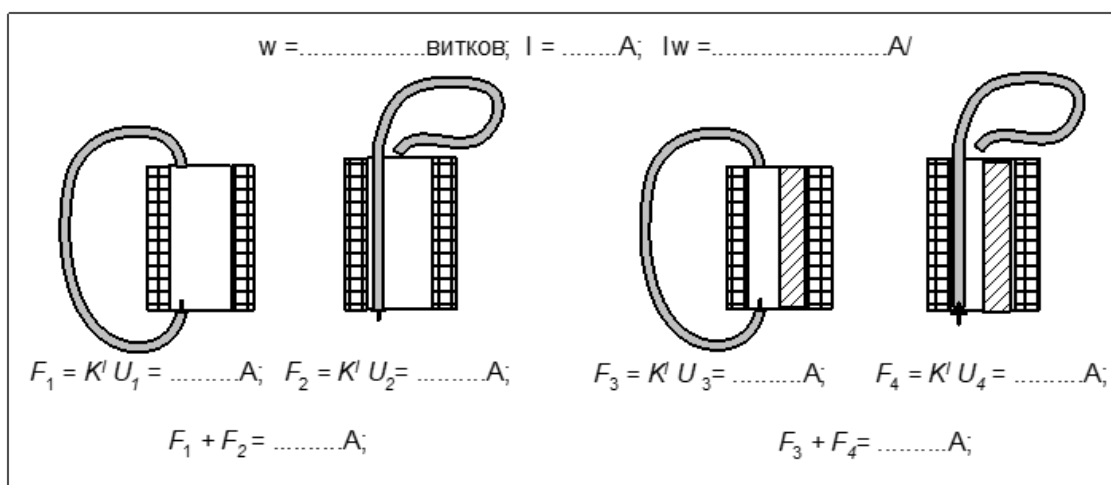
Соедините две любые катушки последовательно согласно, установите в них ток 0,2 А, охватите обе катушки магнитным поясом, измерьте сумму магнитных напряжений вдоль замкнутого контура и проверьте выполнение закона полного тока. Результат проверки:

В общем виде:

В цифровом выражении:

$$K' U = \sqrt{2} I (w_1 + w_2).$$

Повторите опыт при встречном включении катушек и также сделайте проверку.



Оставив в цепи одну катушку 900 витков, выясните изменение магнитных напряжений сил на отдельных участках замкнутого контура при внесении в катушку ферромагнитного сердечника (рис. 4.3). Ток во всех опытах поддерживайте неизменным. Скопируйте рис. 4.3 в отчёт, укажите на нём результаты измерений и сделайте расчёты для проверки закона полного тока закону полного тока.

Объясните полученные результаты (увеличение или уменьшение магнитных напряжений на отдельных участках при внесении сердечника, есть ли изменение магнитодвижущей силы по замкнутому контуру и почему?)

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Лабораторная работа №21. Распространение электромагнитных волн в однородном и изотропном диэлектрике и в полупроводящих и гиротропных средах. Исследование поляризационной кривой сегнетоэлектрика.

Цель работы: Экспериментальное получение на экране осцилографа кулон-вольт-вой характеристики нелинейного конденсатора и расчет поляризационной характеристики диэлектрика

Основы теории:

Поляризация диэлектриков - это смещение зарядов внутри его атомов и молекул под действием внешнего электрического поля, а вектор поляризованности P равен количеству заряда, прошедшего в результате поляризации через единицу поверхности, перпендикулярной к направлению смещения.

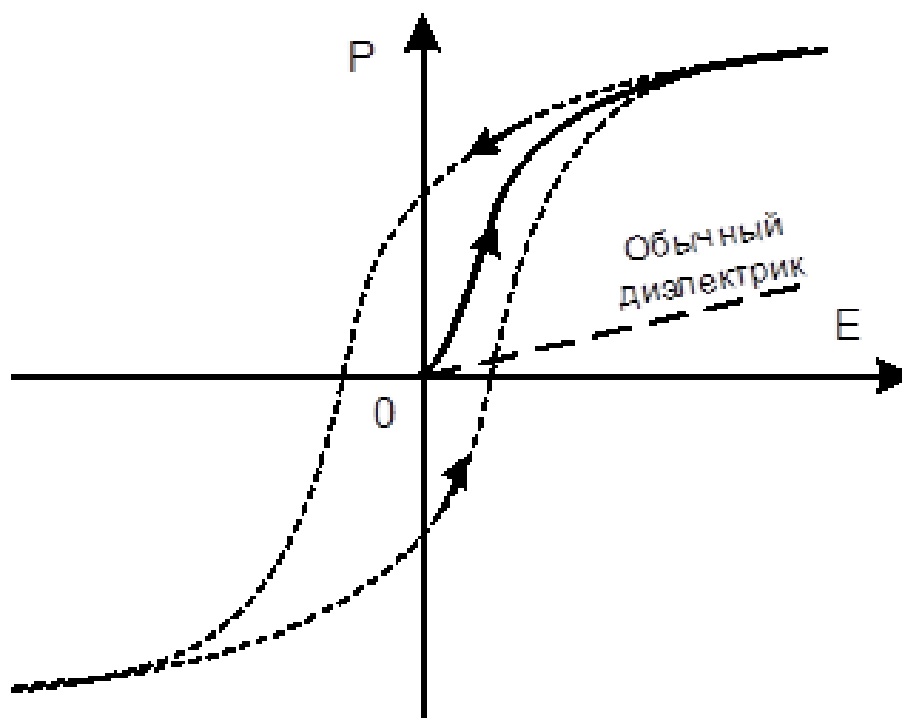
В обычных диэлектриках вектор поляризованности P и вектор электрическое смещения (вектор электростатической индукции) D пропорциональны напряжённости электрического поля E :

$$D = \epsilon_0 E + \xi E = (\epsilon_0 + \xi) E = \epsilon_a E,$$

где: ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость пустоты;

ξ - абсолютная диэлектрическая восприимчивость;

$\epsilon_a = \epsilon_0 + \xi$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость диэлектрика.



Сегнетоэлектрики - это группа диэлектриков, у которых в некотором интервале температур наблюдается самопроизвольная (спонтанная) поляризованность. В отсутствие внешнего поля векторы спонтанной поляризованности отдельных ячеек вещества (доменов) направлены хаотично и суммарная поляризованность равна нулю. При наложении внешнего поля наряду с обычной поляризацией происходит ориентация поляризованных доменов вдоль линий внешнего поля и суммарная поляризованность возрастает очень быстро. Зависимость $P(E)$, в отличие от обычных диэлектриков, становится нелинейной (рис. 5.1). При некотором значении напряжённости поля этот процесс завершается и при дальнейшем увеличении поля поляризованность возрастает как в обычном диэлектрике. Это область насыщения сегнетоэлектрика. При уменьшении поля и дальнейшем изменении его направления кривая зависимости $P(E)$ не совпадает с первоначальной и идёт несколько выше, а при циклическом изменении напряжённости образует замкнутую кривую, которая называется петлёй гистерезиса сегнетоэлектрика. Ширина петли и, следовательно, потери на поляризацию у различных сегнетоэлектриков существенно отличаются. Сегнетомягкие материалы, имеющие очень узкую петлю используются для изготовления малогабаритных конденсаторов большой ёмкости.

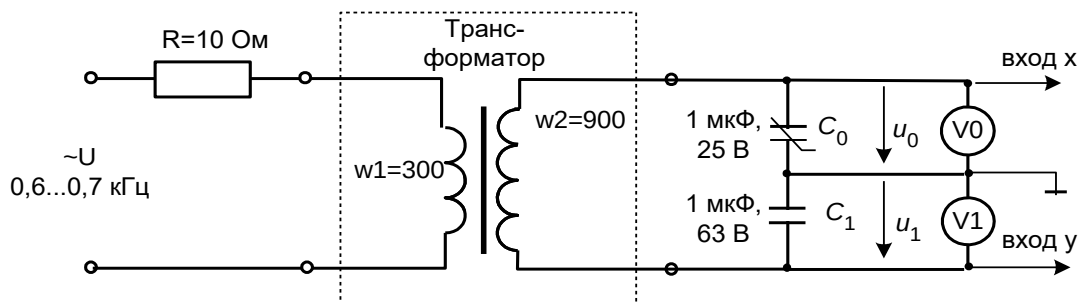
Если у обычных диэлектриков абсолютная диэлектрическая проницаемость $\epsilon_a = (1 \dots 4) \epsilon_0$, то у сегнетоэлектриков она может достигать $10^4 \epsilon_0$.

В данной работе исследуется малогабаритный конденсатор, диэлектриком в котором служит сегнетомягкий материал. Для экспериментального получения зависимости $P(E)$ используется тот факт, что у сегнетоэлектриков $\epsilon_0 E \ll P$ и, следовательно $D \sim P$, т.е. зависимость $P(E)$ практически совпадает с $D(E)$. Последняя же подобна кулон-вольтовой характеристике $q(U)$, так как в конденсаторе, площадь пластин которого S и расстояние между ними d : $q = DS$ и $U = Ed$. Кулон-вольтовая характеристика конденсатора может быть получена на экране виртуального или электронного осциллографа.

Синусоидальное напряжение подаётся через повышающий трансформатор на цепь, состоящую из последовательно соединённых линейного конденсатора C_1 и нелинейного конденсатора с изоляцией из сегнетоэлектрика C_0 . Заряды на этих конденсаторах одинаковы и пропорциональны напряжению U_1 :

$$q = C_1 U_1.$$

Принципиальная схема опытной установки изображена на рис. 5.2



Напряжение U_1 подаётся на вертикальный вход электронного или виртуального осциллографа, а U_0 - на горизонтальный. На экране осциллографа появляется зависимость $q(U)$ для нелинейного конденсатора. По ней можно рассчитать поляризационную характеристику $P(E)$:

$$E = \frac{u_0}{d},$$

где d – толщина диэлектрика.

$$P = D - \varepsilon_0 E \cong \frac{C_1 u_1}{S},$$

где S – площадь обкладок конденсатора.

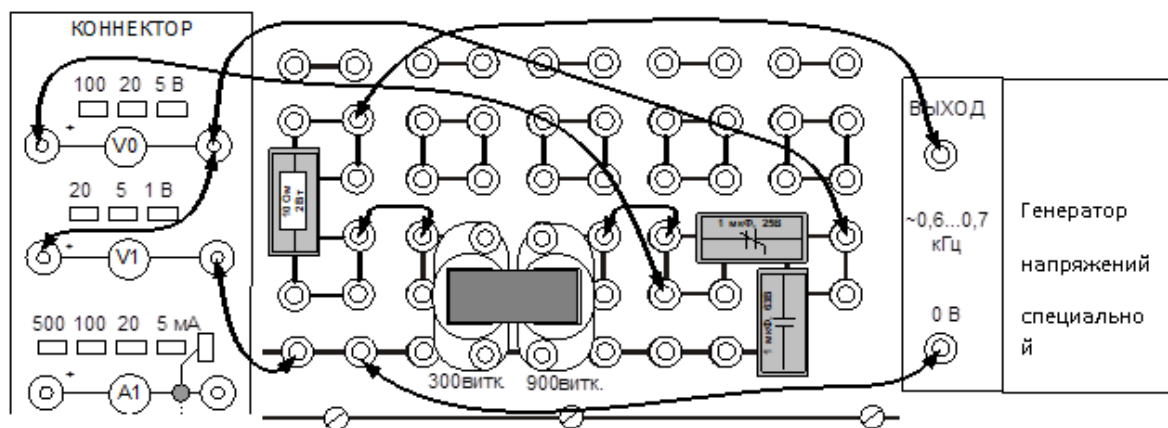
Добавочный резистор $R = 10 \text{ Ом}$ служит для ограничения постоянной составляющей тока, возникающего из-за наличия небольшой постоянной составляющей в выходном напряжении генератора.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите на наборном поле лабораторную установку согласно схеме опыта, изображенной на рис. 5.3 и установите пределы измерения вольтметра V_0 – 100 В, а вольтметра V_1 – 20 В.



Предупреждение: Амплитуда напряжения на нелинейном конденсаторе вследствие резонансных явлений на высших гармониках может достигать 100В. При использовании виртуальных приборов для уменьшения синфазного сигнала на входе коннектора и снижения помех не меняйте местами линейный и нелинейный конденсаторы и соблюдайте полярность подключения коннектора, указанную на схеме. При использовании электронного осциллографа следите за правильным подключением общей точки горизонтального и вертикального входов.

Включите компьютер и откройте блок виртуальных приборов «Приборы I». Активируйте в верхнем окне этого блока прибор V0, а в третьем сверху – V1 и установите род измеряемой величины – «Амплитуда».

Включите виртуальный осциллограф, «подключите» к его первому каналу сигнал V0, а к третьему – сигнал V1. Установите длительность развёртки 200 мкс/дел.

Включите блок генераторов напряжений, установите на генераторе напряжений специальной формы синусоидальный сигнал частотой 0,6...0,7 кГц максимальной амплитуды.

Убедитесь, что на виртуальном осциллографе появилось изображение примерно одного периода двух сигналов: кривая белого цвета соответствует изменению напряжения на нелинейном конденсаторе U_0 , кривая зелёного цвета – изменению напряжения на линейном конденсаторе U_1 . При необходимости сместите изображение по горизонтали, в центр экрана.

Включите режим X-Y осциллографа и убедитесь, что на экране появилось изображение кулон-вольтовой характеристики конденсатора. При этом на вход X нужно подать напряжение U_0 (канал 1), а на вход Y – напряжение U_1 (канал 3). Петля гистерезиса данного типа конденсаторов весьма узкая, на осциллографе она наблюдается как одна линия.

Зафиксируйте масштабы осциллографа нажатием кнопок 1 и 3 на блоках входов. При этом кнопки приобретают красный цвет, и в дальнейшем масштабы автоматически изменяться не будут.

Уменьшите синусоидальное напряжение до нуля и, увеличивая его шаг за шагом до максимально возможного напряжения генератора, записывайте в табл. 5.1 амплитуды напряжений на линейном конденсаторе – U_1 и на нелинейном – U_0 .

Рассчитайте поляризационную характеристику диэлектрика $P=f(E)$ и зависимость $\varepsilon=f(E)$. Выберите масштабы и соответствующие постройте графики.

U_0, B	U_1, B	$E, B/m$	$P, Кл/м^2$	$\varepsilon = \Delta P / \varepsilon_0 \Delta E$	$E_{пд}, \hat{A}/\hat{i}$
0					
10					
20					
30					
40					
50					
60					
70					

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Лабораторная работа №22. Запаздывающие потенциалы переменного электромагнитного поля и излучение электромагнитной энергии. Исследование электромагнитных сил в постоянном магнитном поле.

Цель работы: Определение опытным и расчетным путем зависимости электромагнитной силы от тока в катушке.

Основы теории:

В данной работе измеряется сила притяжения двух подковообразных частей разъемного сердечника трансформатора, когда по его обмоткам, включённым последовательно согласно, протекает постоянный ток.

Эта сила может быть определена по плотности энергии магнитного поля в зазоре между сердечниками:

$$F_{\text{расч}} = 2 \left(S \frac{\mu_0 H^2}{2} \right) = S \mu_0 \left(\frac{wI}{2\delta} \right)^2,$$

где: $F_{\text{расч}}$ – расчётная сила в Ньютонах;

множитель 2 учитывает две силы, приложенные к двум концам подвижного сердечника;

$S = 16 \times 13 \cdot 10^{-6} = 208 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ - поперечное сечение сердечника;

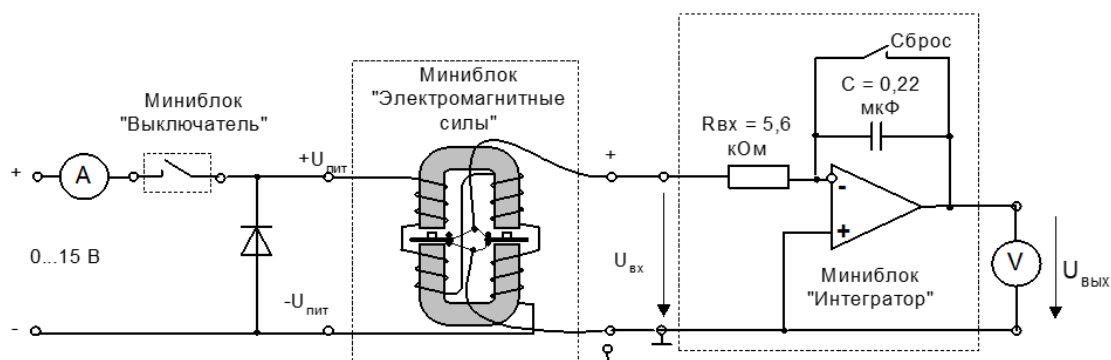
$\mu_0 = 12.56 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – магнитная проницаемость воздуха;

H – напряжённость магнитного поля в зазоре;

$w = 1800$ суммарное число витков двух катушек, соединённых последовательно;

I – ток в катушках;

2δ - двойной зазор между подковами сердечника (его величина указана на этикетке миниблока).



Принципиальная схема установки показана на рис. 7.1. При включении выключателя по катушкам трансформатора начинает протекать постоянный ток, и две половины разъёмного сердечника притягиваются друг к другу. При отключении цепи сила притяжения исчезает. Полупроводниковый диод в схеме служит для исключения перенапряжений в схеме при отключении катушки.

Для измерения силы в зазоры между двумя частями сердечника встроены датчики силы. Принцип действия датчика основан на пьезоэлектрическом эффекте. При воздействии силы на его выводах образуются противоположные заряды, пропорциональные силе. Для измерения этого заряда к выходу датчика подключен интегрирующий усилитель. Он интегрирует импульс тока во входной цепи интегратора в процессе изменения силы, воздействующей на датчик. Таким образом, напряжение на выходе интегратора пропорционально заряду на электродах датчика силы. Для установки нулевого напряжения на выходе интегратора служит выключатель «Сброс». После установки нуля переключатель нужно вернуть в исходное положение, и интегратор готов к работе.

Следует иметь в виду, что даже при отсутствии входного сигнала, напряжение на выходе интегратора медленно меняется вследствие дрейфа нуля и интегрирования различных утечек схемы. Поэтому установку нуля необходимо выполнять непосредственно перед каждым измерением, а отсчёт выходного напряжения необходимо выполнять в течение двух – трёх секунд сразу после интегрирования.

Для калибровки системы «датчик – интегратор» используется вес самого подвижного сердечника. Он указан на этикетке сердечника.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите установку как показано на рис. 7.2. Переключатель интегратора установите на «Сброс», выключатель на входе цепи выключите (положение «вверх»).

Включите блок генераторов напряжений (БГН), убедитесь, что на выходе интегратора напряжение близко к нулю (< 10 мВ).

Установите предел измерения вольтметра – 2 В постоянного напряжения, переведите переключатель интегратора в нижнее положение и тотчас же выньте верхнюю половину сердечника из катушек. Сразу после этого сделайте отсчёт напряжения на выходе интегратора.

Переключите интегратор в положение «Сброс», убедитесь, что на его выходе установилось нулевое напряжение, верните переключатель в нижнее положение и тотчас же вставьте сердечник в катушки, не нажимая на него и не бросая с большой высоты. Снова сделайте отсчёт выходного напряжения. Оно не должно сильно отличаться от напряжения в предыдущем опыте, но знак напряжения меняется на противоположный.

Для калибровки системы «датчик – интегратор» проделайте предыдущие два опыта 5 раз, записывая результаты отсчёта напряжения в таблицу 7.1. без учёта знака.

$U_{\text{вых}}, \text{ В при снятии сердечника}$					
$U_{\text{вых}}, \text{ В при установке сердечника}$					

Отбросьте сильно отличающиеся значения напряжения, а по остальным вычислите среднее значение и постоянную системы «датчик - интегратор»:

$$U_{\text{ср}} = \dots\dots\dots \text{г/В}, \quad \alpha = 100/U_{\text{п0}} = \dots\dots\dots \text{г/В}.$$

Включите выключатель на входе цепи и установите начальное значение тока в катушке 50 мА, проделайте «Сброс» интегратора, и тотчас выключите ток в катушке. Запомните или запишите показание вольтметра. Проделайте этот опыт несколько раз при включении и выключении тока и запишите в табл. 7.2 среднее или наиболее часто повторяющееся показание вольтметра без учёта знака.

Повторите этот опыт при других значениях тока, указанных в табл.7.2.

По опытным данным определите силу в граммах по формуле: $F_{\text{экс}} = \alpha U_{\text{вых}}$ и занесите результаты в табл.7.2.

Определите расчётную силу по формуле, приведённой в разделе «Краткие сведения из теории», переведите её в граммы и также занесите в табл. 7.2. Постройте графики $F_{\text{расч}}=f(I)$ и $F_{\text{экс}}=f(I)$, сравните их и сделайте выводы.

$I, \text{ мА}$	$U_{\text{вых}}, \text{ В}$	$F_{\text{экс}}, \text{ г}$	$F_{\text{расч}}, \text{ г}$
50			
100			
150			
200			

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

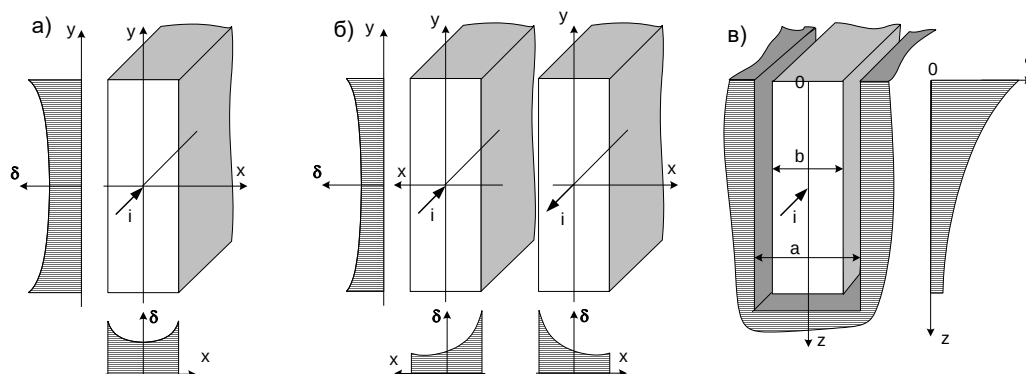
1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Лабораторная работа №23. Распространение плоской электромагнитной волны в однородном полупроводящем пространстве. Исследование поверхностного эффекта и эффекта близости.

Цель работы: Исследование распределения тока в массивных проводниках

Основы теории:

Переменный ток распределяется по сечению массивных проводников (шин) неравномерно вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости. Наибольшая плотность тока наблюдается на поверхности шины и уменьшается к центру поперечного сечения (рис.8.1.а). В двух близко расположенных шинах с противоположным направлением токов, кроме того, происходит вытеснение токов на поверхности шин обращённые друг к другу (рис.8.1б). При одинаковых направлениях токов в двух таких шинах вытеснение токов происходит на внешние поверхности.



В проводнике, уложенном в ферромагнитный паз ротора или статора электрической машины происходит вытеснение тока на открытую поверхность проводника (рис. 8.1в).

Неравномерное распределение тока по сечению проводников приводит к увеличению их активных сопротивлений, что необходимо учитывать при проектировании электрических машин и токопроводов.

Наиболее простым для математического описания является проводник, уложенный в ферромагнитный паз. При достаточной высоте паза можно пренебречь отражённой электромагнитной волной от его дна. Тогда распределение действующего значения плотности тока по высоте паза (вдоль оси z) может быть описано следующей формулой [1]:

$$\underline{\delta}(z) = \delta(0)e^{-kz}e^{j(45^\circ - kz)},$$

где: $k = \sqrt{\frac{b}{a} \frac{\omega \mu \gamma}{2}}$ - коэффициент затухания и коэффициент фазы;

$$\delta(0) = \frac{\sqrt{2}k}{b} I - \text{действующее значение плотности тока на открытой поверхности про-}$$

водника;

где: I – действующее значение тока в проводнике;

ω – круговая частота переменного тока;

μ и γ – магнитная проницаемость и проводимость проводника;

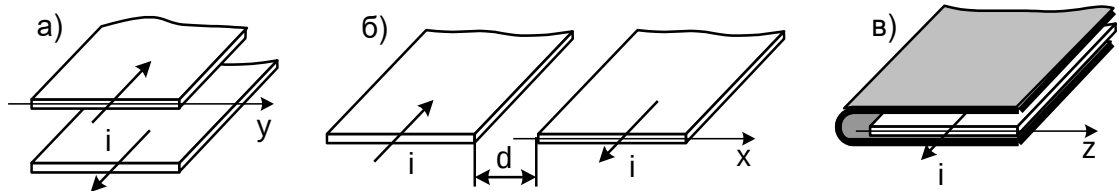
$a = 2$ мм – ширина паза;

$b = 0,35$ мм – толщина проводящей шины.

Согласно этим формулам, плотность тока уменьшается вдоль оси z по экспоненциальному закону (множитель e^{-kz}). Начальная фаза плотности тока на поверхности проводник равна 45° и с увеличением координаты z изменяется по фазе в сторону отставания ($\varphi = 45^\circ - kz$).

Глубина, на которой плотность тока в $e^1 = 2,718$ раз меньше, чем на поверхности проводника, называется глубиной проникновения электромагнитной волны $h = 1/k$. Глубина проникновения уменьшается с увеличением частоты переменного тока, магнитной проницаемости и проводимости проводника.

В данной работе исследуется распределение тока в ленточных медных проводниках толщиной 0.35 мм и шириной 25 мм при их различном взаимном расположении (рис.8.2).



Первый вариант расположения проводников (см. рис. 8.2а) позволяет экспериментально исследовать распределение тока вдоль ширины (ось y) двух близко расположенных прямоугольных шин, показанных на рис. 8.1б.

Во втором случае (рис. 8.2б) опыт может быть выполнен при двух значениях расстояния между шинами: $d = 63$ мм и $d = 3$ мм.

При большом расстоянии между ленточными проводниками, распределение тока в них аналогично распределению тока в одном из горизонтальных слоёв прямоугольной шины, показанной на рис. 8.1а (вдоль оси x). Эффект близости сказывается здесь незначительно.

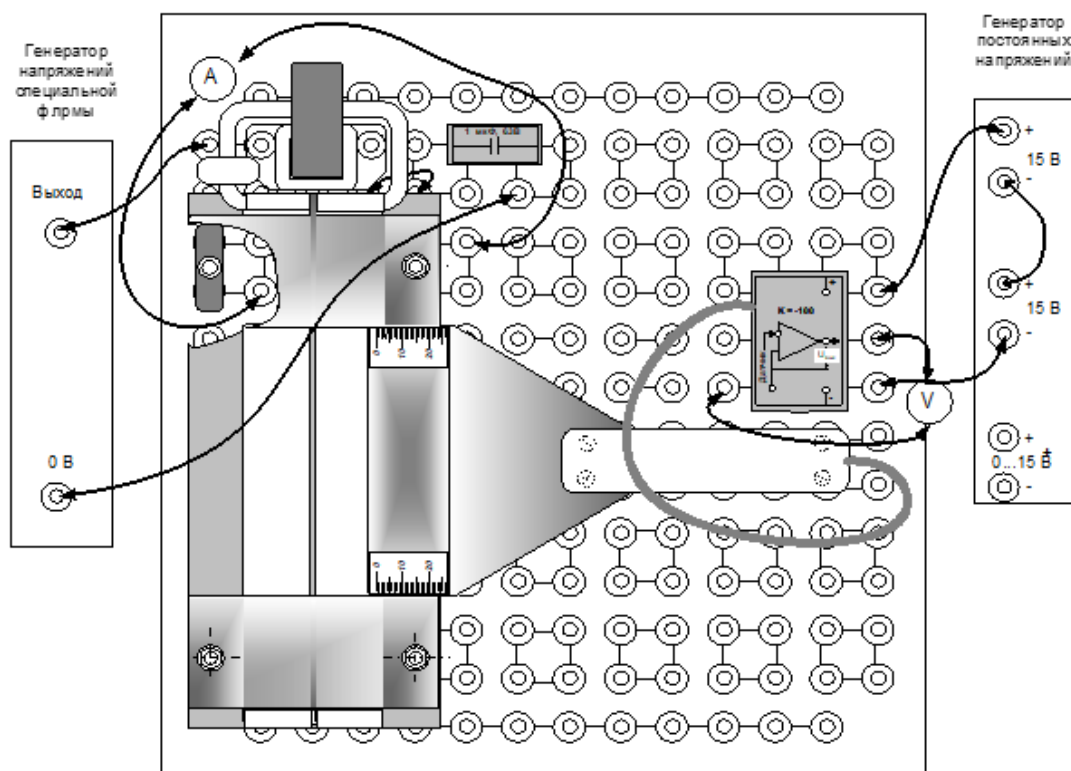
При малом расстоянии между ленточными проводниками их можно рассматривать как один из горизонтальных слоёв двух близко расположенных шин, показанных на рис. 8.1б. Вдоль горизонтальной оси (оси x) здесь сильно проявляется эффект близости.

В третьем случае (рис. 8.2в.) медная лента охвачена с трёх сторон ферромагнитным экраном и распределение тока в ней примерно такое же, как в проводнике, уложенном в паз электрической машины (рис.8.1.в).

Проводящие ленты для каждого из описанных четырёх вариантов смонтированы на стеклотекстолитовых платах и образуют замкнутые контуры. Электрический ток к ним подводится через понижающий трансформатор, вторичной обмоткой которого является сам контур из проводящих лент и соединительных шин (один виток).

Лабораторная установка с одним из вариантов проводящего контура схематично показана на рис. 8.3.

Для её сборки необходимо сначала установить в левой верхней части наборной панели катушку трансформатора 170 витков вместе с нижней U-образной частью разъемного сердечника, затем надеть на катушку один из исследуемых проводящих контуров и закрепить его над наборной панелью, пользуясь соединительными вилками со средним выводом, как подставками. Подставки необходимы для увеличения расстояния между исследуемыми проводниками и металлической поверхностью наборной панели. Иначе наводимые в ней вихревые токи существенно изменят распределение тока в исследуемых проводниках.



После этого нужно вставить в катушку вторую половинку разъемного сердечника и скрепить две половинки сердечника резиновым кольцом.

Для измерения падения напряжения вдоль нити тока в проводящей ленте служит датчик напряжения, также изображённый на рис. 8.3. Он представляет собой пластинку из

стеклотекстолита, в которую вмонтированы два миниатюрных контакта. Провода от контактов проходят вдоль нити тока в исследуемом проводнике до середины пластинки, затем они поворачивают на 90^0 и проходят вместе сквозь ручку к усилителю напряжения. При прижатии контактов к исследуемой поверхности, соединительные провода датчика оказываются расположенными почти вплотную к этой поверхности. В результате, магнитный поток, сцеплённый с контуром измерительной цепи, оказывается близким к нулю и на вход усилителя подводится активная составляющая напряжения, пропорциональная плотности тока:

$$U = El = \frac{\delta}{\gamma} l$$

где: U – напряжение между контактами датчика,

E – тангенциальная составляющая напряжённости электрического поля,

l – расстояние между контактами датчика, равное 0,1 м.

$\gamma = 55 \frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$ - удельная проводимость медного проводника.

Для измерения тока в исследуемых проводниках используется трансформатор тока с коэффициентом трансформации 100. Он имеет один первичный виток и расположен непосредственно на соединительной шине (рис. 8.3).

Указание по технике безопасности:

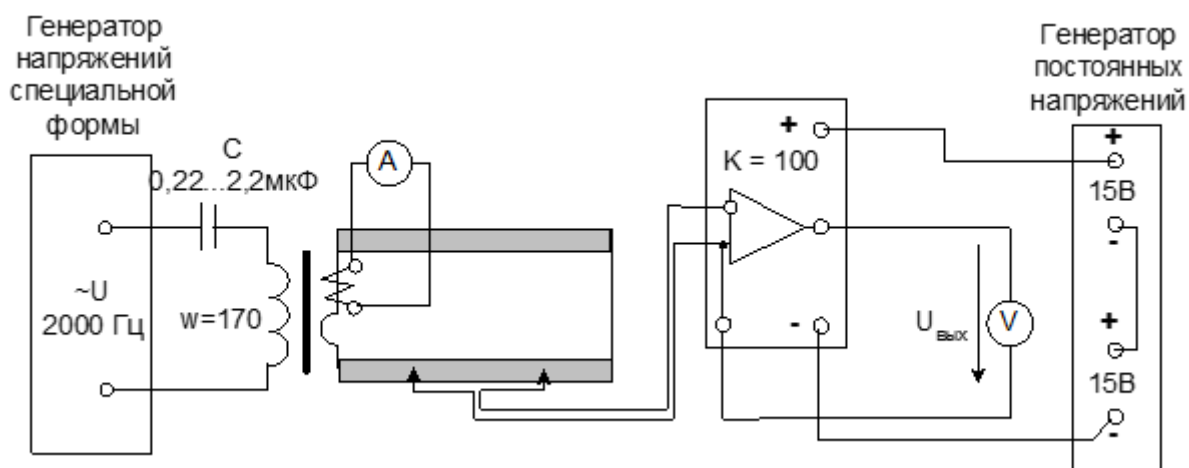
Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Соберите на наборной панели трансформатор с одним из проводящих контуров и установите на ней миниблок - усилитель датчика плотности тока (рис.8.3). Усилитель расположите в правой части наборной панели как можно дальше от исследуемого контура.

Соберите электрическую цепь согласно принципиальной схеме, изображённой на рис. 8.4. Амперметр и вольтметр, показанные на схеме – виртуальные приборы. Конденсатор служит для компенсации индуктивного сопротивления контура и увеличения тока в нём.

Примечание: Виртуальные приборы можно заменить мультиметрами, но тогда Вы не сможете измерять начальную фазу плотности тока. Начальную фазу в этом случае можно измерять электронным осциллографом с помощью фигуры Лиссажу.



Включите виртуальные приборы для измерения тока напряжения и сдвига фаз между ними.

Установите на источнике переменного тока синусоидальное напряжение частотой 2000...2500 Гц максимальной амплитуды и подберите ёмкость C , при которой ток в контуре наибольший. Для надёжных измерений он должен быть не меньше 25 А. Не забывайте, что ток в контуре в 100 раз больше, чем во вторичной обмотке трансформатора тока. При необходимости, можно увеличить ток подстройкой частоты приложенного напряжения ближе к резонансной. При этом следите за индикатором перегрузки источника.

Слегка прижимая датчик его контактами к поверхности ленточного проводника и перемещая его по ширине ленты, убедитесь, что изменяются выходное напряжение усилителя и разность фаз. Если прибор показывает разность фаз больше 90° , поменяйте местами зажимы амперметра на коннекторе или зажимы трансформатора тока.

Измерьте выходное напряжение и разность фаз, перемещая датчик от одного края ленты до другого с шагом 5 мм и запишите результаты в табл. 8.1. Координата x в таблице соответствует расстоянию от края ленточного проводника до контактов датчика.

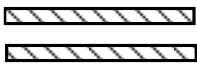
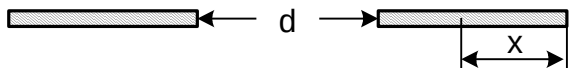
Рассчитайте плотность тока при каждом значении координаты. С учётом коэффициента усиления напряжения усилителя:

$$\delta = \frac{\gamma U_{\text{вых}}}{100l} .$$

Плотность тока получится в А/мм², если в этой формуле γ - в м/(Ом мм²), $U_{\text{вых}}$ – в Вольтах, и $l = 0,1$ м – расстояние между контактами датчика.

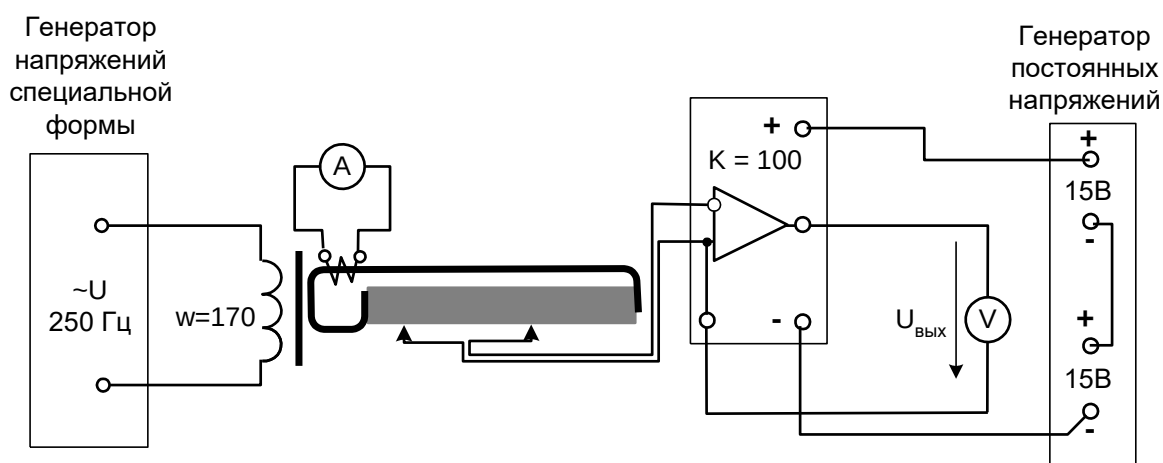
Замените установленный контур на другой, затем на третий и повторите все опыты и расчёты.

Постройте график изменения плотности тока и его начальной фазы для исследованных случаев.

Координатах мм									
				d = 63 мм			d = 3 мм		
	$U_{\text{ВЫХ}},$ В	$\varphi,$ град.	$\delta,$ А/мм ²	$U_{\text{ВЫХ}},$ В	$\varphi,$ град.	$\delta,$ А/мм ²	$U_{\text{ВЫХ}},$ В	$\varphi,$ град.	$\delta \square,$ А/мм ²
0									
5									
10									
15									
20									
25									

соберите на наборной панели трансформатор с моделью паза электрической машины.

Соберите электрическую цепь согласно схеме, изображённой на рис. 8.5. Усилитель расположите в правой части наборной панели как можно дальше от исследуемого контура. Амперметр и вольтметр, показанные на схеме – виртуальные приборы.



Примечание: Виртуальные приборы можно заменить мультиметрами, но тогда Вы не сможете измерять начальную фазу плотности тока. Начальную фазу в этом случае можно измерять электронным осциллографом с помощью фигуры Лиссажу.

Включите виртуальные приборы для измерения тока, напряжения и сдвига фаз между ними.

Установите на источнике переменного тока синусоидальное напряжение частотой 250 Гц максимальной амплитуды

Слегка прижимая датчик его контактами к поверхности ленточного проводника и вводя его внутрь «паза», убедитесь, что изменяются выходное напряжение усилителя и разность фаз. Если прибор показывает разность фаз больше 90° , поменяйте местами зажимы амперметра на коннекторе или зажимы трансформатора тока.

Измерьте выходное напряжение и разность фаз, перемещая датчик от открытого края «паза» до максимальной глубины с шагом 5 мм и запишите результаты в табл. 8.2. Координата z в таблице соответствует расстоянию от открытой стороны паза до контактов датчика.

Рассчитайте плотность тока при каждом значении координаты. С учётом коэффициента усиления напряжения усилителя:

$$\delta = \frac{\gamma U_{\text{вых}}}{100I}$$

Плотность тока получится в А/мм², если в этой формуле γ - в м/(Ом мм²), $U_{\text{вых}}$ - в вольтах, и $l = 0,1$ м - расстояние между контактами датчика.

Замените установленный контур на другой контур, затем на третий и повторите все опыты и расчёты.

Постройте график изменения плотности тока и его начальной фазы для исследованных случаев.

Приняв $a = 2$ мм. $b = 0,35$ мм и $\gamma = 55 \frac{\text{м}}{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}$, вычислите:

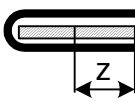
$$k = \sqrt{\frac{b}{a} \frac{\omega \mu \gamma}{2}}, \text{ 1/мм - коэффициент затухания и коэффициент фазы;}$$

$$\delta(0) = \frac{\sqrt{2}k}{b} I, \text{ А/мм}^2 \text{ - действующее значение плотности тока на открытой поверхности проводника;}$$

Поделайте расчёт изменения плотности тока и его начальной фазы от координаты по формулам:

$$\underline{\delta}(z) = \delta(0)e^{-kz} \quad \text{и} \quad \varphi = 45^\circ - kz \frac{180}{\pi}$$

Результаты запишите в ту же табл. 8.2, постройте расчётные графики для сравнения с экспериментальными.

	Экспериментальные данные: f = ...Гц; I = ...А			Расчётные данные: k = ...1/мм; δ = ...А/мм².		
z, мм	U _{вых} , В	φ, град.	δ□, А/мм2	kz, 1/мм	δ, А/мм2	φ, град.
0						
5						
10						
15						
20						

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

5.1.2 Перечень основной литературы:

1. Теоретические основы электротехники : учебник / И. Я. Лизан, К. Н. Маренич, И. В. Ковалева [и др.]. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. — 628 с. — ISBN 978-5-9729-0663-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/114971.html>

2. Зонов, В. Н. Теоретические основы электротехники. Электрические и магнитные цепи постоянного тока : учебное пособие / В. Н. Зонов, П. В. Зонов, Ю. Б. Ефимова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 80 с. — ISBN 978-5-7782-4090-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98742.html>

3. Петренко, Ю. В. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи с распределенными параметрами : учебное пособие / Ю. В. Петренко. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2019. — 64 с. — ISBN 978-5-7782-3876-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99223.html>

5.1.3 Перечень дополнительной литературы:

1. Горбунова Л.Н. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] / Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева. — Электрон. текстовые данные. — Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2015. — 117 с. — 978-5-9642-0269-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55913.html>

2. Крутов А.В. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 376 с. — 978-985-503-580-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67742.html>

5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

3. Методические указания по выполнению расчетно-графических работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

4. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

Указание по технике безопасности

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того, как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан, не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

13. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование, или приборы с других рабочих мест
- без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия, подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни.

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

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование практических работ	
4.	Содержание практических работ	
4.1	Практическая работа №1. Основные понятия и определения. Основные законы электротехники. Расчет электрической цепи с одним источником ЭДС смещанном соединениях резисторов	
4.2	Практическая работа №2 Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Расчет сложной электрической цепи методом узловых и контурных уравнений.	
4.3.	Практическая работа №3. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Расчет сложной электрической цепи методом контурных токов.	
4.4	Практическая работа №4. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Расчет сложной электрической цепи методом узловых потенциалов.	
4.5	Практическая работа №5. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Применение метода наложения для расчета электрических цепей постоянного тока.	
4.6	Практическая работа №6. Преобразование электрических цепей. Применение метода эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений.	
4.7	Практическая работа №7. Магнитные цепи. Расчет неразветвленных магнитных цепей.	
4.8	Практическая работа №8. Расчёт электрических цепей переменного тока. Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока.	
4.9	Практическая работа №9. Расчёт электрических цепей переменного тока. Расчет однофазных цепей синусоидального тока.	
4.10	Практическая работа №10. Трёхфазные цепи. Расчет симметричных трехфазных цепей.	

- 4.11 Практическая работа №11. Трёхфазные цепи. Расчет несимметричных трехфазных цепей.
- 4.12 Практическая работа №12. Симметричные составляющие несимметричной трехфазной системы. Расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих.
- 4.13 Практическая работа №13. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Расчет и анализ линейных при периодических несинусоидальных напряжениях и токах.
- 4.14 Практическая работа №14. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Расчет и анализ однофазных цепей несинусоидального тока.
- 4.15 Практическая работа №15. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Расчет и анализ трехфазных цепей несинусоидального тока.
- 4.16 Практическая работа №16. Классический метод расчета переходных процессов. Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами классическим методом.
- 4.17 Практическая работа №17. Операторный метод расчёта переходных процессов. Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом.
- 4.18 Практическая работа №18. Операторный метод расчёта переходных процессов. Расчет переходных процессов в нелинейных электрических цепях.
- 4.19 Практическая работа №19. Решение дифференциальных уравнений для однородной линии с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном токе. Расчет электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме.
- 4.20 Практическая работа №20. Решение дифференциальных уравнений для однородной линии с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном токе. Расчет переходных процессов в длинных линиях.
- 4.21 Практическая работа №21. Электростатическое поле. Электростатическое поле.
- 4.22 Практическая работа №22. Электростатическое поле. Электрическое поле в проводящих средах.

- 4.23 Практическая работа №23. Магнитное поле постоянного тока. Магнитное поле.
- 4.24 Практическая работа №24. Переменное электромагнитное поле в однородном и изотропной проводящей среде. Переменное электромагнитное поле.
- 5 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
 - 5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
 - 5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
 - 5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины
- Приложение

Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины. Практические занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Целью дисциплины «Теоретические основы электротехники» является изучение студентами основных закономерностей процессов, протекающих в электротехнических цепях и методов определения электрических величин, характеризующие эти процессы, приобретение теоретических и практических знаний по теоретическим основам электротехники, необходимых для успешного освоения последующих дисциплин специальности.

Задачи дисциплины состоят в освоении студентами:

- принципов составления и записи уравнений, описывающих процессы в цепи в соответствии с законами Кирхгофа, Ома, Фарадея - Максвелла - Ленца;
- основных принципов анализа процессов по линейным схемам замещения цепей: наложения, линейности, компенсации, взаимности;
- основных методов анализа линейных схем (методы контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного источника) и получении начальных сведений о возможности использования ЭВМ при расчетах;
- комплексного метода определения амплитуд и начальных фаз гармонических токов и напряжений в установившихся режимах;
- классического, операторного и интегрального метода анализа переходных процессов по линейным схемам замещения цепей, а также принципов составления уравнений и подготовки информации для расчета переходных процессов на ЭВМ методом переменных состояний;
- методов расчета электромагнитных процессов во взаимосвязанных контурах;
- основ теории четырехполюсников;
- методов построения фильтров и их расчета в электротехнических и электронных схемах;
- основ анализа процессов в цепях с распределенными параметрами;
- основ теории поля;
- методов электрических измерений с использованием измерительных приборов;
- основных процессов, протекающих в электрических цепях с негармоническими токами.

2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

3. Наименование практических работ

Для заочной формы обучения предусмотрены следующие практические работы: Практическая работа №2 Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Расчет сложной электрической цепи методом узловых и контурных уравнений – 2 часа, практическая подготовка – 2 часа; Практическая работа №9. Расчёт электрических цепей переменного тока. Расчет однофазных цепей синусоидального тока – 2 часа; Практическая работа №10. Трёхфазные цепи. Расчет симметричных трехфазных цепей – 2 часа, практическая подготовка – 2 часа; Практическая работа №12. Симметричные составляющие несимметричной трехфазной системы. Расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих – 2 часа; Практическая работа №19. Решение дифференциальных уравнений для однородной линии с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном токе. Расчет электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме – 2 часа; Практическая работа №21. Электростатическое поле. Электростатическое поле – 2 часа.

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
3 семестр			
1	Практическая работа №1. Основные понятия и определения. Основные законы электротехники. Расчет электрической цепи с одним источником ЭДС смешанном соединениях резисторов Определить эквивалентное сопротивление цепи со смешанным соединением.	4	
2	Практическая работа №2 Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Расчет сложной электрической цепи методом узловых и контурных уравнений. Определение токов ветвей с использованием законов Кирхгофа.	4	2
3	Практическая работа №3. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Расчет сложной электрической цепи методом контурных токов. Определение токов ветвей по методу контурных токов.	4	

4	Практическая работа №4. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Расчет сложной электрической цепи методом узловых потенциалов. Определение токов ветвей по методу узловых потенциалов.	4	
5	Практическая работа №5. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Применение метода наложения для расчета электрических цепей постоянного тока. Научиться с помощью метода наложения рассчитывать сложные электрические цепи с несколькими источниками ЭДС.	4	
6	Практическая работа №6. Преобразование электрических цепей. Применение метода эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений. Научиться с помощью метода эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений рассчитывать электрические цепи с одним источником питания, применяемые в области электрических измерений.	4	
7	Практическая работа №7. Магнитные цепи. Расчет неразветвленных магнитных цепей. Получить практические навыки расчета неразветвленных магнитных цепей.	4	2
8	Практическая работа №8. Расчёт электрических цепей переменного тока. Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока. Получить навыки перевода синусоидальных величин в комплексные, научиться строить векторные диаграммы.	4	2
9	Практическая работа №9. Расчёт электрических цепей переменного тока. Расчет однофазных цепей синусоидального тока. Получить навыки расчета разветвленных однофазных цепей синусоидального тока различными методами как в обычных режимах, так и в режиме резонанса, научиться сопровождать расчеты векторными и топографическими диаграммами.	4	
Итого за 3 семестр:		36	6
4 семестр			
10	Практическая работа №10. Трёхфазные цепи. Расчет симметричных трехфазных цепей. Получить навыки расчета трехфазных цепей синусоидального тока при симметричной нагрузке.	4	2
11	Практическая работа №11. Трёхфазные цепи. Расчет несимметричных трехфазных цепей.	4	

	Получить навыки расчета трехфазных цепей синусоидального тока при несимметричной нагрузке.		
12	Практическая работа №12. Симметричные составляющие несимметричной трехфазной системы. Расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих. Освоить навыки применения расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих	4	2
13	Практическая работа №13. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Расчет и анализ линейных при периодических несинусоидальных напряжениях и токах. Приобрести практические навыки разложения периодической функции в ряд Фурье.	4	
14	Практическая работа №14. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Расчет и анализ однофазных цепей несинусоидального тока. Освоить расчет и анализ однофазных цепей несинусоидального тока.	4	
15	Практическая работа №15. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Расчет и анализ трехфазных цепей несинусоидального тока. Освоить навыки расчет трехфазных цепей несинусоидального тока.	4	
16	Практическая работа №16. Классический метод расчета переходных процессов. Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами классическим методом. Приобрести практические навыки расчета переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами классическим методом.	4	
17	Практическая работа №17. Операторный метод расчёта переходных процессов. Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом. Изучить методику расчета переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом.	4	2
18	Практическая работа №18. Операторный метод расчёта переходных процессов. Расчет переходных процессов в нелинейных электрических цепях. Освоить методику расчета переходных процессов в нелинейных электрических цепях.	4	

	Итого за 4 семестр:	36	6
5 семестр			
19	Практическая работа №19. Решение дифференциальных уравнений для однородной линии с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном токе. Расчет электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме. Изучить методику расчета электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме.	4	
20	Практическая работа №20. Решение дифференциальных уравнений для однородной линии с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном токе. Расчет переходных процессов в длинных линиях. Приобрести навыки расчета и анализа переходных процессов в длинных линиях.	2	
21	Практическая работа №21. Электростатическое поле. Электростатическое поле. Изучить методику и приобрести практические навыки расчета электростатического поля.	4	
22	Практическая работа №22. Электростатическое поле. Электрическое поле в проводящих средах. Изучить методику и приобрести практические навыки расчета электрического поле в проводящих средах.	2	
23	Практическая работа №23. Магнитное поле постоянного тока. Магнитное поле. Изучить методику и приобрести практические навыки расчета магнитного поля.	2	
24	Практическая работа №24. Переменное электромагнитное поле в однородном и изотропной проводящей среде. Переменное электромагнитное поле. Изучить методику и приобрести практические навыки расчета переменного магнитного поля.	4	
	Итого за 5 семестр:	18	
	Итого:	90	12

4. Содержание практических работ

Практическая работа №1. Основные понятия и определения. Основные законы электротехники. Расчет электрической цепи с одним источником ЭДС смешанном соединениях резисторов

Цель: Определить эквивалентное сопротивление цепи со смешанным соединением.

Основы теории:

Электрическая цепь, образованная путем соединения между собой идеализированных элементов, является математической моделью реального электротехнического или электронного устройства. Чем больше элементов содержит такая цепь, тем точнее отображает она характеристики моделируемого устройства. Дадим определения основных понятий, касающихся геометрической конфигурации, или топологии, электрических цепей.

Ветвь – участок цепи с двумя выводами. Ветвью может быть отдельный элемент либо группа элементов, соединенных последовательно или параллельно.

Узел – точка соединения двух или более ветвей. Место соединения двух ветвей удобно рассматривать в качестве узла при машинных расчетах. При ручных расчетах несколько элементов, соединенных последовательно или параллельно, удобно рассматривать как одну ветвь. Поэтому при ручных расчетах узлом считают соединение трех или более ветвей.

Контур – замкнутый путь, проходящий через ряд ветвей и узлов.

Задача анализа электрической цепи формулируется следующим образом. Заданы схема цепи и характеристики ее элементов, а также напряжения и токи независимых источников. Требуется найти токи и напряжения ветвей.

Уравнения, описывающие поведение электрической цепи, составляют на основе законов Кирхгофа.

Чтобы записать уравнения по законам Кирхгофа, необходимо сначала выбрать положительные направления токов и напряжений ветвей. Положительное направление тока показывают стрелкой на выводе элемента. Положительное направление напряжения показывают стрелкой, расположенной рядом с элементом. Направления токов и напряжений резистивных элементов выбирают согласованными. Сопротивление проводников, соединяющих элементы, очень мало по сравнению с сопротивлениями резисторов, и им пренебрегают.

Направления напряжений и токов источников следует рассмотреть особо. Стрелка ЭДС источника напряжения направлена к его положительному выводу. Поэтому напряжение на внешних зажимах этого источника направлено в сторону, противоположную ЭДС.

Задания:

Задание №1

На рисунке 1 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 , к которой подведено напряжение U . Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P , потребляемые цепью, а также токи I_1, I_2, I_3, I_4 , напряжения U_1, U_2, U_3, U_4 и мощности P_1, P_2, P_3, P_4 на каждом из резисторов. Проверить, что $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Данные для своего варианта взять из таблицы 1.

Таблица 1

Известная величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, В$	120	125	150	160	180	200	225	240	270	200
$R_1, Ом$	8	28	6	24	25	16	34	16	10	16
$R_2, Ом$	20	60	110	140	120	25	28	100	40	25
$R_3, Ом$	16	120	100	60	180	35	20	140	20	35
$R_4, Ом$	18	120	15	50	60	40	24	60	30	40

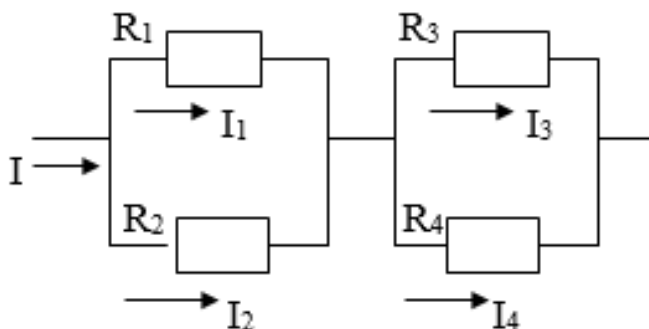


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

На рисунке 2 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 , к которой подведено напряжение U . Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P , потребляемые цепью, а также токи I_1, I_2, I_3, I_4 , напряжения U_1, U_2, U_3, U_4 и мощности P_1, P_2, P_3, P_4 на каждом из

резисторов. Проверить, что $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Данные для своего варианта взять из таблицы 2.

Таблица 2

Известная величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, В	90	130	156	180	210	234	240	260	360	260
R ₁ , Ом	36	100	30	24	300	24	60	400	40	20
R ₂ , Ом	18	25	45	12	60	36	40	100	120	30
R ₃ , Ом	45	10	300	30	60	240	48	40	100	200
R ₄ , Ом	30	15	75	20	30	60	24	60	150	50

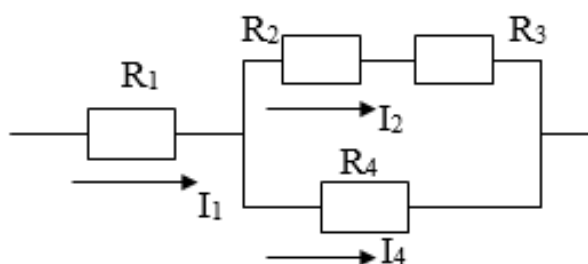


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

На рисунке 3 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R₁, R₂, R₃, R₄, к которой подведено напряжение U. Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P, потребляемые цепью, а также токи I₁, I₂, I₃, I₄, напряжения U₁, U₂, U₃, U₄ и мощности P₁, P₂, P₃, P₄ на каждом из резисторов. Проверить, что $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Данные для своего варианта взять из таблицы 3.

Таблица 3

Известная величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, В	60	90	120	150	165	195	200	220	225	240
R ₁ , Ом	3,2	4	8	5,6	2	32	4	20	3	15
R ₂ , Ом	12	60	200	40	30	100	25	300	36	10
R ₃ , Ом	40	24	50	60	15	150	100	75	30	15
R ₄ , Ом	10	240	60	36	40	30	30	40	45	30

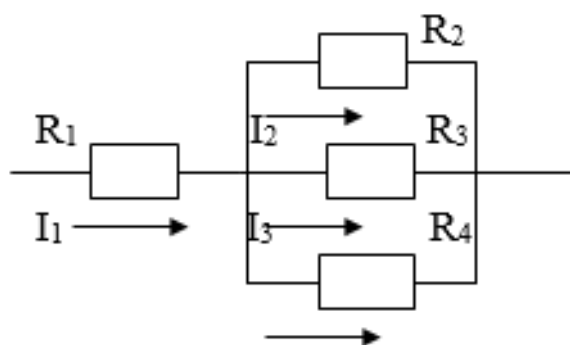


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

На рисунке 4 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , к которой подведено напряжение U . Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P , потребляемые цепью, а также токи I_1 , I_2 , I_3 , I_4 , напряжения U_1 , U_2 , U_3 , U_4 и мощности P_1 , P_2 , P_3 , P_4 на каждом из резисторов. Проверить, что $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Данные для своего варианта взять из таблицы 4

Таблица 4

Известная величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U , В	48	75	90	120	180	240	120	180	300	120
R_1 , Ом	8	10	45	20	15	48	40	20	200	40
R_2 , Ом	4	12,6	12	24	22	24	48	10	14	20
R_3 , Ом	10	4	40	10	24	180	30	100	60	50
R_4 , Ом	40	6	60	15	12	120	20	25	90	200

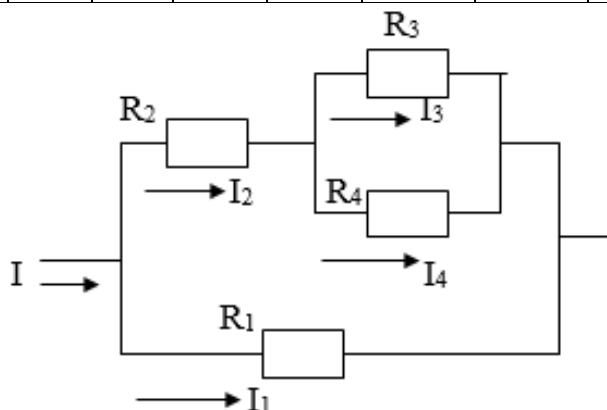


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Задание №5

На рисунке 5 приведена схема электрической цепи постоянного тока со смешанным соединением резисторов R_1, R_2, R_3, R_4 , к которой подведено напряжение U . Определить эквивалентное сопротивление R этой цепи, ток I и мощность P , потребляемые цепью, а также токи I_1, I_2, I_3, I_4 , напряжения U_1, U_2, U_3, U_4 и мощности P_1, P_2, P_3, P_4 на каждом из резисторов. Проверить, что $P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$. Данные для своего варианта взять из таблицы 5

Таблица 5

Известная величина	Номер варианта									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U, В$	90	120	156	220	195	200	120	160	180	100
$R_1, Ом$	8	10	20	12	14	8	10	16	12	3
$R_2, Ом$	40	15	45	40	60	150	24	50	24	20
$R_3, Ом$	60	10	30	60	30	100	48	200	12	30
$R_4, Ом$	4	14	40	8	18	12	14	8	10	5

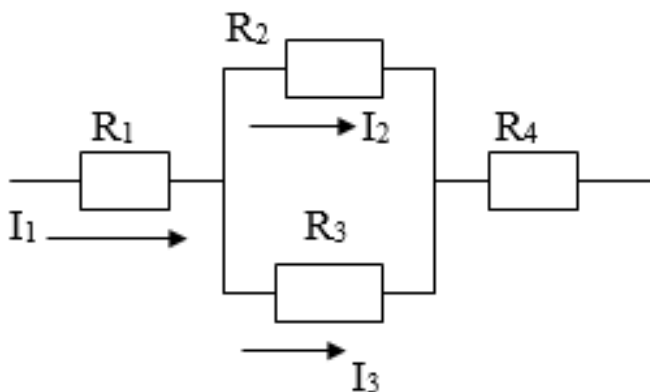


Рисунок 5 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Закон Ома. Определение. Формула.
2. Первый закон Кирхгофа. Формула, определение
3. Что называется последовательным соединением?
4. Что называется параллельным соединением?
5. Формула для определения эквивалентного сопротивления, если два резистора соединены: Параллельно? Последовательно?

Практическая работа №2 Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Расчет сложной электрической цепи методом узловых и контурных уравнений.

Цель: Определение токов ветвей с использованием законов Кирхгофа.

Основы теории:

Простейшие неразветвленные цепи содержат, соединенных последовательно, один или несколько источников или резистивных элементов. Параметры нагрузки неразветвленной цепи определяются по закону Ома. Для цепи с источниками ЭДС и напряжения закон Ома:

$$I = \frac{U \pm E}{R}$$

где R – полное сопротивление цепи $R=R_{вн} + R_n$; $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление источников энергии; R_n – сопротивление нагрузки.

U, E – напряжение и ЭДС источников.

Разветвленная цепь имеет много связанных между собой ветвей, может иметь множество источников энергии, а также узлов. Примером разветвленной эл. цепи может явиться сеть освещения жилого дома, корабля и т.д. Для решения задачи определения параметров нагрузки в разветвленной цепи приходится использовать сложные методики, основанные на фундаментальных законах Ома и Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа, вытекает из принципа непрерывности тока, справедлив для узлов цепи. Согласно этому закону алгебраическая сумма мгновенных токов в любом узле эл. цепи равна нулю. Т.е. в любом узле цепи сумма токов приходящих равна сумме токов отходящих от узла:

$$\sum_{\kappa=1}^n i_{\kappa} = 0$$

Число уравнений равно числу узлов минус один. При составлении уравнений обычно принимают токи, идущие к узлу, с плюсом, а от узла – с минусом.

Второй закон Кирхгофа является следствием закона сохранения энергии и формулируется как алгебраическая сумма ЭДС в замкнутом контуре, равна алгебраической сумме падений напряжений на всех сопротивлениях контура:

$$\sum_{\kappa=1}^n E_{\kappa} = \sum_{\kappa=1}^n I_{\kappa} R_{\kappa}$$

При составлении уравнений Кирхгофа предварительно необходимо выбрать произвольно условно-положительное направление токов во всех ветвях схемы. Определить также

независимые контуры. Контуром назовем замкнутую эл. цепь. Задать произвольное направление обхода токов. ЭДС и падение напряжения принимаем с плюсом, если ток или ЭДС совпадают с направлением обхода и минус, если не совпадают. Пример составления уравнений Кирхгофа рассмотрим для электрической цепи, приведённой на рисунке 2.4.

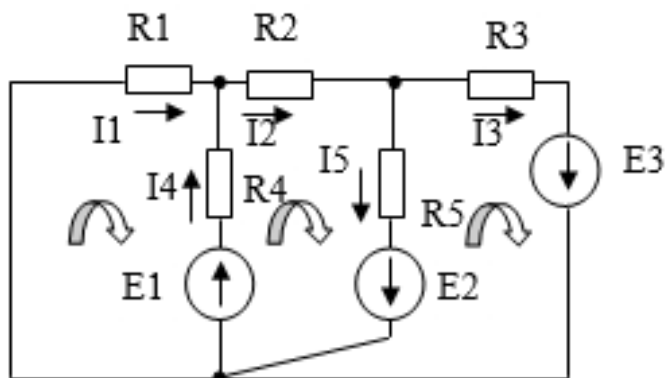


Рисунок 2.4 – Схема разветвлённой электрической цепи

По первому закону Кирхгофа (2.9):

$$I_1 - I_2 + I_4 = 0;$$

$$I_2 - I_3 - I_5 = 0.$$

По второму закону Кирхгофа (2.10):

$$I_1 \cdot R_1 - I_4 \cdot R_4 = -E_1 ;$$

$$I_4 \cdot R_4 + I_2 \cdot R_2 + I_5 \cdot R_5 = E_2 + E_1 ;$$

$$-I_5 \cdot R_5 - I_3 \cdot R_3 = E_3 - E_2.$$

Полученные уравнения (2.11, 2.12) решают совместно, как систему. Удобный способ решений уравнений – с помощью определителей. Отметим, что число уравнений должно равняться числу неизвестных токов.

Во многих случаях расчет эл. цепей можно упростить путем уменьшения количества уравнений, используя для этого специальные методы.

Задания:

Задание №1

Методом уравнений Кирхгофа рассчитать токи в схеме рис. при следующих параметрах: $J = 3 \text{ A}$, $E = 30 \text{ В}$, $r_1 = 10 \text{ Ом}$, $r_2 = 5 \text{ Ом}$.

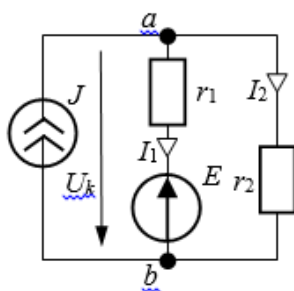


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Методом уравнений Кирхгофа рассчитать токи в схеме рис,а при следующих параметрах: $J_1 = 10 \text{ A}$, $E_2 = 100 \text{ B}$, $E_6 = 300 \text{ B}$, $r_3 = r_4 = r_5 = r_6 = 20 \text{ Ом}$.

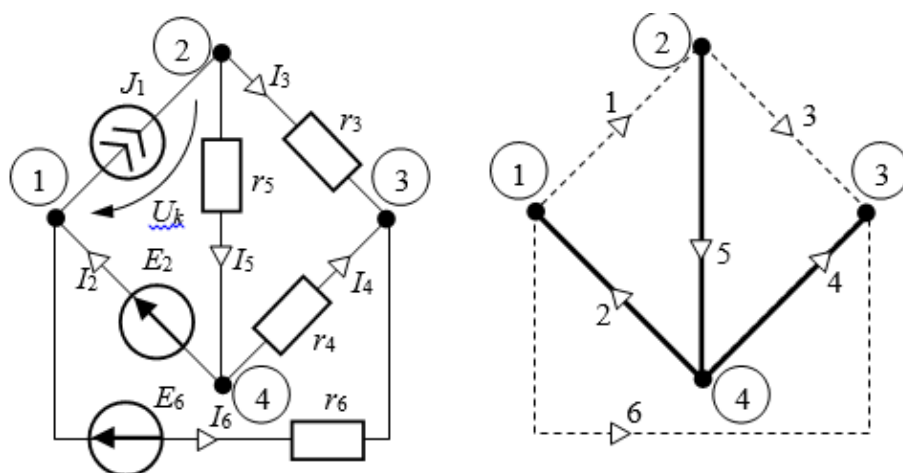


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

Мостовая схема рис. питается от реального источника электрической энергии, ЭДС которого $E = 400 \text{ B}$, а внутреннее сопротивление $r = 10 \text{ Ом}$. Сопротивления плеч моста $r_1 = 20 \text{ Ом}$, $r_2 = 40 \text{ Ом}$, $r_3 = 60 \text{ Ом}$, $r_4 = 30 \text{ Ом}$. Мост нагружен приёмником, сопротивление которого $r_5 = 30 \text{ Ом}$.

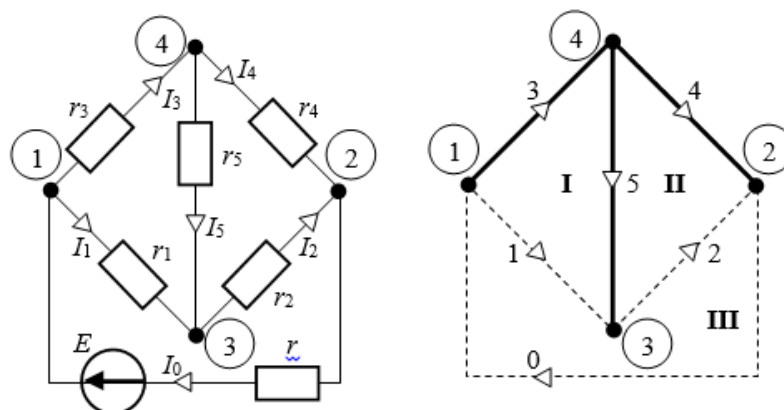


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

Рассчитать токи во всех ветвях цепи, представленной на рис, если: $E_1 = 100 \text{ В}$, $E_2 = 50 \text{ В}$, $r_1 = r_2 = 10 \text{ Ом}$, $r_3 = 20 \text{ Ом}$.

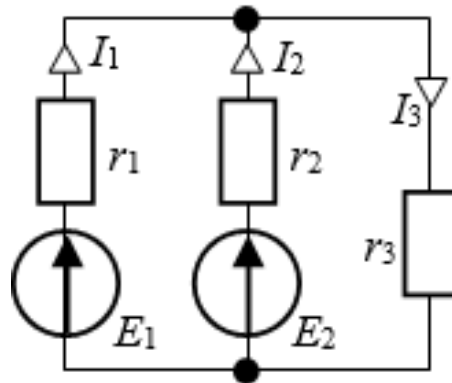


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Задание №5

Определить токи по законам Кирхгофа в ветвях схемы (рис. 1.26) и проверить баланс мощностей, если: $E_1 = 120 \text{ В}$, $E_2 = 60 \text{ В}$, $J = 4 \text{ А}$; $r_1 = r_2 = 20 \text{ Ом}$, $r_3 = 5 \text{ Ом}$, $r_4 = 15 \text{ Ом}$.

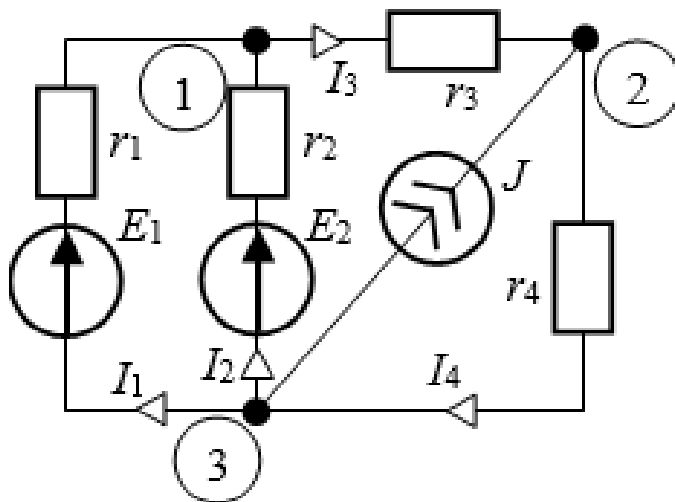


Рисунок 5 – Принципиальная схема к задаче

Задание №6

Определить токи в ветвях мостовой схемы, если известны параметры цепи: $E = 4,4 \text{ В}$, $r_1 = 20 \text{ Ом}$, $r_2 = 60 \text{ Ом}$, $r_3 = 120 \text{ Ом}$, $r_4 = 8 \text{ Ом}$, $r_5 = 44 \text{ Ом}$.

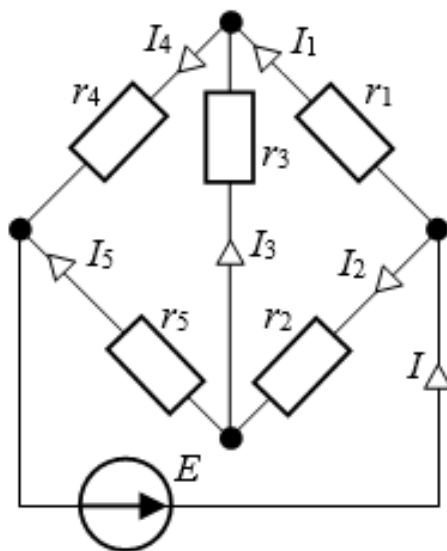


Рисунок 6 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается метод узловых и контурных уравнений?
2. Сколько узловых уравнений составляют для цепи?
3. По какому закону составляются узловые уравнения и как этот закон читается?
4. Как выбирают направления токов в узловых уравнениях?
5. Сколько контурных уравнений составляют для цепи?
6. По какому закону составляют контурные уравнения и как он читается?
7. Как выбирают направления ЭДС в контурных уравнениях?
8. Чему равно общее количество уравнений, составленных по данному методу?

Практическая работа №3. Расчет сложной электрической цепи методом контурных токов.

Цель: Определение токов ветвей по методу контурных токов.

Основы теории:

Метод контурных токов состоит в том, что в качестве неизвестных в системе уравнений цепи используются так называемые контурные токи. Контурные токи являются фиктивными. Реальные токи можно найти как разность токов двух контуров, в которые входит данная ветвь. Для определения контурных токов составляется система уравнений по второму правилу Кирхгофа. Количество уравнений равно числу контуров. Контурные токи направляют по направлению обхода контуров и обозначают $I_{11}, I_{22}, \dots, I_{nn}$. Формальная система уравнений:

[illegible]

где $R_{11}, R_{22}, \dots, R_{kk}$ – собственные сопротивления контуров $R_{kk} = \sum_{i=1}^m R_i$; $k=1, n$ – номер

KOH-

тура; m – число сопротивлений в контуре;

$R_{1,2}, R_{1,3}, \dots, R_{jn}$ – взаимные сопротивления контуров, т.е. принадлежащие смежным контурам; $j=1, m$ – номер сопротивления;

 $E_{11}, E_{22}, \dots, E_{nn}$ — контурные э.д.с.,

$$E_{nn} = \sum_{i=1}^n E_i ;$$

Этот метод позволяет уменьшить число расчётных уравнений в системе уравнений Кирхгофа ($N = N_I + N_{II}$) до числа уравнений, записанных только по II закону Кирхгофа (до числа главных (независимых) контуров схемы).

Рекомендуемый порядок расчёта:

1). Составляется направленный граф электрической цепи и формируются независимые контуры. При этом ветви с известными токами (ветви с источниками тока) не могут быть ветвями дерева, а лишь ветвями связи.

2). Полагают, что в независимых контурах циркулируют контурные токи, направление которых совпадает с направлением токов ветвей связи. При этом часть контурных токов становятся известными в соответствии с п.1 данных рекомендаций.

3). Для контуров с неизвестными контурными токами составляются контурные уравнения по II закону Кирхгофа. Таким образом, количество уравнений по МКТ следующее:
 $N_{МКТ} = B - (Y-1) - B_T$.

4). Решается система контурных уравнений.

5). Токи в ветвях определяют путём алгебраического суммирования контурных токов в соответствии с принципом наложения.

6). Проверка выполняется составлением баланса мощностей или расчётом токов иным методом.

Задания:

Задание №1

По заданным значениям ЭДС и сопротивлений определить токи ветвей по методу контурных токов для данной цепи. Данные взять из таблицы.

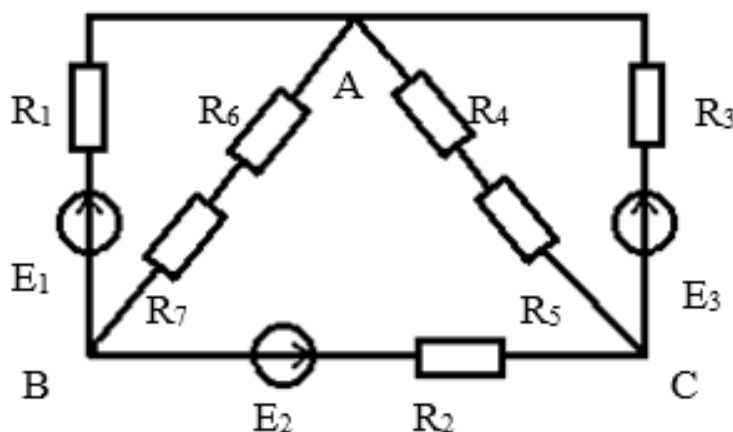


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Таблица

Заданные величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_1, (В)$	60	80	100	40	50	70	90	100	60	80
$E_2, (В)$	90	60	50	100	70	80	40	80	70	90
$E_3, (В)$	70	100	90	60	80	100	70	40	50	60
$R_1 (Ом)$	4	6	10	5	2	3	7	4	9	10
$R_2 (Ом)$	5	10	9	4	7	6	3	2	5	8

R_3 (Ом)	8	4	3	9	10	7	5	8	6	3
R_4 (Ом)	5	7	9	8	7	4	8	9	7	7
R_5 (Ом)	6	9	8	6	5	8	4	8	7	9
R_6 (Ом)	6	7	58	9	8	6	4	3	9	5
R_7 (Ом)	10	8	3	5	8	9	6	7	10	5

Контрольные вопросы:

1. Как читается первый закон Кирхгофа?
2. Как читается второй закон Кирхгофа?
3. В каком случае ЭДС считается отрицательным?
4. Как выбираются направления токов в узловых уравнениях?
5. Что называют узлом?
6. Что называют контуром?
7. Что называют ветвью электрической цепи?

Практическая работа №4. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Расчет сложной электрической цепи методом узловых потенциалов.

Цель: Определение токов ветвей по методу узловых потенциалов.

Основы теории:

Этот метод позволяет уменьшить число расчётных уравнений от количества $B-B_T$ (число ветвей с неизвестными токами) до количества $(V-1)$, то есть до числа уравнений, записанных только по I закону Кирхгофа при использовании метода уравнений Кирхгофа.

В рассматриваемом методе (МУП) сначала составляется система уравнений для расчёта потенциалов узлов схемы. Так как потенциал электрического тела определяется с точностью до постоянной величины, то потенциал одного из узлов схемы всегда можно принять равным любому числу (лучше всего нулю, так как при этом упрощаются и уравнения, и вычисления). Этот узел принято называть *базисным* и при дальнейших расчётах принято, что $\varphi_B = 0$.

Для каждого из узлов схемы с неизвестным потенциалом составляется узловое уравнение. Для узла a , потенциал которого φ_a , узловое уравнение имеет вид:

$$\varphi_a \cdot \sum_a g - \varphi_b \cdot \sum_{a-b} g - \varphi_c \cdot \sum_{a-c} g - \dots = \sum_a E g + \sum_a J.$$

Здесь φ_b , φ_c – потенциалы узлов схемы, часть которых может быть известна, а остальные и не известны;

$\sum_a g$ – *собственная проводимость* узла a , сумма проводимостей ветвей, непосредственно примыкающих к узлу a , для которого и записывается узловое уравнение;

$\sum_{a-q} g$ – *взаимная проводимость* узлов a и q , сумма проводимостей ветвей, находящихся непосредственно между узлами a и q (для этих ветвей a и q – конечные точки);

$\sum_a E g$ – алгебраическая сумма токов короткого замыкания ветвей с источниками ЭДС, объединённых узлом a , причём слагаемое $E g$ берётся со знаком «+», если ЭДС ветви направлена к узлу a ;

$\sum_a J$ – алгебраическая сумма токов источников токов ветвей, объединённых узлом a , причём ток J берётся со знаком «+», если он направлен к узлу a .

Рекомендуется следующий порядок расчёта токов по МУП:

1. Выбирают произвольные направления токов в ветвях схемы.
2. Выбирают базисный узел и принимают его потенциал равным нулю $\varphi_B = 0$.
3. Для узлов с неизвестными потенциалами составляют и решают узловые уравнения.
4. По закону Ома рассчитывают токи ветвей.
5. Проверяют правильность решения задачи (в общем случае по выполнению баланса мощностей).

Задания:

Задание №1

По заданным значениям ЭДС и сопротивлений определить токи ветвей по методу узлового напряжения для данной цепи. Данные для своего варианта взять из таблицы.

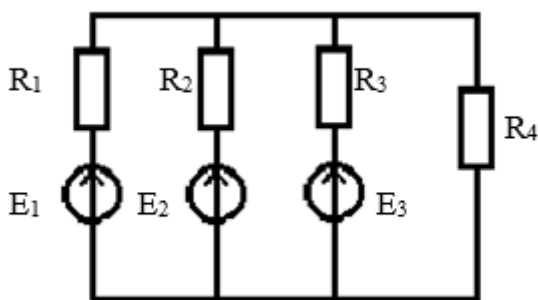


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Таблица 1

Заданные величины	Вариант									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_1 , (В)	60	80	100	40	50	70	90	100	60	80
E_2 , (В)	90	60	50	100	70	80	40	80	70	90
E_3 , (В)	70	100	90	60	80	100	70	40	50	60
R_1 (Ом)	5,6	7,4	9,0	8,5	7,8	4,7	8,3	9,6	7,1	7,0
R_2 (Ом)	6,5	9,0	8,1	6,6	5,3	8,4	4,7	8,8	7,5	9,2
R_3 (Ом)	6,2	7,6	5,7	9,1	8,0	6,3	4,5	3,2	9,4	5,7
R_4 (Ом)	10	15	12	20	22	14	18	16	10	24

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается метод узлового напряжения?
2. Что называют узловым напряжением?
3. Чему равна проводимость ветви?
4. Как определяют токи ветвей по данному методу?
5. Как читается закон Ома для участка цепи?
6. Как читается первый закон Кирхгофа?
7. В каком случае ток ветви будет отрицательным?
8. Что называют ветвью?

Практическая работа №5. Методы расчета электрических цепей постоянного тока. Применение метода наложения для расчета электрических цепей постоянного тока.

Цель: Научиться с помощью метода наложения рассчитывать сложные электрические цепи с несколькими источниками ЭДС

Основы теории:

Метод наложения применяется для анализа и расчёта линейных электрических цепей, содержащих, как правило, небольшое число источников энергии.

Сущность метода заключается в том, что ток каждой ветви сложной цепи определяется путём алгебраического суммирования составляющих токов, каждая из которых является функцией только одной ЭДС.

При расчёте цепи методом наложения вначале полагают, что в этой цепи действует только один источник, например, E_1 и определяют токи во всех ветвях: I_1', I_2', I_3' и т.д. Затем полагают, что в цепи действует только второй источник, например, E_2 и снова находят токи в ветвях: I_1'', I_2'', I_3'' и т.д. Затем полагают, что в цепи действует только третий источник, например, J и т.д. Полный ток в ветви n : $I_n = I_n' + I_n'' + I_n''' + \dots$,

где $I_n', I_n'', I_n''', \dots$ - составляющие тока в ветви n , обусловленные действием $E_1, E_2, J, \dots$, соответственно

Задания:

Задание №1

Определить токи в ветвях схемы рис., если $E_1 = 16 \text{ В}$, $J = 1 \text{ А}$, $r_1 = r_2 = r_3 = r_4 = r_5 = 6 \text{ Ом}$.

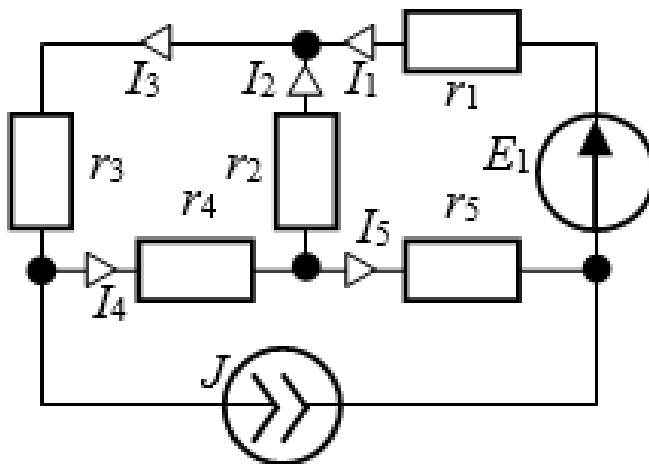


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Определить токи в отдельных участках цепи если $E_1 = 120 \text{ В}$, $E_2 = 160 \text{ В}$, $R_1 = R_2 = 55 \text{ Ом}$, $R_3 = 30 \text{ Ом}$, $R_{\text{вн}1} = R_{\text{вн}2} = 5 \text{ Ом}$.

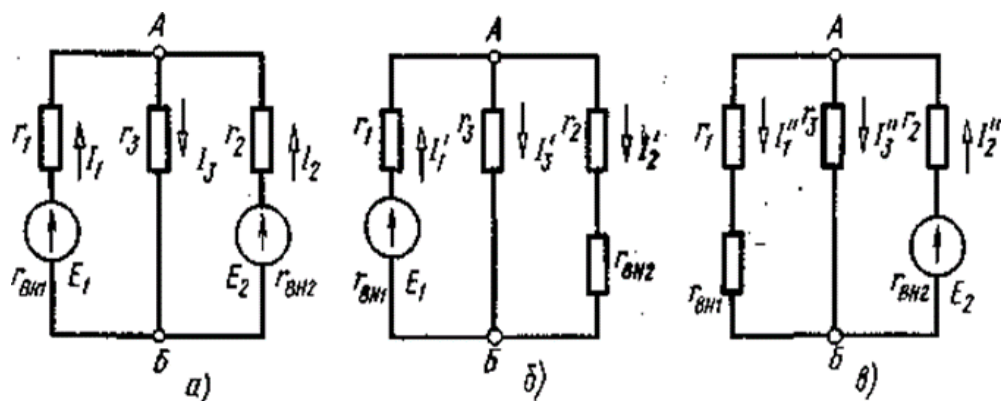


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается метод наложения?
2. Какие преимущества данного метода?
3. Как определяются значения действительных токов?
4. Как выбирают направления частичных токов?

Практическая работа №6. Преобразование электрических цепей. Применение метода эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений.

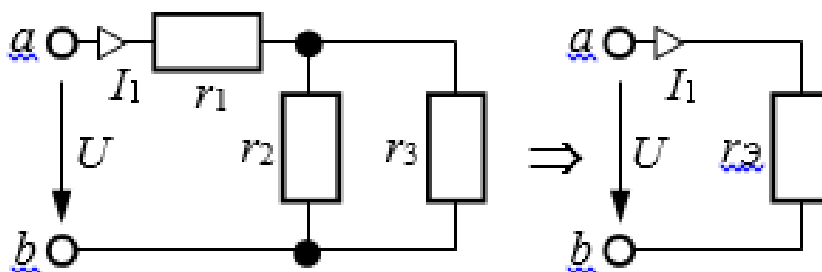
Цель: Научиться с помощью метода эквивалентного преобразования треугольника и звезды сопротивлений рассчитывать электрические цепи с одним источником питания, применяемые в области электрических измерений.

Основы теории:

Сущность эквивалентных преобразований заключается в том, что часть электрической цепи заменяется более простой схемой: либо с меньшим количеством ветвей и сопротивлений, либо с меньшим числом узлов или контуров. Преобразование считается *эквивалентным*, если токи и напряжения непреобразованной части схемы остаются прежними, то есть одинаковыми в исходной и преобразованной схемах. Сами по себе эквивалентные преобразования не являются методом расчёта, однако способствуют упрощению расчётов.

Часто используются следующие эквивалентные преобразования:

1. Замена последовательного соединения сопротивлений $r_1, r_2, \dots, r_n$ одним эквивалентным $r_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n r_k$.



2. Замена параллельного соединения пассивных ветвей с проводимостями $g_1, g_2, \dots, g_n$ одной эквивалентной $g_{\Sigma} = \sum_{k=1}^n g_k$.

3. Замена смешанного соединения сопротивлений рис. 1.35,а одним эквивалентным (рис. 1.35,б), где $r_{\Sigma} = r_1 + \frac{r_2 \cdot r_3}{r_2 + r_3}$, что следует из поэтапного применения п.2 и п.1 настоящих рекомендаций.

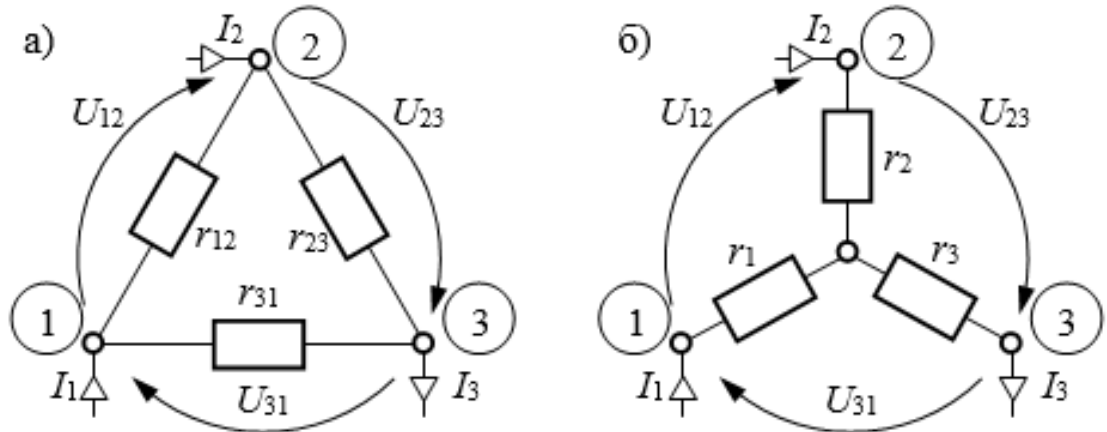
4. Эквивалентные преобразования пассивных трёхполюсников – треугольника (рис. 1.36,а) и звезды (рис.1.36,б). При этом сопротивления эквивалентного треугольника

$$r_{12} = r_1 + r_2 + \frac{r_1 \cdot r_2}{r_3}, \quad r_{23} = r_2 + r_3 + \frac{r_2 \cdot r_3}{r_1}, \quad r_{31} = r_3 + r_1 + \frac{r_3 \cdot r_1}{r_2},$$

а сопротивления эквивалентной звезды

$$r_1 = \frac{r_{12} \cdot r_{31}}{r_{\Delta}}, \quad r_2 = \frac{r_{23} \cdot r_{12}}{r_{\Delta}}, \quad r_3 = \frac{r_{31} \cdot r_{23}}{r_{\Delta}},$$

где $r_{\Delta} = r_{12} + r_{23} + r_{31}$ – сумма сопротивлений ветвей треугольника



5. При дальнейшем изучении курса ТОЭ будут представлены формулы эквивалентных замен пассивных четырёхполюсников Т- и П-схемами, замен цепей с распределёнными параметрами эквивалентными четырёхполюсниками, устранение индуктивной связи в цепях и др.

Особенно удобно пользоваться методом эквивалентных преобразований при расчёте входных и взаимных сопротивлений или входных и взаимных проводимостей схем, коэффициентов передачи напряжений и токов, поступающих на вход схемы при передаче сигнала в нагрузку, когда на схему воздействует только один источник энергии.

Задания:

Задание №1

Определить токи в схеме, используя эквивалентные преобразования, если входное напряжение схемы $U_{\text{ex}} = 400 \text{ В}$, а параметры $r_1 = 10 \text{ Ом}$, $r_2 = 60 \text{ Ом}$, $r_3 = 20 \text{ Ом}$, $r_4 = 100 \text{ Ом}$, сопротивление нагрузки, подключенной на выходе схемы (выход четырёхполюсника), $r_5 = 50 \text{ Ом}$.

Рассчитать также коэффициент передачи напряжения k_U и коэффициент передачи тока k_I .

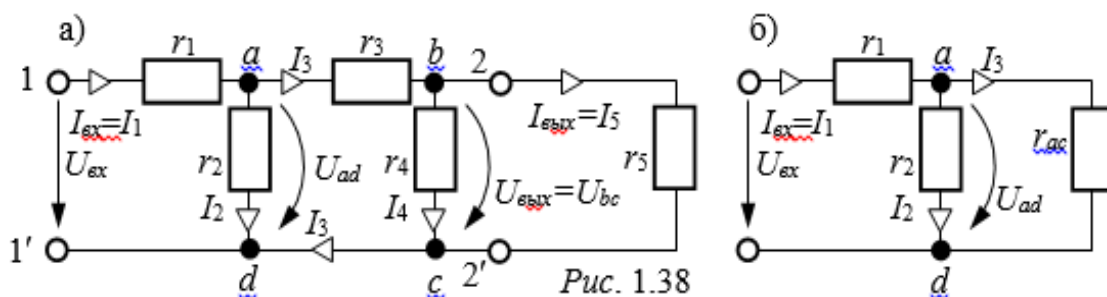


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Определить токи в ветвях схемы, приведенной на рис заменив треугольник сопротивлений $r_{ab}-r_{bc}-r_{ca}$ эквивалентной звездой, если: $E_A = 50 \text{ В}$, $E_B = 30 \text{ В}$, $E_C = 100 \text{ В}$, $r_A = 3,5 \text{ Ом}$, $r_B = 2 \text{ Ом}$, $r_C = 7 \text{ Ом}$, $r_{ab} = 6 \text{ Ом}$, $r_{bc} = 12 \text{ Ом}$, $r_{ca} = 6 \text{ Ом}$.

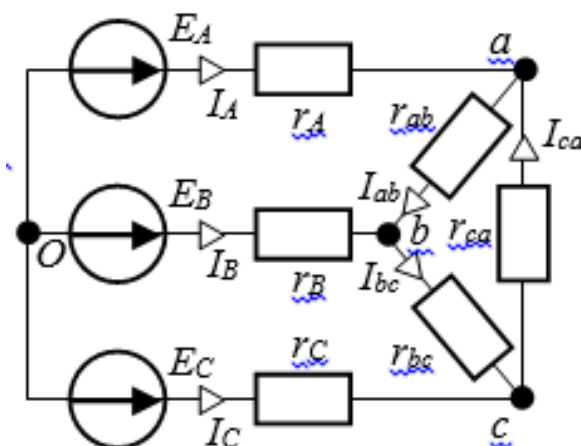


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

Рассчитать токи в схеме методом преобразования электрической цепи, проверить БМ, если: $r_1 = r_2 = 6 \text{ Ом}$, $r_3 = 3 \text{ Ом}$, $r_4 = 12 \text{ Ом}$, $r_5 = 4 \text{ Ом}$, $J = 6 \text{ А}$.

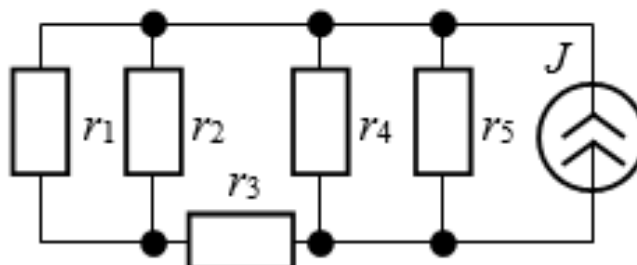


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

В цепи $J = 50 \text{ мА}$, $E = 60 \text{ В}$, $r_1 = 5 \text{ кОм}$, $r_2 = 4 \text{ кОм}$, $r_3 = 16 \text{ кОм}$, $r_4 = 2 \text{ кОм}$, $r_5 = 8 \text{ кОм}$. Вычислить ток ветви с сопротивлением r_5 , пользуясь преобразованием схем с источниками тока в эквивалентные схемы с источниками ЭДС и наоборот.

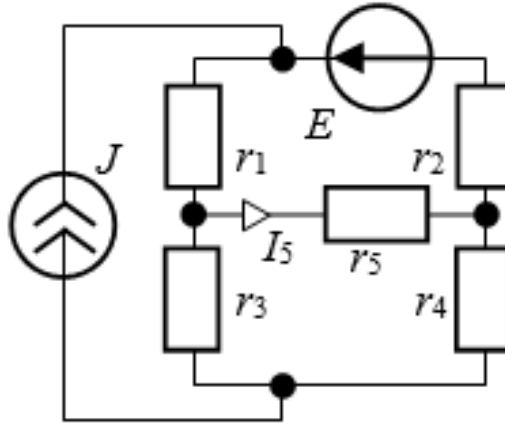


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. В чем состоит метод свертывания электрической цепи?
2. Расскажите о преобразовании треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений.
3. Расскажите о преобразовании звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник сопротивлений.

Практическая работа №7. Магнитные цепи. Расчет неразветвленных магнитных цепей.

Цель: Получить практические навыки расчета неразветвленных магнитных цепей.

Основы теории:

Электрические цепи называются связанными, если процессы в них влияют друг на друга посредством общего магнитного или электрического поля. Если связь цепей осуществляется посредством магнитного поля, её называют индуктивной. Индуктивную связь между электрическими цепями широко используют в электротехнических устройствах для передачи или распределения электрической энергии без непосредственной электрической связи между цепями, преобразования параметров электрических цепей и т.п.

Рассмотрим две индуктивно связанные катушки (рисунок 4.1).

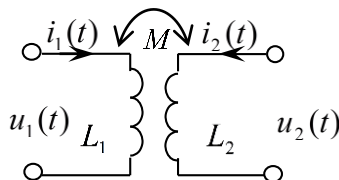


Рисунок 4.1 – Индуктивно связанные катушки

Если к L_1 подключить переменное напряжение $u_1(t)$, то по ней потечёт ток $i_1(t)$. Он создаст магнитное поле, которое будет пересекать проводники как первой, так и второй катушек. При этом в первой катушке будет наводиться ЭДС самоиндукции $e_{11} = -L_1 \frac{di_1}{dt}$, а во

второй ЭДС взаимной индукции $e_{21} = -M \frac{di_1}{dt}$, где M – взаимная индуктивность, Гн.

Взаимной индуктивностью M называют скалярную величину, равную отношению потокосцепления взаимной индуктивности к току обуславливающему это потокосцепление:

$$M = \frac{\psi_{12}}{i_2} = \frac{\psi_{21}}{i_1}, \quad (4.1)$$

где ψ_{12} – потокосцепление первой катушки индуктивности, обусловленное потоком во второй катушке;

ψ_{21} – потокосцепление второй катушки, обусловленное током в первой катушке.

Отношение ЭДС взаимной индукции к ЭДС самоиндукции, созданных одним током, называют степенью связи:

$$K_{21} = \frac{e_{21}}{e_{11}} = \frac{-M \frac{di_1}{dt}}{-L_1 \frac{di_1}{dt}} = \frac{M}{L_1} - \text{степень связи второй катушки с первой}; \quad (4.2)$$

$$K_{12} = \frac{e_{12}}{e_{22}} = \frac{-M \frac{di_2}{dt}}{-L_2 \frac{di_2}{dt}} = \frac{M}{L_2} - \text{степень связи первой катушки со второй}. \quad (4.3)$$

Степень связи показывает, какая часть магнитного потока одной катушки проходит через витки другой при отсутствии в ней тока. Среднее геометрическое степеней связи называют коэффициентом связи:

$$K = \sqrt{K_{12} \cdot K_{21}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}}, \quad K < 1. \quad (4.4)$$

Для увеличения связи катушки располагают близко друг к другу или одна в другой.

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, состоящее из двух или нескольких индуктивно связанных обмоток, не имеющих между собой электрической связи. Трансформаторы применяются для преобразования токов, напряжений, сопротивлений. Высокочастотные трансформаторы, как правило, не имеют сердечника внутри катушек. У низкочастотных трансформаторов для увеличения магнитной связи и уменьшения тока холостого хода применяется ферромагнитный сердечник. На рисунке 4.2 приведена принципиальная электрическая схема трансформатора.

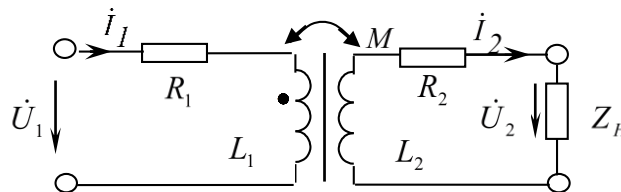


Рисунок 8.2 – Принципиальная электрическая схема трансформатора

Обмотка, на которую подаётся напряжение, называется первичной, а все остальные – вторичными. Если вторичная цепь замкнута на сопротивление нагрузки, то по вторичной обмотке будет протекать ток, который по закону Ленца создаст поток, действующий встречно основному. Поэтому всегда обе катушки трансформатора включены встречно, т.е. M имеет отрицательный знак.

На основании второго закона Кирхгофа уравнения мгновенных значений тока и напряжений в обмотках:

$$\begin{cases} u_1 = R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt}; \\ 0 = R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} + u_2. \end{cases} \quad (4.5)$$

В комплексной форме:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2; \\ 0 = R_2 \dot{I}_2 + j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1 + \dot{U}_2. \end{cases} \quad (4.6)$$

Векторная диаграмма трансформатора при нагрузке строится по уравнениям (4.6). Предположим, что нагрузка трансформатора активно-индуктивная, т.е. ток $\dot{I}_2$ отстаёт от напряжения $\dot{U}_2$ на угол φ_2 . Построение начинается с вектора $\dot{I}_2$. Векторная диаграмма приведена на рисунке 4.3. Векторы $-j\omega M \dot{I}_1$ и $-j\omega M \dot{I}_2$ отстают от токов на 90 электрических градусов, т. к. они имеют отрицательный знак.

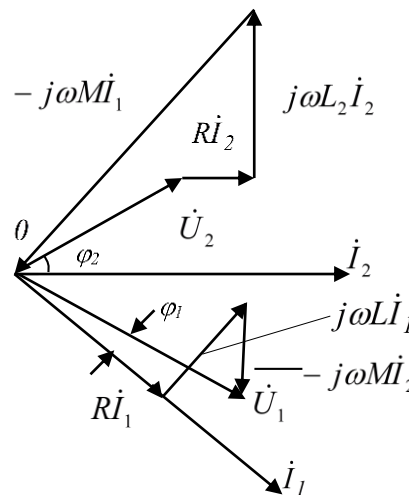


Рисунок 4.3 – Векторная диаграмма трансформатора

В режиме нагрузки ток вторичной обмотки трансформатора оказывает существенное влияние на ток первичной обмотки. Это объясняется встречным включением обмоток. Увеличение тока $\dot{I}_2$ приводит к уменьшению общего потока, пронизывающего обмотки, что снижает противоэдс первичной обмотки. При неизменном напряжении питания это увеличивает ток в первичной обмотке чтобы восстановился баланс ЭДС и падений напряжения в первичной цепи с напряжением питания $\dot{U}_1$.

Идеальным называется трансформатор, обмотки которого имеют бесконечно большие индуктивности и активные сопротивления, равные нулю, коэффициент связи равен единице, $K = M / \sqrt{L_1 L_2} = 1$. Уравнение идеального трансформатора имеет вид:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega M \dot{I}_2; \\ \dot{U}_2 = j\omega L_2 \dot{I}_2 - j\omega M \dot{I}_1. \end{cases} \quad (4.7)$$

Если считать, что обе обмотки трансформатора пронизывает один и тот же магнитный поток Φ , то в первичной обмотке будет наводиться ЭДС $e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}$, а во вторичной $e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}$, где W_1, W_2 – число витков первичной и вторичной обмоток.

Отношение:

$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{W_2}{W_1} = K_T \text{ – коэффициент трансформации.} \quad (4.8)$$

В режиме холостого хода при $\dot{I}_2 = 0$ получим: $\dot{U}_1 = j\omega L_1 \dot{I}_1$, $\dot{U}_2 = j\omega M \dot{I}_1$.

Выразим $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_2}{j\omega M}$ и подставим:

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{U}_2}{j\omega M} j\omega L_1 = \dot{U}_2 \frac{L_1}{M}; \quad \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{M}{L_1} = \frac{\sqrt{L_1 L_2}}{L_1} = \frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}} \approx \frac{W_2}{W_1} = K_T. \quad (4.9)$$

В режиме короткого замыкания $\dot{U}_2 = 0$, тогда $0 = j\omega M \dot{I}_1 - j\omega L_2 \dot{I}_2$, или $M \dot{I}_1 = L_2 \dot{I}_2$, откуда:

$$\frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_2} = \frac{L_2}{M} = \frac{L_2}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{\sqrt{L_2}}{\sqrt{L_1}} \approx \frac{W_2}{W_1} = K_T. \quad (4.10)$$

Таким образом:

$$\begin{cases} \dot{U}_2 = K_T \dot{U}_1; \\ \dot{I}_1 = K_T \dot{I}_2. \end{cases} \quad (4.11)$$

– это уравнение идеального трансформатора.

Входное сопротивление трансформатора:

$$Z_{BX} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{U}_2 / K_T}{K_T \dot{I}_2} = \frac{\dot{I}_2 Z_H}{K_T^2 \dot{I}_2} = \frac{Z_H}{K_T^2}, \text{ откуда } Z_H = K_T^2 Z_{BX}. \quad (4.12)$$

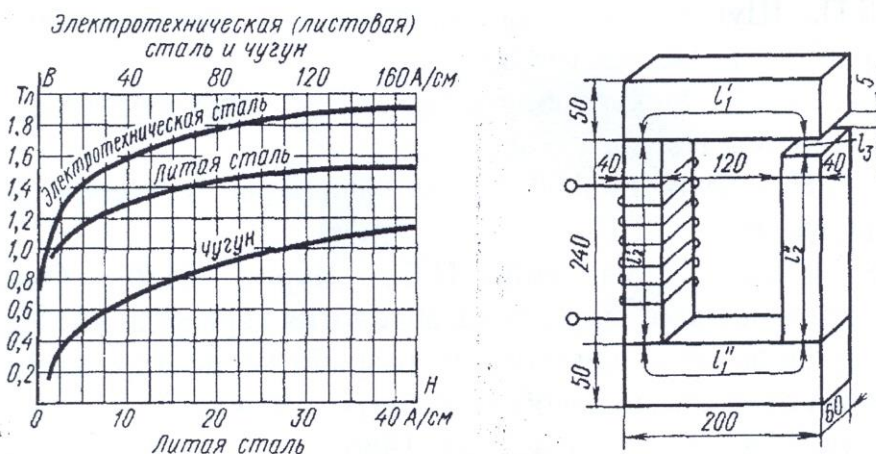
Таким образом, с помощью трансформатора можно осуществлять преобразование сопротивлений.

Следует отметить, что идеальный трансформатор является чисто теоретической моделью. Однако, свойствами, близкими к свойствам идеального трансформатора, обладают трансформаторы с ферромагнитным магнитопроводом при достаточно большом числе витков его обмоток.

Задания:

Задание №1

Определить число витков обмотки, расположенной на сердечнике, если при $I = 3 \text{ А}$ необходимо создать магнитный поток $\Phi = 36 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$. Верхняя и нижняя части сердечника выполнены из литой стали, а вертикальные стержни – из электротехнической стали.



На рис. индуктивно связанные катушки соединены в узле однополярными зажимами, на рис. 3.43,б те же катушки соединены в узле разнополярными зажимами. Определить показания вольтметра обеих схем, если: $x_1 = 20 \text{ Ом}$, $x_2 = 10 \text{ Ом}$, коэффициент связи катушек $k = 0,5$, ёмкостное сопротивление $x_3 = 10 \text{ Ом}$, ЭДС $e(t) = 100\sqrt{2} \sin(\omega t) \text{ В}$.

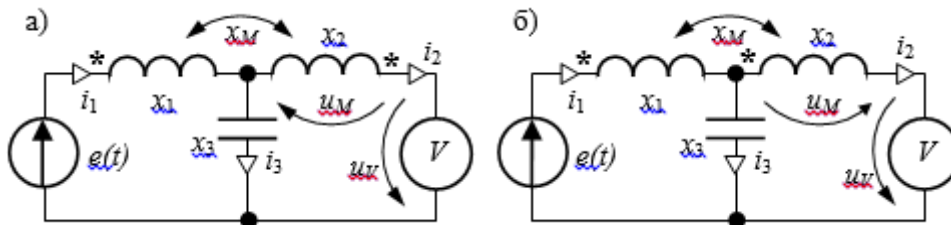


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Параметры схемы рис. $r_1 = 10 \text{ Ом}$, $x_1 = 20 \text{ Ом}$, $r_2 = 40 \text{ Ом}$, $x_2 = 30 \text{ Ом}$, $x_M = 20 \text{ Ом}$, приложенное напряжение $U = 220 \text{ В}$. Найти показания приборов. Построить векторную диаграмму цепи. Записать уравнение баланса мощностей. Найти активную мощность, передаваемую из одной ветви в другую.

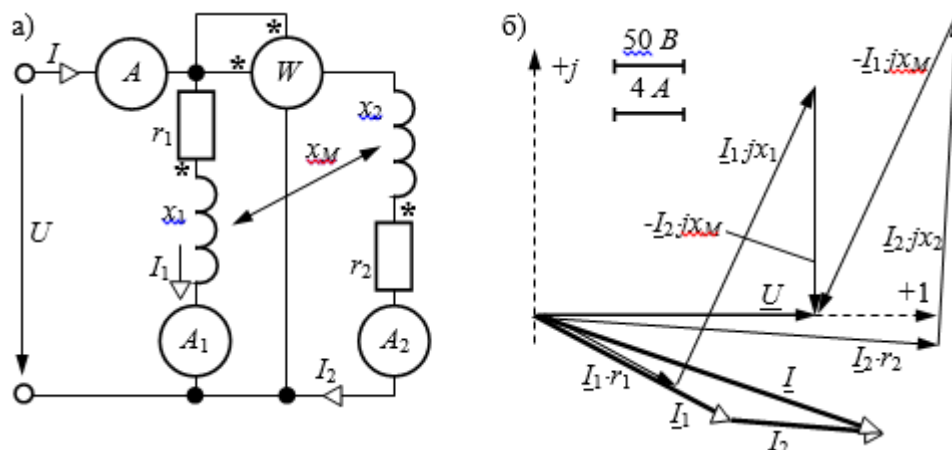


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Что называется магнитной цепью?
2. Назовите элементы магнитной цепи.
3. Каковы основные параметры магнитной цепи?

Практическая работа №8. Расчёт электрических цепей переменного тока.

Комплексный метод анализа цепей синусоидального тока.

Цель: Получить навыки перевода синусоидальных величин в комплексные, научиться строить векторные диаграммы.

Основы теории:

Пусть в цепь переменного тока с частотой $f = 50 \text{ Гц}$ включена катушка, обладающая индуктивностью L и активным сопротивлением r (рис. 2.1).

При протекании по катушке переменного тока i_L в пространстве, окружающем витки, будет создаваться магнитный поток Φ и потокосцепление с витками катушки:

$$\psi = w \cdot \Phi$$

где w – число витков катушки.

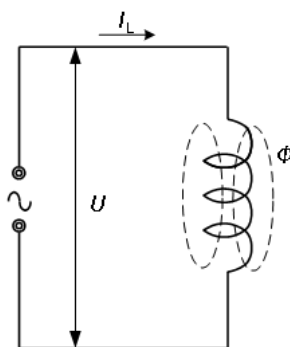


Рисунок 4.1 – Схема с индуктивностью

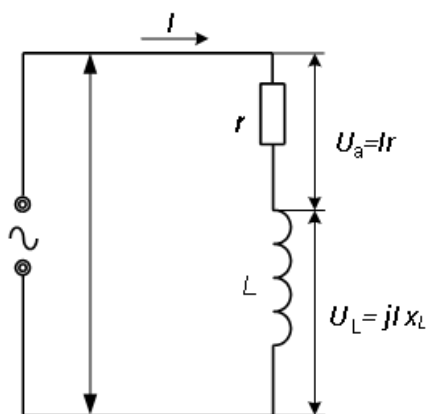


Рисунок 4.2 – Схема последовательного соединения R и L

Отношение потокосцепления катушки к току катушки i_L называется собственной индуктивностью или индуктивностью:

$$L = \frac{\psi}{i_L} = \frac{w \cdot \Phi}{i_L}$$

Если собственное потокоцепление пропорционально току (в случае катушки без стального сердечника), то $L = \text{const}$. Основной единицей измерения индуктивности является Генри (Гн):

$$1\text{Гн} = \frac{1\text{Вб}}{1\text{А}}, \quad 1\text{Гн} \cdot 10^{-3} = 1\text{мГн}$$

Если ток в катушке изменяется (например, по синусоидальному закону), то и потокоцепление катушки изменяется и поэтому в витках катушки по закону электромагнитной индукции наводится э.д.с. самоиндукции e_L :

$$e_L = -\frac{d\psi}{dt} = -L \frac{di_L}{dt}$$

т.е. наводимая э.д.с. e_L препятствует изменению тока i_L . Кроме того, катушка обладает некоторым активным сопротивлением r .

Применяя второй закон Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин, можно записать:

$$u + e_L = i \cdot r$$

отсюда напряжение на зажимах цепи равно

$$u = i \cdot r - e_L = u_a + u_L$$

Падение напряжения на активном сопротивлении называют активной составляющей напряжения или активным напряжением, а падение напряжения на индуктивном сопротивлении называют индуктивной составляющей напряжения. Мгновенные значения этих величин обозначают u_a и u , а действующие – соответственно U_a и U_L . При синусоидальном законе изменения тока напряжение на зажимах цепи будет равно:

$$\begin{aligned} u = ir - e_L &= rI_m \sin \omega t + L \frac{d(I_m \sin \omega t)}{dt} = rI_m \sin \omega t + \omega LI_m \cos \omega t = \\ &= U_{am} \sin \omega t + U_{Lm} \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right), \end{aligned}$$

т.е. между активным и индуктивным падениями напряжения имеется сдвиг по фазе на 90° .

Переходя к комплексной форме можно записать:

$$\dot{U} = \dot{U}_a + j\dot{U}_L = \dot{I}r + j\dot{I}x_L$$

где $j\dot{I}x_L = j\omega L\dot{I}$ - комплексное сопротивление индуктивного элемента;

$\dot{U}_a = \frac{U_{am}}{\sqrt{2}}$ и $\dot{U}_L = \frac{U_{Lm}}{\sqrt{2}}$ - действующие значения активного и индуктивного напряжений.

Таким образом, напряжение на зажимах цепи $\dot{U}$ можно представить в виде суммы двух синусоид $\dot{U}_a$ и $j\dot{U}_L$. Известно, что всякую синусоидально изменяющуюся величину можно представить в виде вектора (например, тока $\dot{I}$), вращающегося в пространстве с угловой частотой ω , проекция которого на мнимую ось и дает синусоидальную величину (рис. 4.3).

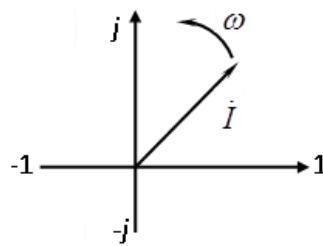


Рисунок 4.3 – Изображение синусоидально изменяющейся величины тока в виде вектора

Определим напряжения на зажимах цепи при помощи векторной диаграммы. Вектор тока $\dot{I}$ отложим в произвольном направлении, например, горизонтально (рис. 4.4). Все остальные векторы будут жестко привязаны к вектору $\dot{I}$, т.е. их сдвиг по фазе будет строго определенным.

Вектор активного напряжения $\dot{U}_a = \dot{I} \cdot r$ будет совпадать по направлению с вектором $\dot{I}$. Вектор индуктивной составляющей напряжения $\dot{U}_L = j \cdot \dot{I} \cdot x_L$ будет опережать на 90° вектор $\dot{I}$. Складывая геометрически векторы $\dot{U}_a$ и $\dot{U}_L$, получим вектор напряжения $\dot{U}$ на зажимах цепи.

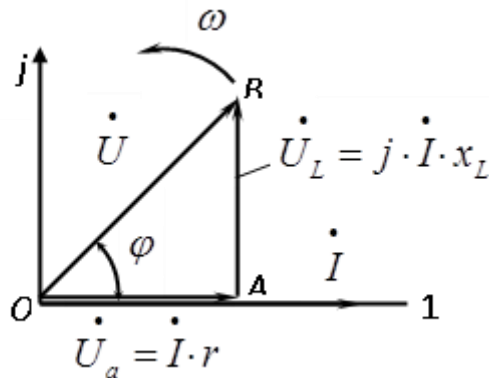


Рисунок 4.4 – Векторная диаграмма при последовательном соединении R и L

Величина $x_L = \omega \cdot L = 2\pi \cdot f \cdot L$ называется *индуктивным сопротивлением* и измеряется в Ом. Сопротивление x_L зависит от частоты и при включении катушки индуктивности в цепь постоянного тока ($f = 0$) ток катушки будет ограничен только ее активным сопротивлением и окажется намного больше. Поэтому катушки индуктивности, предназначенные для работы на переменном токе, нельзя включать в цепи постоянного тока.

Треугольник ОАВ (рис. 4.4) прямоугольный и называется треугольником напряжений. Из треугольника ОАВ имеем:

$$\dot{U}^2 = \dot{U}_a^2 + \dot{U}_L^2$$

$$\dot{U}^2 = (\dot{I} \cdot r)^2 + (\dot{I} \cdot x_L)^2 = I^2 (r^2 + x_L^2)$$

Извлекая из обеих частей корень, получим

$$U = I \cdot \sqrt{r^2 + x_L^2}$$

Величина $\sqrt{r^2 + x_L^2}$, имеющая размерность сопротивления, называется полным сопротивлением цепи и обозначается z :

$$z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$$

и закон Ома для цепи переменного тока имеет вид:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{z} \text{ и } \dot{U} = \dot{I} z$$

Косинус угла сдвига фаз φ между током I и напряжением U равен:

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{I \cdot r}{I \cdot z} = \frac{r}{z}$$

Из треугольника мощностей, который можно получить из треугольника напряжений умножением его сторон на ток I , получим активную мощность:

$$P = I^2 r = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

Реактивная мощность:

$$Q = I^2 x_L = U \cdot I \cdot \sin \varphi$$

Полная мощность:

$$S = U \cdot I = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Отношение активной мощности к полной называется коэффициентом мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI}$$

Если цепь переменного тока обладает активным сопротивлением r и емкостью C (рис. 4.5), то по второму закону Кирхгофа для мгновенных значений электрических величин можно записать:

$$u = i \cdot r + u_c$$

где u – мгновенное значение приложенного к цепи напряжения;

i – мгновенное значение тока цепи;

u_c – мгновенное значение напряжения, приложенного к обкладкам конденсатора и представляющего собой падение напряжения на емкости.

Если ток изменяется во времени по синусоидальному закону, т.е. $i = I_m \sin \omega t$, то предыдущее уравнение будет иметь вид:

$$U = r I_m \sin \omega t + \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}).$$

Из этой формулы видно, что приложенное к цепи напряжение состоит из двух составляющих: активной или активного напряжения $u_a = r I_m \sin \omega t$ совпадающей по фазе с током, и реактивной или емкостной составляющей $U_c = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2})$, отстающей от тока на 90° (рис. 1.6). Тогда

$$\dot{U} = \dot{U}_a + \dot{U}_c$$

Построим векторную диаграмму для данного случая, пользуясь теми же правилами, как и при построении диаграммы для последовательного соединения r и L (см. рис. 4.4).

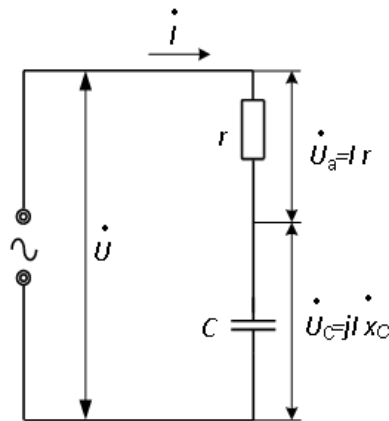


Рисунок 4.5 – Последовательное соединение R и C

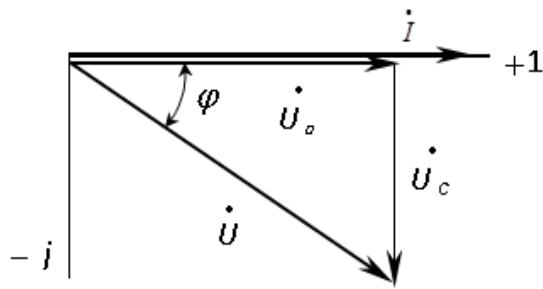


Рисунок 4.6 – Векторная диаграмма для последовательного соединения R и C

При этом необходимо иметь в виду, что вектор напряжения $\dot{U}_c$ отстает от тока $\dot{i}$ на 90° (рис 2.6).

Из треугольника OAB на рисунке 6 имеем:

$$U^2 = U_a^2 + U_c^2$$

или

$$U^2 = (Ir)^2 + \left(\frac{I}{\omega C}\right)^2 = I^2 \left(r^2 + \frac{1}{\omega C}\right)^2.$$

Извлекая квадратный корень из обеих частей, получим:

$$U = I \cdot \sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2},$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_C^2}}.$$

Величина $x_C = \frac{1}{\omega C}$ называется *емкостным сопротивлением* и измеряется в Ом.

Емкостное сопротивление зависит от частоты напряжения сети и от емкости конденсатора.

Величина $\sqrt{r^2 + x_C^2}$ называется *полным сопротивлением* и обозначается z . Закон Ома применительно к данной цепи переменного тока будет иметь вид:

$$I = \frac{U}{z},$$

где $z = \sqrt{r^2 + x_C^2}$.

Если все стороны треугольника напряжений OAB разделить на ток I , то получим

треугольник сопротивлений с катетами r и x_C и гипотенузой z .

При последовательном соединении r, L и C будут справедливы все выводы, полученные для цепи с $r-L$ и цепи с $r-C$. При этом возможны следующие комбинации:

$$\text{а) } x_L > x_C ; \text{б) } x_L < x_C ; \text{в) } x_L = x_C .$$

Рассмотрим с помощью векторных диаграмм каждый из этих вариантов.

а) Имеем цепь из последовательно соединенных r, L и C , причем

$x_L > x_C$. По всем трем сопротивлениям будет протекать один и тот же ток $\dot{I}$, вектор которого отложим в выбранном масштабе произвольно, например, горизонтально, т.е. направление первого вектора выбирается произвольно (рис. 4.7).

Вектор падения напряжения на активном сопротивлении будет совпадать с направлением тока, а падение напряжения на индуктивном элементе или $\dot{U}_L$ будет опережать вектор $\dot{I}$ на $\pi/2$. Падение напряжения на емкостном элементе $\dot{U}_C$ будет отставать от вектора тока на $\pi/2$ и согласно условию

$$\dot{U}_C < \dot{U}_L .$$

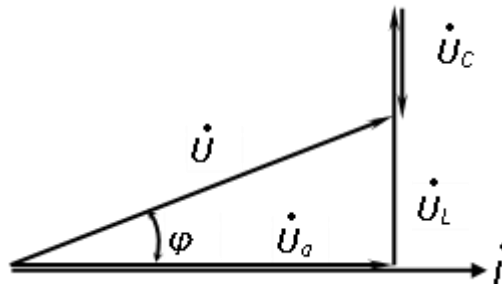


Рисунок 4.7 – Векторная диаграмма напряжений при $x_L > x_C$

Общее напряжение цепи будет равно сумме

$$\dot{U}_a + \dot{U}_L + \dot{U}_C = \dot{U} .$$

Из векторной диаграммы видно, что между током цепи $\dot{I}$ и напряжением $\dot{U}$ есть угол φ и ток имеет отстающий характер, а $\cos \varphi < 1,0$.

б) При $x_L < x_C$ падение напряжения на индуктивном сопротивлении будет меньше падения напряжения на емкостном сопротивлении, поэтому векторная диаграмма будет иметь вид (рис. 2.8):

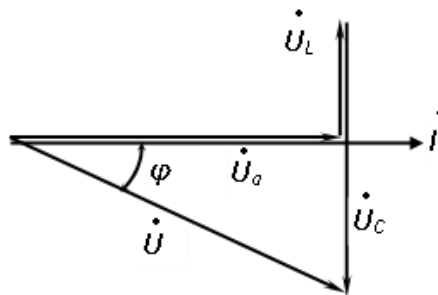


Рисунок 4.8 – Векторная диаграмма напряжений при $\dot{U}_C > \dot{U}_L$

в) При $x_L = x_C$ имеет место *резонанс напряжений*, т.е. $\dot{U}_C = \dot{U}_L$ и это будет при $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. При этом векторы $\dot{U}_L$ и $\dot{U}_C$ равны по модулю и противоположно направлены (рис. 4.9), поэтому их сумма равна нулю. Ток цепи при резонансе напряжений определяется только активным сопротивлением, поэтому угол сдвига фаз между током и напряжением цепи равен нулю, а $\cos \varphi = 1$. При этом надо иметь в виду, что результирующее сопротивление цепи резко уменьшится до значения $z = r$ и ток цепи при резонансе может резко возрастать.

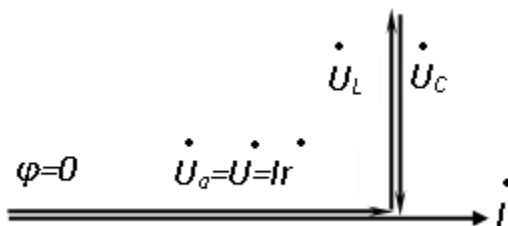


Рисунок 4.9 – Векторная диаграмма напряжений при резонансе

Задания:

Задание №1

Построить кривые изменения напряжения и тока во времени и начертить векторы, изображающие заданные синусоидальные функции

$$u(t) = 1008 \sin\left(157 * t + \frac{\pi}{10}\right); i(t) = 5 * \sin\left(157 * t - \frac{\pi}{8}\right)$$

Чему равен сдвиг фаз между напряжением и током? Определить период T и частоту ω .

Задание №2

Найти аналитически и при помощи векторной диаграммы сумму и разность синусоидальных токов. Найти аналитически их произведение и частное от деления.

$$i_1(t) = 100 * \sin(\omega t + 30^\circ)$$

$$i_2(t) = 120 * \sin(\omega t - 45^\circ)$$

$$i_1(t) = -20 * \sin(\omega t - 112^\circ)$$

$$i_2(t) = 50 * \sin(\omega t + 250^\circ)$$

$$i_1(t) = 50 * \sin(\omega t - 90^\circ)$$

$$i_2(t) = 25 * \sin(\omega t + 110^\circ)$$

Задание №3

Катушка с активным сопротивлением $R = 10$ Ом, индуктивностью $L = 0,05$ Гн подключена к источнику синусоидального напряжения (рисунок 4.10), действующее значение которого $U = 120$ В, $f = 50$ Гц. Определить полное сопротивление катушки, ток и сдвиг фаз между напряжением и током. Вычислить активную и реактивную составляющие напряжением на зажимах катушки. Построить векторную диаграмму напряжений и тока.

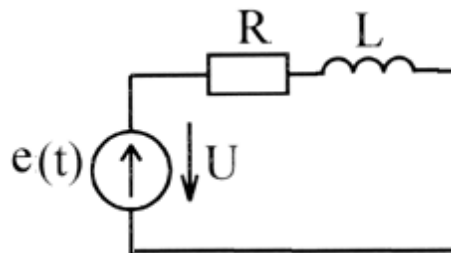


Рисунок 4.10 – Принципиальная схема

Задание №4

Найти мгновенные значения напряжения на всех участках и мгновенную мощность источника (рисунок 4.11). Дано: $J(t) = 2 * \sin(\omega t + 30^\circ)$, $f = 200$ Гц, $r = 10$ Ом, $L = 0.01$ Гн, $C = 80$ мкФ

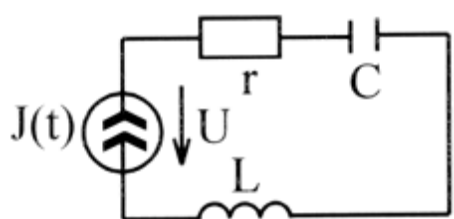


Рисунок 4.11 – Принципиальная схема

Контрольные вопросы:

1. Чем отличается переменный ток от постоянного?
2. Приведите основные характеристики синусоидального тока.
3. Как определяется действующее значения переменного тока?

4. Как изображается переменный ток на комплексной плоскости?
5. Приведите комплексные формы записи переменного тока.
6. Как аналитически и графически сложить (вычесть) два переменных тока?
7. Как аналитически умножить или разделить две комплексные величины?
8. Как определяется и что показывает мгновенная мощность?
9. Как определяется индуктивное сопротивление? Емкостное?

Практическая работа №9. Расчёт электрических цепей переменного тока. Расчёт однофазных цепей синусоидального тока.

Цель: Получить навыки расчета разветвленных однофазных цепей синусоидального тока различными методами как в обычных режимах, так и в режиме резонанса, научиться сопровождать расчеты векторными и топографическими диаграммами.

Основы теории:

В электрических цепях переменного синусоидального тока токи и напряжения всех ветвей изменяются во времени по синусоидальному закону. Общий вид этого закона для силы тока следующий (рис. 5.1)

Данное выражение для силы тока в каждый момент времени называется мгновенным значением тока. Величина I_m называется амплитудой, она равна максимальному значению тока.

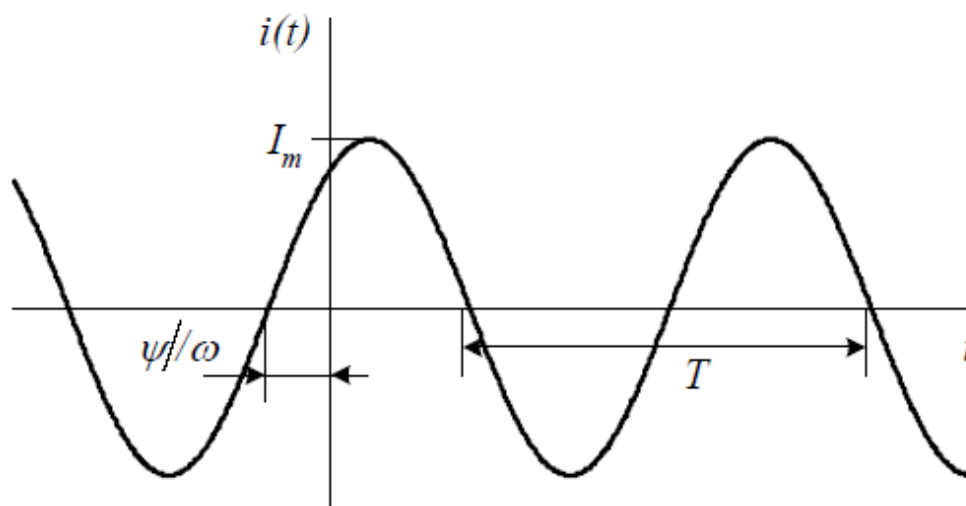


Рисунок 4.10 – Зависимость мгновенного значения тока от времени

Период синусоидальной функции T определяется частотой синусоидальных колебаний $f=1/T$. Круговая или циклическая частота связана с угловой частотой. Начальная фаза ψ определяет сдвиг синусоиды относительно оси ординат.

В цепях синусоидального тока присутствует источник синусоидального тока или напряжения. Может быть несколько источников одинаковой частоты. Если в цепи несколько источников синусоидального тока или напряжения с разными частотами, токи и напряжения цепи не будут синусоидальными, и, следовательно, цепь не будет являться цепью синусоидального тока. В данном разделе такие цепи не рассматриваются.

Таким образом, в цепях синусоидального тока переменные состояния (токи и напряжения всех ветвей) изменяются во времени по синусоидальному закону с одной и той же частотой, но каждая со своей начальной фазой и амплитудой. Эти две характеристики позволяют задать значение тока или напряжения в любой момент времени.

Задания:

Задание №1

Для электрической цепи однофазного переменного тока схема, которой представлена на рисунке 5.2. Записать уравнения по законам Кирхгофа в дифференциальной форме. Найти токи ветвей методом контурных токов и узловых потенциалов, напряжения на участках цепи, активную, реактивную и полную мощности, а также построить векторную диаграмму токов и напряжений. Определить показание измерительных приборов. Дано $e_1(t) = e_2(t) = 20 * \sqrt{2} \sin(314 * t)$, $C_1 = C_2 = 318.5$ мкФ, $R_2 = 10$ Ом, $L_2 = 16$ мГн, $R_3 = 10$ Ом.

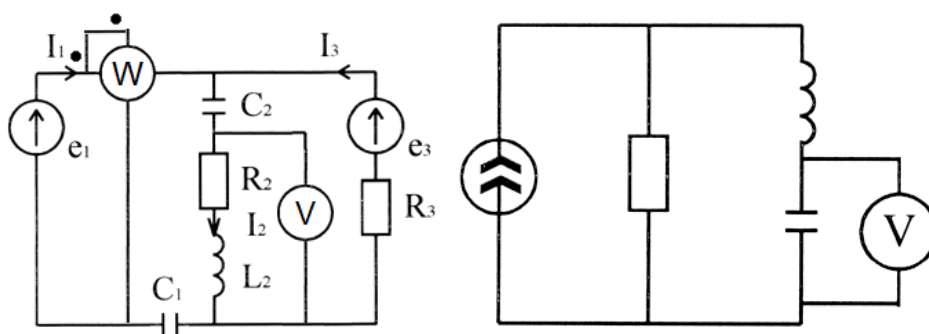


Рисунок 5.2 – Принципиальная схема

Задание №2

Для электрической цепи, схема которой представлена на рисунке 5.3 с параметрами $X_1 = 20$ Ом, $X_2 = 20$ Ом, $X_C = 10$ Ом, $X_1 = 20$ Ом, $R = 40$ Ом, $X_M = 10$ Ом, $E = 200$ В. Определить показание вольтметра. (97 В)

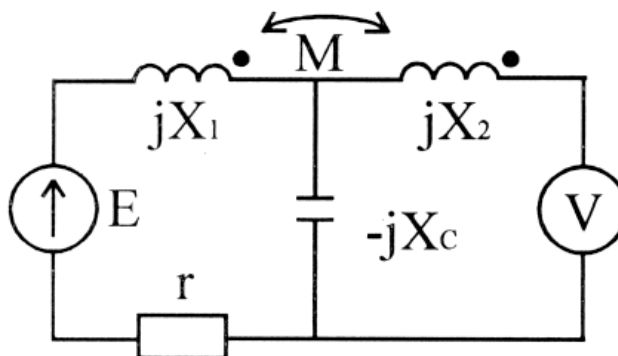


Рисунок 5.3 – Принципиальная схема

Контрольные вопросы:

1. Если цепь разветвленная, то как соединятся параметры цепи?
2. Чему равны токи ветвей для такой цепи?
3. Как определяют общий ток цепи?
4. Чему равны активные и реактивные составляющие токов ветвей для такой цепи?
5. Что называют векторной диаграммой?
6. Объяснить построение векторной диаграммы для такой цепи
7. Как выбирается масштаб для данной векторной диаграммы?
8. Чему равны активная, реактивная и полная мощность для данной цепи?
9. Чему равен активный коэффициент мощности цепи?
10. Какой ток называют переменным?
11. Если цепь неразветвленная, то как соединяются параметры цепи?
12. Как ведет себя напряжение на участке с активным сопротивлением по отношению к току?
13. Чему равно мгновенное напряжение на участке с индуктивностью?
14. Чему равно мгновенное напряжение на участке с емкостью?
15. Что называют векторной диаграммой?
16. Чему равно полное сопротивление для такой цепи?
17. Как определяются реактивные сопротивления на индуктивности и на емкости?
18. Чему равны активный и реактивный коэффициенты мощности цепи?

Практическая работа №10. Трёхфазные цепи. Расчет симметричных трехфазных цепей.

Цель: Получить навыки расчета трехфазных цепей синусоидального тока при симметричной нагрузке.

Основы теории:

Трехфазной системой электрических цепей называется система, состоящая из трех однофазных электрических цепей, в каждой из которых действуют синусоидальные э.д.с. одинаковой частоты, но сдвинутые друг относительно друга на $1/3$ периода (120°) и создаваемые общим (трехфазным) источником электрической энергии.

Отдельные электрические цепи, входящие в состав трехфазной системы, называют *фазами*. Если э.д.с. каждой из фаз равны по величине, а полные сопротивления нагрузок всех трех фаз по величине и характеру нагрузки (по величине и знаку фазового сдвига) одинаковы, то такой режим называют *симметричным*. Невыполнение данных условий является причиной *несимметричного* режима. Нагрузка трехфазных цепей редко бывает симметричной, как правило, она в той или иной степени несимметрична из-за наличия однофазных потребителей.

Трехфазные генераторы создают симметричную систему э.д.с., поэтому несимметричный режим возникает из-за несимметричной нагрузки фаз. Если концы обмоток фаз синхронного генератора или трансформатора соединить вместе звездой, а к началам присоединить провода, идущие к приемникам электрической энергии, которые тоже соединить звездой, то получим трехфазную систему (рис. 1). Провод, соединяющий нулевые точки источника и потребителя называется нулевым. Такую систему называют *четырёхпроводной*. В цепях трехфазного тока независимо от способа соединения обмоток генератора и потребителей различают напряжения – линейные U_L и фазные U_ϕ , а также токи – линейные I_L и фазные I_ϕ . Напряжение между линейным и нулевым проводом называется *фазным*, а между линейными проводами – *линейным*. Токи, протекающие в линейных проводах, называют *линейными*, а протекающие в фазах нагрузки или источника – *фазными*. В схеме (рис. 6.1) линейные токи равны фазным, т.е. линейный ток одновременно является и фазным. При равномерной нагрузке $U_L = \sqrt{3}U_\phi$, если схема соединения - звезда.

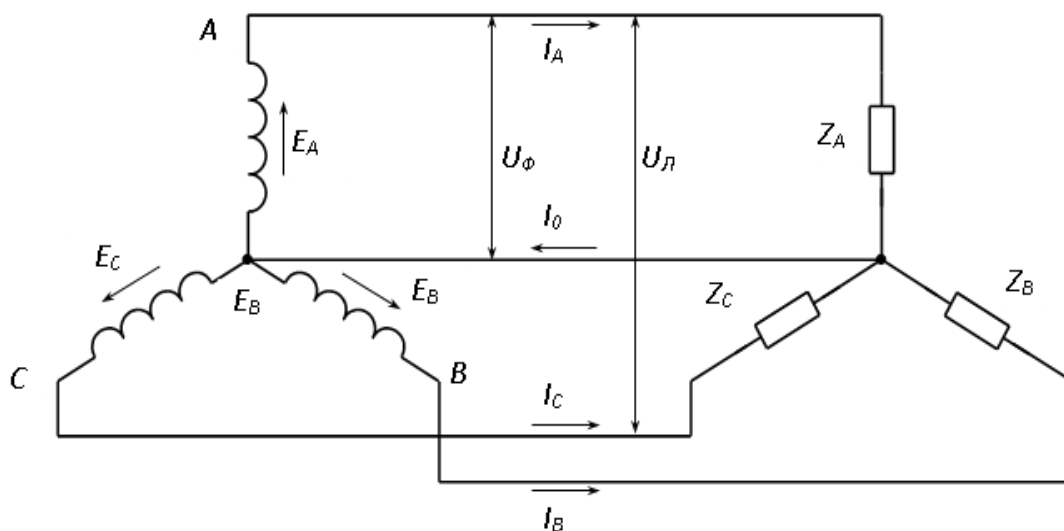


Рисунок 6.1 – Схема трехфазной четырехпроводной цепи при соединении звездой

При неравномерной нагрузке фаз в схеме с нулевым проводом (рис. 6.1), в нулевом проводе появляется ток, величина которого определяется по первому закону Кирхгофа:

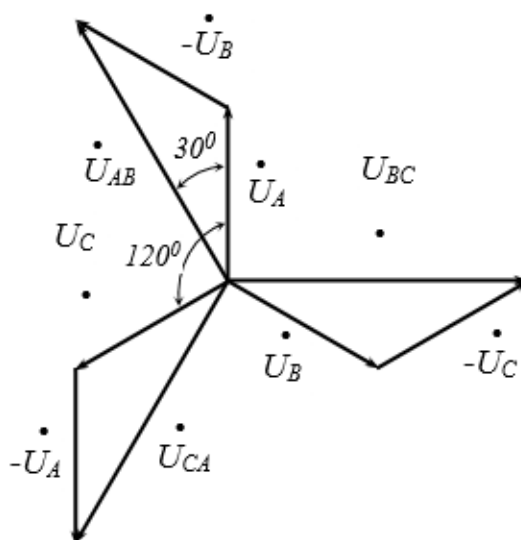


Рисунок 6.2 – Векторная диаграмма напряжений при соединении звездой

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$$

Наличие тока в нулевом проводе вызывает незначительное падение напряжения в нем, которым можно пренебречь и считать, что между нулевой точкой источника и приемника разность потенциалов отсутствует.

На рис. 6.2 показано графическое определение линейных напряжений с помощью векторной диаграммы. Отложим для произвольного момента времени комплексы фазных напряжений, сдвинутые по фазе на 120° .

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B ,$$

$$\dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C ,$$

$$\dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A ,$$

Для получения линейных напряжений сложим геометрически векторы $\dot{U}_A$, $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ с векторами $-\dot{U}_B$, $-\dot{U}_C$, $-\dot{U}_A$, которые равны соответственно $\dot{U}_B$, $\dot{U}_C$, $\dot{U}_A$, но противоположно направлены.

Векторная диаграмма линейных напряжений также может быть получена из векторной диаграммы фазных напряжений (рис. 6.3). Таким образом, звезда линейных напряжений опережает звезду фазных на 30° . Найдем соотношение между фазными и линейными напряжениями, учитывая, что все напряжения симметричны:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_B = \dot{U}_C = \dot{U}_\Phi$$

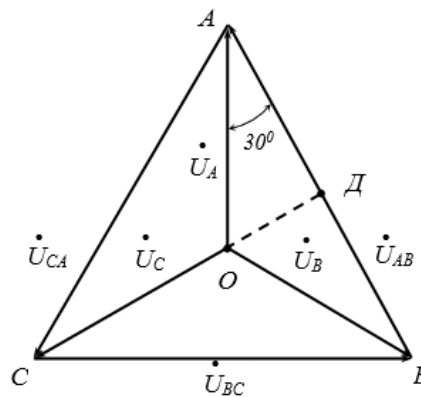


Рисунок 6.3 – Векторная диаграмма напряжений при соединении звездой
Из прямоугольного треугольника OAD имеем:

$$\begin{aligned} \frac{U_{\text{л}}}{2} &= \frac{U_{AB}}{2} = U_A \cdot \cos 30^\circ = \\ &= U_\Phi \cdot \cos 30^\circ = U_\Phi \frac{\sqrt{3}}{2} , \end{aligned}$$

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_\Phi$$

Фазные токи приемников определяются так же, как и в однофазных цепях:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{z_A} = \frac{\dot{U}_A}{\sqrt{r_A^2 + x_A^2}};$$

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{\dot{U}_B}{\sqrt{r_B^2 + x_B^2}};$$

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{\dot{U}_C}{\sqrt{r_C^2 + x_C^2}},$$

Углы сдвига между напряжениями и токами фаз можно определить из формул:

$$\cos \varphi_A = \frac{r_A}{Z_A}; \quad \cos \varphi_B = \frac{r_B}{Z_B}; \quad \cos \varphi_C = \frac{r_C}{Z_C}.$$

Если приемники обладают чисто активными сопротивлениями, то $Z_A = r_A$, $Z_B = r_B$, $Z_C = r_C$, а углы сдвига между токами и напряжениями во всех трех фазах будут нулевыми.

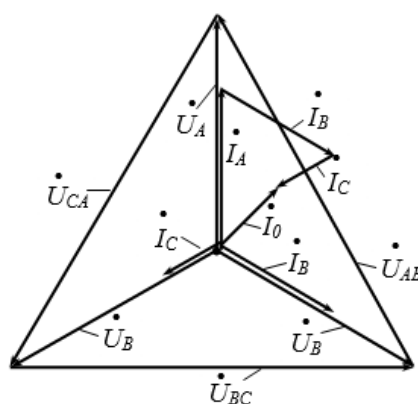


Рисунок 6.4 – Векторная диаграмма напряжений и токов четырехпроводной цепи при активной несимметричной нагрузке фаз

Ток нулевого провода $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$

Сечение нулевого провода зависит от степени несимметрии нагрузки фаз, но обычно его принимают равным 50% от сечения линейного провода.

При наличии нейтрали (нулевого провода) напряжения на фазах приемников остаются неизменными и равными фазным напряжениям источника даже при неравномерной нагрузке, если пренебречь сопротивлением проводов линии и нулевого провода. Предельным случаем неравномерной нагрузки фаз в четырехпроводной системе трехфазного приемника, включенного звездой, можно считать обрыв одной из фаз. Например, если фаза A будет оборвана, то не будет напряжения и тока у потребителя, включенного в эту фазу, а в оставшихся под напряжением фазах режим работы не изменится. Что касается нулевого провода, то если до обрыва одной из фаз ток был равен $\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ (рис. 4.4), то теперь он изменится и будет определяться по первому закону Кирхгофа: $\dot{I}_0 + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, откуда $\dot{I}_0 = -\dot{I}_B - \dot{I}_C$ (рис. 6.5)

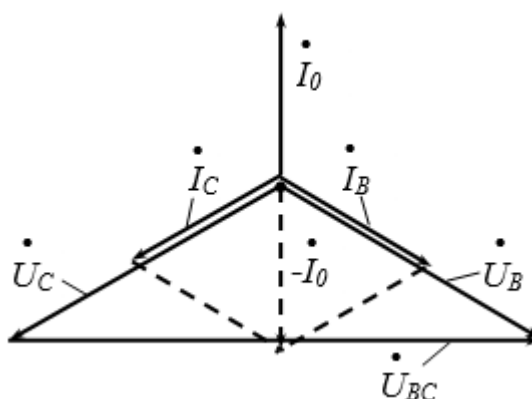


Рисунок 6.5 – Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве фазы А

При обрыве или отсутствии в схеме нулевого провода энергетические соотношения в этой цепи изменятся.

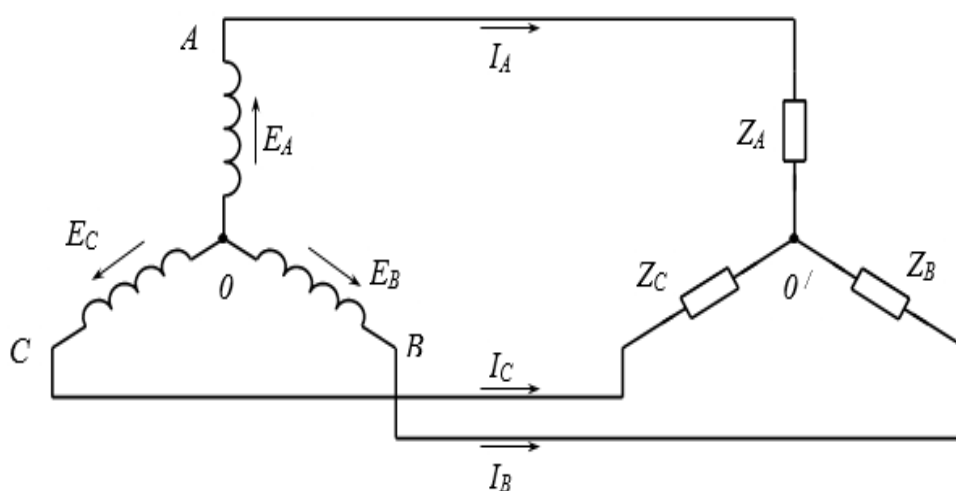


Рисунок 6.6 – Схема трехпроводной цепи трехфазного тока

При симметричной нагрузке в трехпроводной трехфазной системе (рис. 6.6) напряжение между нулевыми точками источника и приемника равно нулю и каждую фазу системы можно рассматривать как замкнутый контур.

При неравномерной нагрузке и отсутствии нулевого провода фазные напряжения будут изменяться прямо пропорционально сопротивлениям фаз. Если бы система была четырехпроводной, то по нулевому проводу протекал бы ток I_0 и таким образом практически выравнивались бы фазные напряжения. На рис. 4.7 изображена векторная диаграмма напряжений и токов при неравномерной нагрузке всех трех фаз и отсутствии нулевого провода.

Треугольник линейных напряжений остается таким же, а звезда фазных напряжений и точка O' могут быть легко получены методом засечек из вершин линейных напряжений.

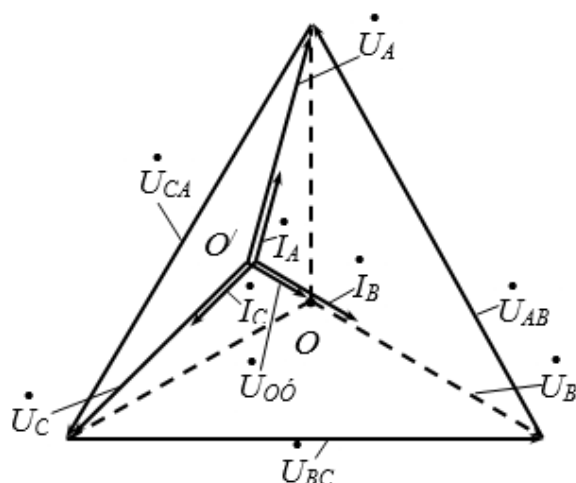


Рисунок 6.7 – Векторная диаграмма токов и напряжений при неравномерной нагрузке и отсутствие нулевого провода

Если одна из фаз, например, А, оборвется или все потребители этой фазы будут выключены, то при отсутствии нулевого провода оставшиеся под напряжением фазы В и С окажутся включенными последовательно. Фазные токи $\dot{I}_B$ и $\dot{I}_C$, протекающие через последовательно включенные сопротивления приемника, в этом случае будут одинаковыми, а фазные напряжения будут пропорциональны сопротивлениям фаз (рис. 4.8). Поэтому на векторной диаграмме точка O' переместится на вектор линейного напряжения $\dot{U}_{BC}$ и будет делить его на части, равные фазным напряжениям $\dot{U}_B$ и $\dot{U}_C$ (в нашем случае $\dot{U}_B = \dot{U}_C$)

$$\dot{U}_C = \dot{U}_B = \frac{1}{2} \dot{U}_L = \frac{1}{2} \sqrt{3} \dot{U}_\phi = 0,87 \dot{U}_\phi$$

Напряжение фазы А возрастет:

$$\dot{U}_A = \dot{U}_{AB} \cdot \cos 30^\circ = \sqrt{3} \dot{U}_\phi \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 1,5 \dot{U}_\phi$$

Поэтому в четырехпроводных цепях на нулевой провод не ставят предохранитель, т.к. его перегорание изменяет распределение напряжений фаз.

При коротком замыкании какой-либо фазы, например, С, нулевая точка O' приобретает потенциал линейного провода ВС, а фазы А и В оказываются под линейным напряжением. Векторная диаграмма для этого случая представлена на рис. 6.9. Точка O' перемещается в точку С.

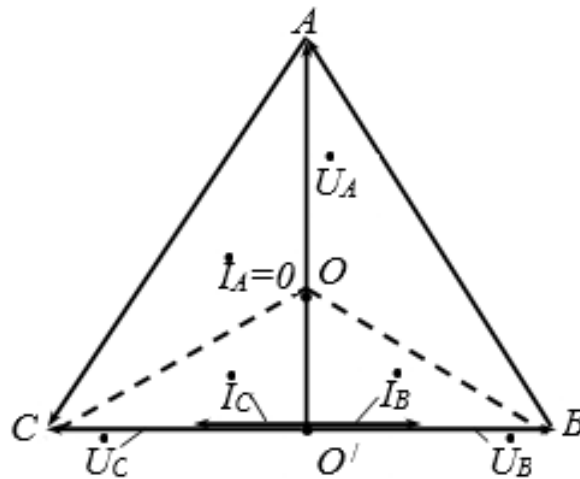


Рисунок 6.8 – Векторная диаграмма токов и напряжений при обрыве фазы в схеме без нулевого провода

Напряжения фаз A и B становятся равными линейным (рис. 4.9):

$$U_A = U_{CA} = U_L = U_\phi \cdot \sqrt{3},$$

$$U_B = U_{BC} = U_L = U_\phi \cdot \sqrt{3},$$

$$U_C = 0.$$

Ток короткого замыкания фазы C распределяется на фазы B и A, т.е. $I_C = I_K = -(I_A + I_B)$. Таким образом, две фазы приемника оказываются под линейным напряжением, на которое они не рассчитаны, и они могут выйти из строя.

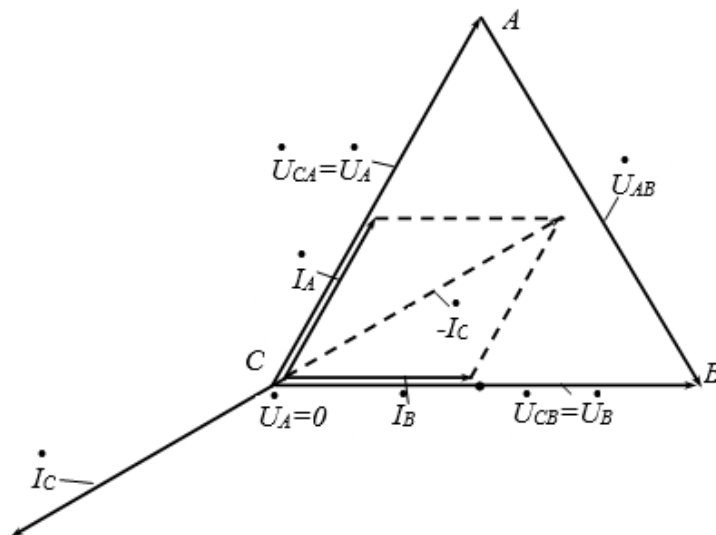


Рисунок 6.9 – Векторная диаграмма токов и напряжений при замыкании фазы C приёмника трёхпроводной системе

В цепи трехфазного тока активная мощность равна сумме активных мощностей фаз:

$$P = P_A + P_B + P_C = I_A \cdot U_A \cdot \cos \varphi_A + I_B \cdot U_B \cdot \cos \varphi_B + I_C \cdot U_C \cdot \cos \varphi_C$$

Для измерения мощности в четырехпроводной цепи можно использовать три однофазных ваттметра, суммируя их показания, или использовать однофазный ваттметр с переключением его поочередно во все три фазы. Этот метод может быть использован как при симметричной, так и при несимметричной нагрузке.

Расчёт симметричных трёхфазных цепей сводится по сути к расчёту одной фазы по однолинейной эквивалентной схеме. В двух других фазах будут такие же по величине токи и напряжения, как в первой, но сдвинуты по фазе относительно них на угол 120° .

Задания:

Задание №1

К симметричной трёхфазной цепи с напряжением $U = 380 \text{ В}$ подключен симметричный приёмник, фазы которого соединены в «звезду», сопротивления фаз $r = 12 \text{ Ом}$, $x = 16 \text{ Ом}$.

Найти показания приборов, построить векторную диаграмму цепи.

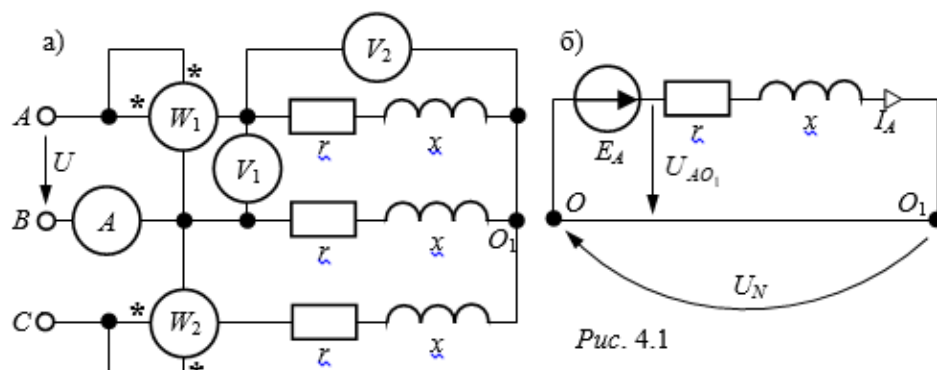


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Рассчитать симметричный режим соединения в звезду, если $r = 40 \text{ Ом}$, $x = 80 \text{ Ом}$, напряжение сети $U = 380 \text{ В}$. Построить векторную диаграмму цепи.

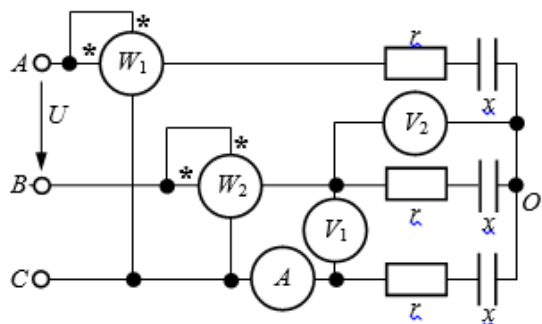


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

К источнику с линейным напряжением $U = 660 \text{ В}$ через реакторы с сопротивлением $x_0 = 25 \text{ Ом}$ подключены: электродвигатель, каждая фаза которого имеет сопротивление $r = x = 50 \text{ Ом}$ при соединении звездой; трёхфазный масляный конденсатор, используемый для повышения коэффициента мощности установки, фазы которого соединены в треугольник и имеют сопротивление $x_C = 300 \text{ Ом}$.

Определить напряжение на зажимах двигателя и его мощность. Найти потерю напряжения.

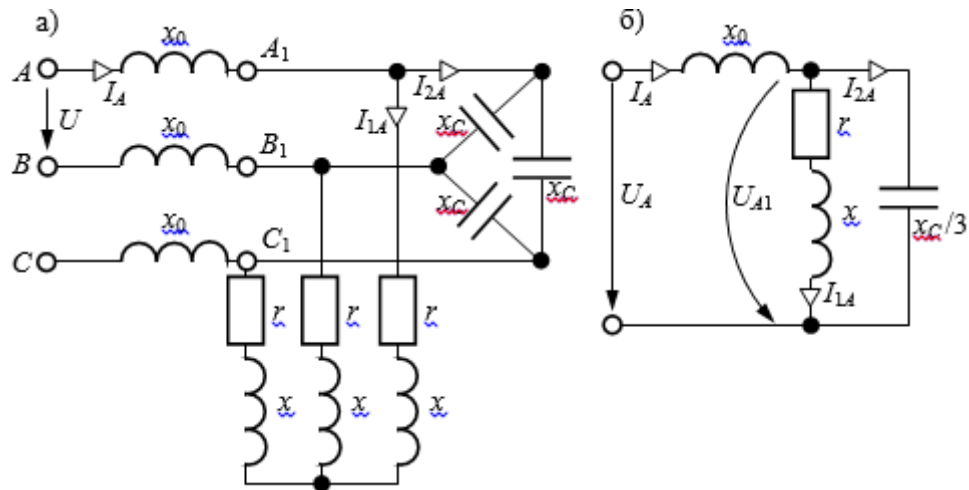


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

Напряжение симметричной трёхфазной сети $U = 380 \text{ В}$. Параметры приведенной схемы $\underline{Z}_1 = 1,5 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2 = 1 + j2 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_3 = -j6 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_4 = 21 + j12 \text{ Ом}$. Определить линейные и фазные токи приёмников. Найти линейные и фазные напряжения каждого приёмника.

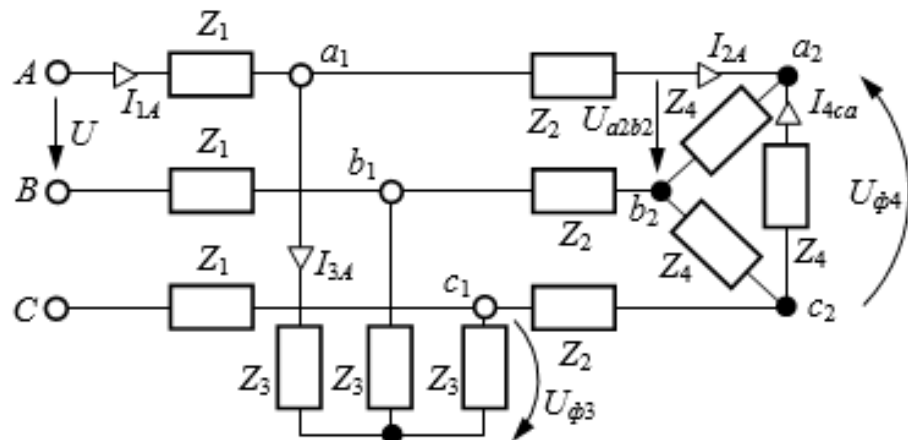


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Что означает симметричный трехфазный источник электрической энергии?
2. Что означает несимметричный трехфазный источник?
3. Перечислите способы соединения обмоток трехфазного источника.
4. Что такое нейтральный провод?
5. Какое напряжение называется фазным, линейным?

Практическая работа №11. Трёхфазные цепи. Расчет несимметричных трехфазных цепей.

Цель: Получить навыки расчета трехфазных цепей синусоидального тока при несимметричной нагрузке.

Основы теории:

Теория трёхфазных систем начинается с введения понятий: симметричные системы ЭДС, напряжений, токов; несимметричные системы ЭДС, напряжений, токов.

Краткий перечень названий ЭДС, напряжений, токов следующий:

- фазные ЭДС E_A, E_B, E_C соответствующих фаз генератора AX, BY, CZ ;
- фазные токи I_{AX}, I_{BY}, I_{CZ} ;
- фазные напряжения U_{AX}, U_{BY}, U_{CZ} ;
- линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} ;
- линейные токи I_A, I_B, I_C ;
- ток нейтрали (нулевого провода) I_N ;
- напряжение смещения нейтрали U_N или $U_{O'O}$ (между нулевыми точками генератора и приёмника).

Соответственно, различают активные, реактивные, полные мощности фаз $P_A, P_B, P_C, Q_A, Q_B, Q_C, S_A, S_B, S_C$, а также активную P , реактивную Q и полную S мощности трёхфазных приёмников (или генератора), причём

$$P = P_A + P_B + P_C, \text{ Вт}; \quad Q = Q_A + Q_B + Q_C, \text{ вар}; \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \text{ ВА}.$$

Трёхфазные цепи со *статической нагрузкой*, то есть не содержащие электродвигателей, трансформаторов и других активных элементов рассчитываются, как правило, комплексным методом. Их расчёт обычно сопровождается построением векторных или топографических диаграмм, которые предостерегают от возможных ошибок аналитических расчётов, делают все соотношения более наглядными.

Если в трёхфазной системе имеются устройства, сопротивления фаз которых зависят от системы токов (трёхфазные трёхстержневые трансформаторы, асинхронные или синхронные электродвигатели или генераторы, или хотя бы одно из таких устройств, мощность которого соизмерима с мощностью всей трёхфазной системы), то для расчёта несимметричного режима таких трёхфазных цепей применяют специальный метод расчёта – *метод симметричных составляющих*, который по сути своей является разновидностью метода наложения.

Задания:

Задание №1

Рассчитать токи несимметричного треугольника, построить векторную диаграмму, если $U = 380 \text{ В}$, $r = x_C = 100 \text{ Ом}$, $x_L = 100\sqrt{2} \text{ Ом}$. Найти показания ваттметров, сравнить их с активной мощностью несимметричного трёхфазного приёмника.

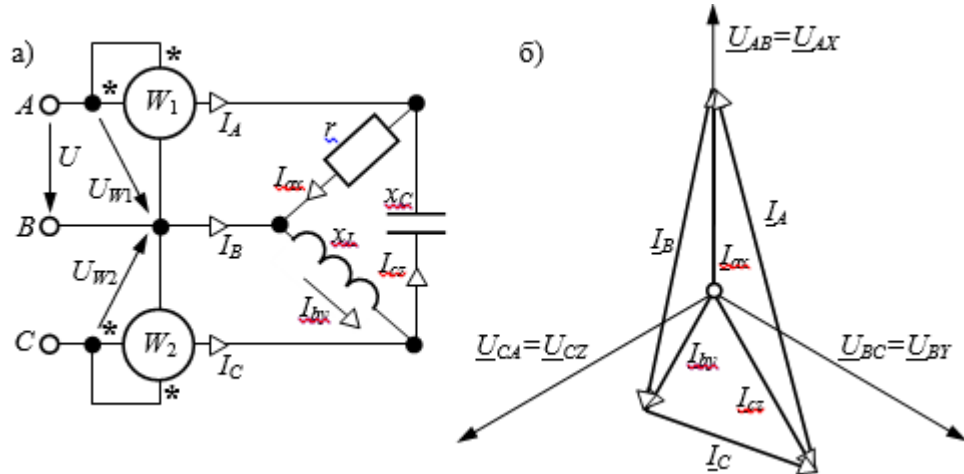


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Схема питается от симметричного источника, фазы которого соединены в треугольник. Считая источник питания идеальным, фазную ЭДС $E_{AX} = 380 \text{ В}$, найти фазные токи генератора.

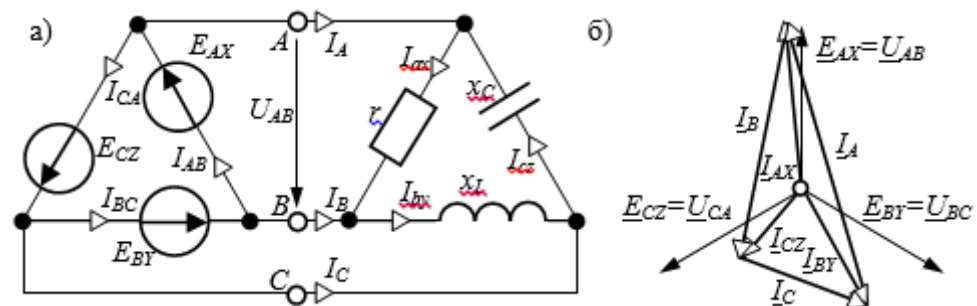


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

Трёхфазная цепь подключена к симметричному генератору с напряжением $U = 660 \text{ В}$. Параметры цепи $r = \frac{1}{\omega C} = 10 \text{ Ом}$, $r_1 = \omega L_1 = 5 \text{ Ом}$.

Рассчитать линейные и фазные токи всех участков цепи.

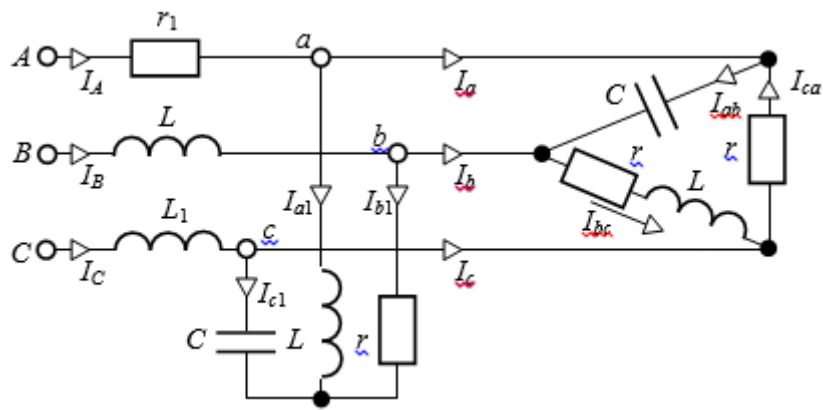


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

В схеме определить токи во всех ветвях, если показания вольтметров: $U_1 = 220 \text{ В}$, $U_2 = 127 \text{ В}$, $U_3 = 191,3 \text{ В}$, а $Z_1 = 3 + j4 \text{ Ом}$, $R = 20 \text{ Ом}$, $x_L = 30 \text{ Ом}$, $x_M = 25 \text{ Ом}$, $x_C = 40 \text{ Ом}$. Рассчитать показания ваттметров и сравнить их с тепловыми потерями в треугольнике нагрузки

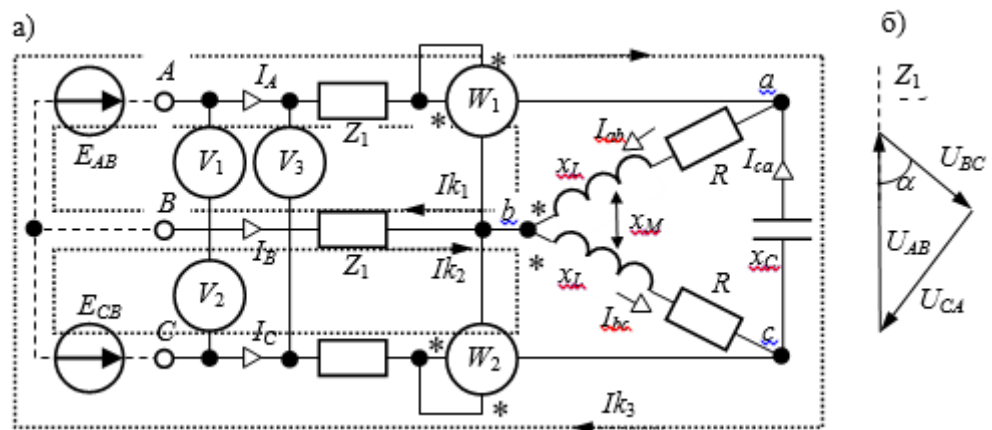


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Что означает симметричная и несимметричная нагрузка?
2. Что такое напряжение смещения нейтрали?
3. Как определить ток в нейтральном проводе при симметричной нагрузке?
7. Чему равна мощность трехфазной системы в симметричном режиме?
5. Что такое одно-, двух- и трехфазное короткое замыкание?

Практическая работа №12. Симметричные составляющие несимметричной трехфазной системы. Расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих.

Цель: Освоить навыки применения расчет трехфазных электрических цепей методом симметричных составляющих

Основы теории:

Сущность метода заключается в представлении несимметричной системы величин $\underline{A}$, $\underline{B}$, $\underline{C}$ в виде суммы трёх симметричных систем: прямой $\underline{A}_1$, $\underline{B}_1$, $\underline{C}_1$, имеющей такую же последовательность, как и исходные величины, обратной $\underline{A}_2$, $\underline{B}_2$, $\underline{C}_2$, имеющей противоположную последовательность, и нулевой последовательности, состоящей из трёх одинаковых по величине и направлению векторов $\underline{A}_0$.

Определение симметричных составляющих производится по формулам:

$$\underline{A}_0 = \frac{1}{3} (\underline{A} + \underline{B} + \underline{C}), \quad \underline{A}_1 = \frac{1}{3} (\underline{A} + a \cdot \underline{B} + a^2 \cdot \underline{C}), \quad \underline{A}_2 = \frac{1}{3} (\underline{A} + a^2 \cdot \underline{B} + a \cdot \underline{C}),$$

где $a = e^{j120^\circ}$ – фазный множитель.

Сопротивления приёмника токам различных последовательностей называются сопротивлением прямой последовательности $\underline{Z}_1$, обратной последовательности $\underline{Z}_2$ и нулевой последовательности $\underline{Z}_0$. Для схемы Y–Y они имеют значения

$$\underline{Z}_1 = \underline{Z}_2 = \underline{Z}, \quad \underline{Z}_0 = \underline{Z} + 3\underline{Z}_N,$$

где $\underline{Z}$ – сопротивление фазы приёмника, $\underline{Z}_N$ – сопротивление нейтрали.

Для асинхронного двигателя характерно такое соотношение:

$$\underline{Z}_1 \gg \underline{Z}_0 \gg \underline{Z}_2.$$

Расчёт симметричных цепей с несимметричным источником состоит из трёх этапов: разложение заданной несимметричной системы на симметричные составляющие; расчёт токов каждой из последовательностей в отдельности; суммирование токов всех последовательностей.

Расчёт аварийных режимов (КЗ, обрыв фазы) симметричных цепей производится следующим образом: в месте аварии вводятся системы трёх несимметричных напряжений $\underline{U}_A$ – $\underline{U}_B$ – $\underline{U}_C$ и трёх несимметричных токов $\underline{I}_A$ – $\underline{I}_B$ – $\underline{I}_C$. Каждая из этих систем раскладывается на симметричные составляющие $\underline{U}_1$ – $\underline{U}_2$ – $\underline{U}_0$, $\underline{I}_1$ – $\underline{I}_2$ – $\underline{I}_0$. Далее рассматриваются схемы прямой, обратной и нулевой последовательностей, для каждой из которых составляются уравнения, связывающие $\underline{U}_1$ с $\underline{I}_1$, $\underline{U}_2$ с $\underline{I}_2$ и $\underline{U}_0$ с $\underline{I}_0$. Еще три уравнения составляются для аварийного

участка и их вид определяется видом аварии. Решение этих уравнений даёт $\underline{U}_1$, $\underline{U}_2$, $\underline{U}_0$, $\underline{I}_1$, $\underline{I}_2$, $\underline{I}_0$, через которые могут быть определены все интересующие нас величины.

Задания:

Задание №1

Две фазы генератора замкнуты накоротко (рис. 4.39). Его сопротивления прямой последовательности $\underline{Z}_1 = j8 \text{ Ом}$, обратной последовательности $\underline{Z}_2 = j2 \text{ Ом}$, фазная ЭДС $E = 100 \text{ В}$. Определить показания приборов.

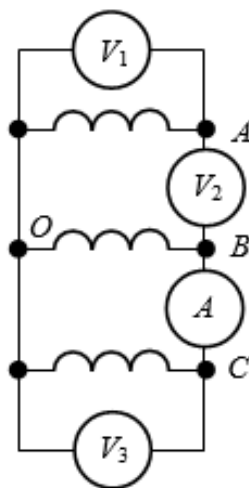


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Для ограничения пусковых токов двигателя М (номинальное линейное напряжение $U = 380 \text{ В}$, сопротивления прямой и обратной последовательности, соответственно, $\underline{Z}_1 = 1 + j22 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_2 = 1 + j8 \text{ Ом}$) последовательно с ним включаются три сопротивления (реакторы) $\underline{Z} = j20 \text{ Ом}$, которые после пуска закорачиваются.

Вследствие неисправности выключателя одно из сопротивлений после пуска осталось включенным (рис. 4.40). Определить отношение токов I_2/I_1 (обратной и прямой последовательностей).

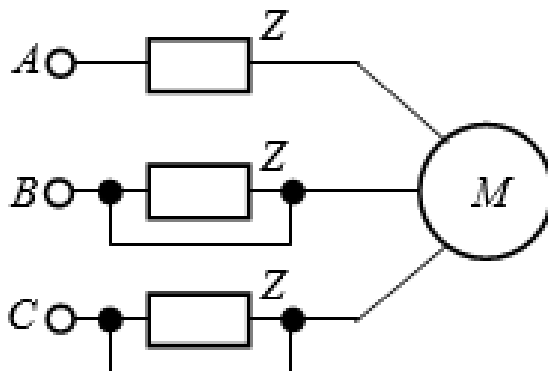


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

Генератор с сопротивлениями для разных последовательностей $Z_{Г1} = j8 \text{ Ом}$, $Z_{Г2} = j2 \text{ Ом}$, $Z_{Г0} = j0,5 \text{ Ом}$, обмотки которого соединены в звезду с нейтралью, заземлённой через сопротивление $Z_{ЗГ} = 1 + j2 \text{ Ом}$, вырабатывает фазные напряжения $U_\phi = 220 \text{ В}$, которые образуют симметричную трёхфазную систему, и питает через линию с сопротивлениями $Z_{Л1} = Z_{Л2} = 1 + j2 \text{ Ом}$, $Z_{Л0} = 1 + j4 \text{ Ом}$ синхронный двигатель, обмотки которого имеют сопротивления $Z_{Д1} = j12 \text{ Ом}$, $Z_{Д2} = j4 \text{ Ом}$, $Z_{Д0} = j1 \text{ Ом}$, соединены в звезду, нейтраль которой заземлена через сопротивление $Z_{ЗД} = 2 + j1 \text{ Ом}$ (рис. 4.41).

Определить ток линии в симметричном режиме, токи проводов B и C при обрыве провода A и напряжение в месте обрыва

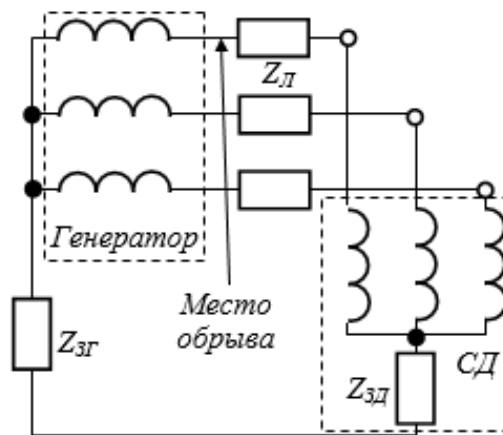


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

В конце линии (рис. 4.44) фаза A замкнулась на землю. Фазная ЭДС генератора $E = 20 \text{ кВ}$, сопротивления различных последовательностей: генератора $Z_{Г1} = j9 \text{ Ом}$, $Z_{Г2} = j1 \text{ Ом}$, $Z_{Г0} = j0,5 \text{ Ом}$; линии $Z_{Л1} = Z_{Л2} = j1 \text{ Ом}$, $Z_{Л0} = j2 \text{ Ом}$; нагрузки $Z_{НГ1} = j10 \text{ Ом}$, $Z_{НГ2} = j2 \text{ Ом}$; сопротивление заземления нулевой точки генератора $Z_N = j0,5 \text{ Ом}$. Определить:

- 1) токи во всех фазах генератора и нагрузки;
- 2) напряжения по отношению к земле зажимов генератора и нагрузки.

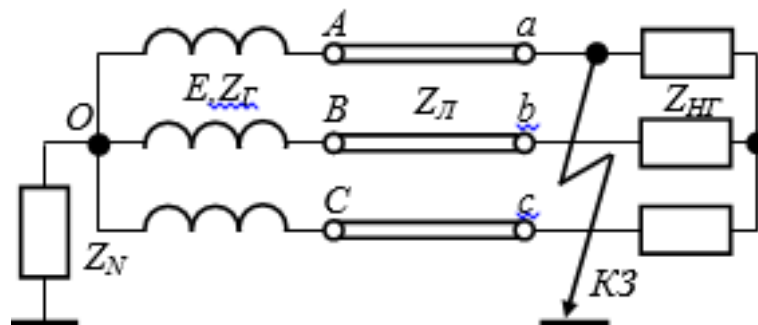


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Задание №5

От симметричного трёхфазного генератора питаются асинхронный и синхронный двигатели. Фазная ЭДС генератора $E = 220 \text{ В}$, сопротивления различных последовательностей: генератора $\underline{Z}_{G1} = j0,6 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{G2} = j0,1 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{G0} = j0,05 \text{ Ом}$; асинхронного двигателя $\underline{Z}_{D1} = 3 + j0,4 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{D2} = 0,05 + j0,1 \text{ Ом}$; синхронного двигателя $\underline{Z}_{C1} = 4 + j0,5 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{C2} = 0,1 + j0,2 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_{C0} = 0,1 + j0,1 \text{ Ом}$; сопротивление заземления нулевой точки генератора и синхронного двигателя – $\underline{Z}_{NG} = \underline{Z}_{NC} = 0,1 \text{ Ом}$. Определить: токи двухфазного на землю металлического замыкания проводов B и C , суммарный ток короткого замыкания, напряжение на здоровой фазе A .

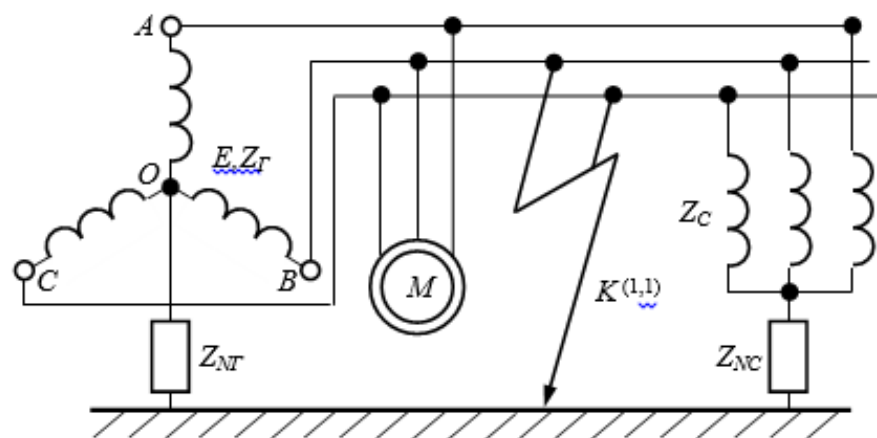


Рисунок 5 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. К чему приводят повреждения и аварии в энергетических системах?
2. На какие две группы делят несимметрию?
3. К чему позволяет привести задачу метод симметричных составляющих?
4. Из чего состоит система нулевой последовательности?
5. Любую ли несимметричную систему трёхфазных напряжений, токов, ЭДС можно представить как результат наложения систем прямой, обратной и нулевой последовательностей?
6. Если каким-либо образом найдены симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, можно ли определить исходные несимметричные напряжения и токи в трёхфазной цепи?
7. В чем состоит первоначальная задача метода наложения?
8. Какая последовательность токов статора создает магнитное поле в электрических машинах?

Практическая работа №13. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Расчет и анализ линейных при периодических несинусоидальных напряжениях и токах.

Цель: Приобрести практические навыки разложения периодической функции в ряд Фурье

Основы теории:

Всякая периодическая функция (например, напряжение $u(t)$) с периодом T , отвечающая условиям Дирихле, может быть разложена в тригонометрический ряд вида:

$$u(t) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (U'_k \cdot \sin(k\omega t) + U''_k \cdot \cos(k\omega t)) = U_0 + \sum_{k=1}^{\infty} (U_{mk} \cdot \sin(k\omega t + \psi_k))$$

коэффициенты которого определяются выражениями:

$$U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) d(\omega t),$$

$$U'_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(k\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \sin(k\omega t) d\omega t,$$

$$U''_k = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(k\omega t) dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u(\omega t) \cos(k\omega t) d\omega t,$$

$$U_{mk} = \sqrt{(U'_k)^2 + (U''_k)^2}, \quad \operatorname{tg}(\psi_k) = U''_k / U'_k, \quad \omega = 2\pi / T.$$

Действующее значение периодической функции (напряжения):

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [u(t)]^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [u(\omega t)]^2 d\omega t} = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} (U_k)^2}.$$

Мощности периодического тока (активная, реактивная, полная, мощность искажения):

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) i(t) dt = \sum_{k=0}^{\infty} U_k I_k \cos(\varphi_k), \quad Q = \sum_{k=1}^{\infty} U_k I_k \sin(\varphi_k),$$

$$S = UI = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} U_k^2 \sum_{k=0}^{\infty} I_k^2}, \quad S^2 > P^2 + Q^2, \quad T = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}.$$

Коэффициенты, характеризующие периодические несинусоидальные функции:

коэффициенты мощности и амплитуды:

$$\chi = \frac{P}{U \cdot I}; \quad k_a = \frac{I_{max}}{I};$$

коэффициенты гармоник и искажения:

$$k_I = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} (I_k)^2}}{I_1}, \quad k_u = \frac{I_1}{I}.$$

Для характеристики выпрямителя часто применяют *коэффициент схемы*, являющийся отношением постоянной составляющей напряжения (на выходе выпрямителя) к действующему значению напряжения источника питания (на входе выпрямителя): $k_{cx} = U_0/U$.

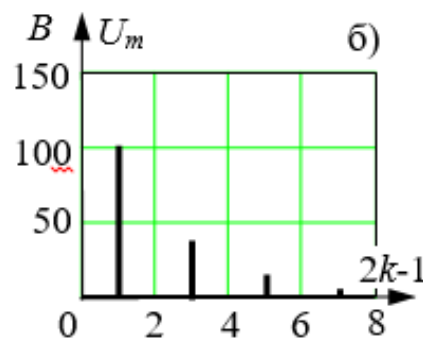
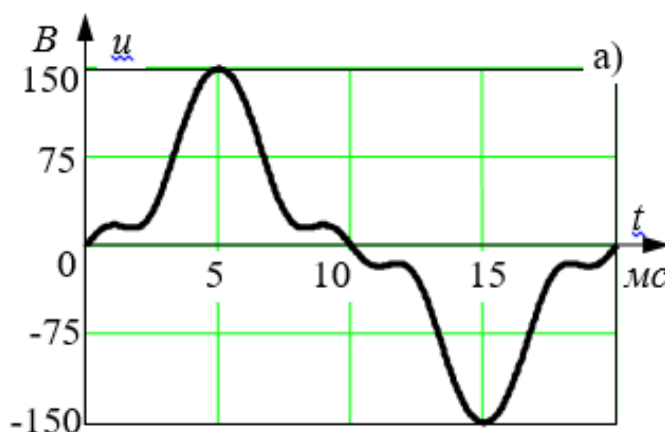
Задания:

Задание №1

Зависимость $u(t)$, показанная на рис. и заданная табл. (для первой четверти периода), имеет симметрию относительно начала координат (нечетная) и относительно оси абсцисс при совмещении двух полупериодов: $u(t) = -u(-t) = -u(t+T/2)$. Разложить зависимость $u(t)$ в ряд Фурье и построить ее линейный спектр частот.

Таблица – Значения функции $u(t)$ для первой четверти периода при $\Delta t = 0,5 \text{ мс}$

$t, \text{мс}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0
$u_n, \text{В}$	12,35	17,53	15,89	16,09	28,15	54,93	89,78	121,7	142,7	149,8
n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10



Задание №2

Периодическое пилообразное напряжение, описываемое на интервале $0 < \omega t < 2\pi$ функцией: $u(\omega t) = \frac{\omega t}{2\pi}$, представьте разложением в ряд Фурье.

Задание №3

Синусоидальное напряжение с амплитудой U_m , у которого “срезаны” нижние полу-волны (рис. 6.3,а), представить разложением в тригонометрический ряд.

Задание №4

Напряжение на выходе однофазного мостового выпрямителя, описываемое функцией $u(t) = |U_m \cdot \sin(\omega t)|$, представить разложением в тригонометрический ряд.

Контрольные вопросы:

1. Что такое схема замещения?
2. Что такое эквивалентная схема?
3. Что называют симметричной системой нулевой, прямой и обратной последовательности (токов)?
4. Почему в схеме замещения обратной последовательности отсутствует ЭДС генератора?

Практическая работа №14. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Расчет и анализ однофазных цепей несинусоидального тока.

Цель: Освоить расчет и анализ однофазных цепей несинусоидального тока.

Основы теории:

На практике в большинстве случаев в электрических цепях действуют несинусоидальные переменные напряжений и токи. Даже при синусоидальном питании цепей с нелинейными элементами в ветвях будут действовать несинусоидальные токи. Несинусоидальными будут также напряжения и токи при питании цепи от источников энергии с разной частотой. Во многих устройствах несинусоидальный режим является обычным нормальным.

Эти составляющие называются гармониками. Затем на основе известных методов расчёта определить токи и напряжения от каждой гармоники и просуммировать результаты. На рисунке 7.1 показана периодическая несинусоидальная функция времени $f(t) = f(t + T)$ с периодом T .

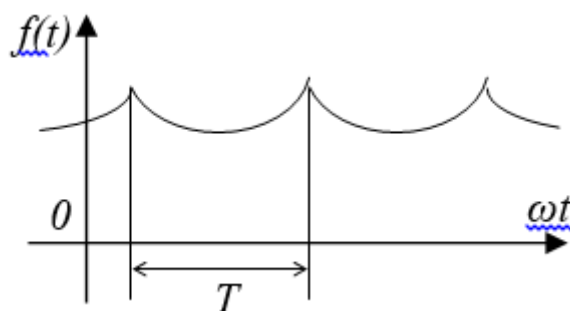


Рисунок 7.1 – Периодическая несинусоидальная функция

Известно, что периодическая несинусоидальная функция может быть представлена в виде бесконечного ряда – ряда Фурье.

Введём обозначение $\omega_1 = 2\pi/T$ – основная угловая частота. Синусоидальная и косинусоидальная составляющие с угловой частотой ω_1 образуют основную гармонику. Составляющие с более высокими угловыми частотами – высшие гармоники.

Гармонический ряд в тригонометрической форме имеет вид:

$$f(t) = a_0 / 2 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t)$$

Периодические несинусоидальные функции, изображающие электрические и магнитные величины, обладают обычно каким-либо видом симметрии и это облегчает их разложение в ряд Фурье.

Рассмотрим несколько видов симметричных функций.

Функция $f(t)$ симметрична относительно оси ординат (рисунок 7.2).

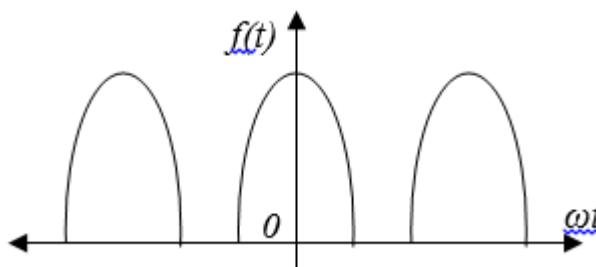


Рисунок 7.2 – Симметричная периодическая функция

Такие функции называют чётными. В эту функцию не входят синусоиды, т.к. они являются нечётными функциями. Поэтому при данном виде симметрии ряд представляется функцией:

$$f(t) = a_0 / 2 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t$$

т.е. четная функция содержит только косинусоиды и постоянную составляющую.

Функция $f(t)$ симметрична относительно начала координат (рисунок 12.3).

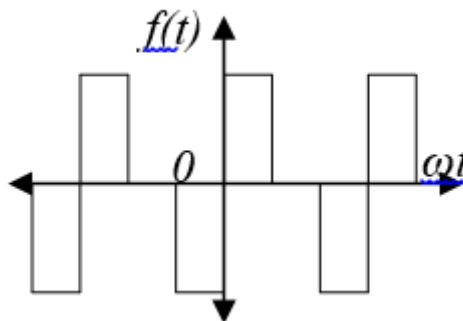


Рисунок 7.3 – Симметричная нечётная функция

Такие функции называют нечётными. Поскольку постоянная составляющая и косинусоида не удовлетворяют функциям нечётности, то они отсутствуют в ряде и ряд принимает вид:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega_1 t$$

Таким образом, раскладывая периодическую несинусоидальную функцию в ряд, следует предварительно выяснить не обладает ли заданная функция каким-либо видом симметрии. Наличие симметрии позволяет заранее предсказать, какие гармоники следует ожидать в разложении.

Действующее значение определяется по формуле:

$$F_q = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}$$

После разложения функции в ряд и подстановки в данное выражение получим:

$$F = \sqrt{\left(\frac{a_0}{2}\right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F_n^2}{2}}$$

Отсюда следует, что действующее значение функции, представляющую собой сумму гармоник разных частот, не зависит от фаз этих гармоник, а определяется их действующими значениями. Например, для тока

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots}$$

Действующие значения могут быть измерены с помощью электроизмерительных приборов: электромагнитной, электродинамической и др. систем.

Активная мощность равна среднему значению мощности:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt$$

Если u, i выразить через тригонометрический ряд, то интеграл разложится на ряд интегралов, дающих в результате сумму произведений постоянных составляющих напряжения и тока и средних значений напряжений и токов гармоник одного и того же порядка. Остальные интегралы будут равны нулю. Итак:

$$P = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \cos \varphi_n$$

Для реактивной мощности:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_n I_n \sin \varphi_n$$

Задания:

Задание №1

К последовательной цепи $r = 40 \text{ Ом}$ и $C = 40 \text{ мкФ}$ приложено напряжение, изменяющееся по закону (см. задачу 6.1):

$$u(t) = U_m^{(1)} \sin(\omega t) + U_m^{(3)} \sin(3\omega t) + U_m^{(5)} \sin(5\omega t) + \dots,$$

где $Um^{(1)} = 100 \text{ В}$, $Um^{(3)} = -40 \text{ В}$, $Um^{(5)} = 15 \text{ В}$, $Um^{(7)} = 5 \text{ В}$, $Um^{(9)} = -0,19 \text{ В}$.

В общей системе координат построить графики напряжений на активном сопротивлении, на емкости, а также напряжение источника питания. Определить их действующие значения, коэффициенты искажения, коэффициенты гармоник, проверить баланс мощностей.

Задание №2

Входное напряжение действует на последовательную цепь $r = 1000 \text{ Ом}$ и $L = 3 \text{ Гн}$. Выполнить расчет амплитуд гармонических составляющих напряжений на активном сопротивлении и индуктивности. Построить амплитудные спектры этих напряжений, напряжения источника питания, сделать выводы относительно распределения высших гармоник.

Задание №3

В цепи на частоте основной гармоники $\omega_1 = 9600 \text{ с}^{-1}$ имеет место резонанс токов, а на третьей гармонике наступает резонанс напряжений. Определить индуктивности катушек L_1 и L_2 , если $r_1 = 10 \text{ Ом}$, $r_2 = 5 \text{ Ом}$, $C = 2,5 \text{ мкФ}$.

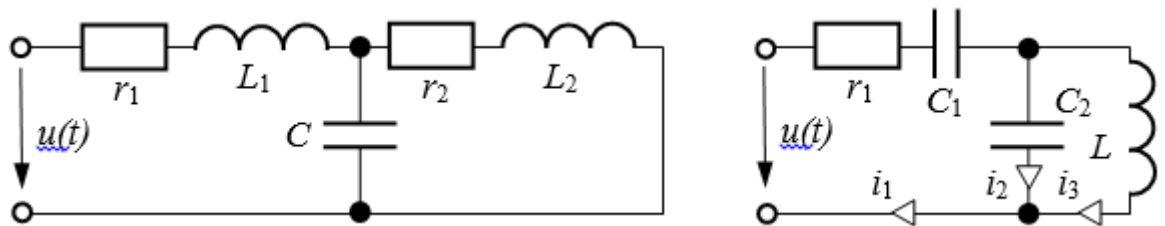


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

Напряжение $u = 50 + 200\sin(\omega t + 45^\circ) + 100\sin(3\omega t - 60^\circ) \text{ В}$ подано на вход цепи. Сопротивления элементов цепи токам основной гармоники, соответственно, равны $r_1 = r_2 = r_3 = 8 \text{ Ом}$; $\frac{1}{\omega C_1} = 15 \text{ Ом}$; $\omega L_2 = 3 \text{ Ом}$; $\frac{1}{\omega C_3} = 15 \text{ Ом}$

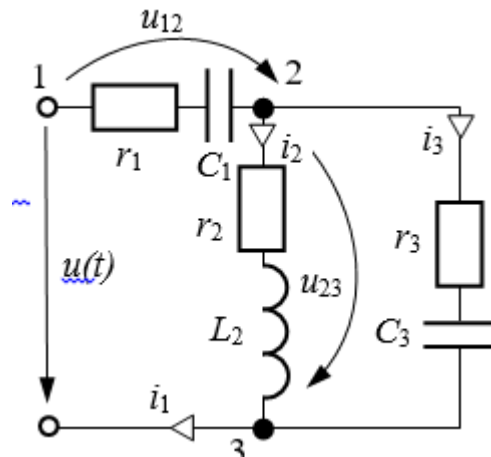


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Что является причиной появления несинусоидальных токов и напряжений в электрических цепях?
2. Изложите алгоритм разложения в ряд Фурье периодических несинусоидальных напряжений и токов.
3. Какие гармоники отсутствуют в спектрах кривых, симметричных относительно: 1) оси абсцисс; 2) оси ординат; 3) начала системы координат?
4. Какие величины и коэффициенты характеризуют периодические несинусоидальные переменные?
5. Как определяются действующие значения периодических несинусоидальных величин?
6. Изложите порядок расчета линейных электрических цепей при несинусоидальных напряжениях и токах.
7. Приведите формулы для определения всех видов мощностей для несинусоидальных напряжений и токов.
8. В чем разница результатов расчетов тока цепи, выполненных для мгновенных и действующих значений?
9. Достаточно ли для определения величины полной мощности в цепи несинусоидального тока наличие информации об активной и реактивной мощностях?
10. Для каких цепей справедлива методика расчета цепей несинусоидального тока, основанная на разложении ЭДС и токов источников в ряды Фурье?

Практическая работа №15. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье. Расчет и анализ трехфазных цепей несинусоидального тока.

Цель: Освоить навыки расчет трехфазных цепей несинусоидального тока

Основы теории:

Гармонический анализ и разложение функций

На практике часто встречаются несинусоидальные периодические ЭДС и токи, которые изменяются во времени по не гармоническому закону, но значения которых регулярно повторяются через равные промежутки времени, называемые периодом - T , как это показано на рисунке 7.

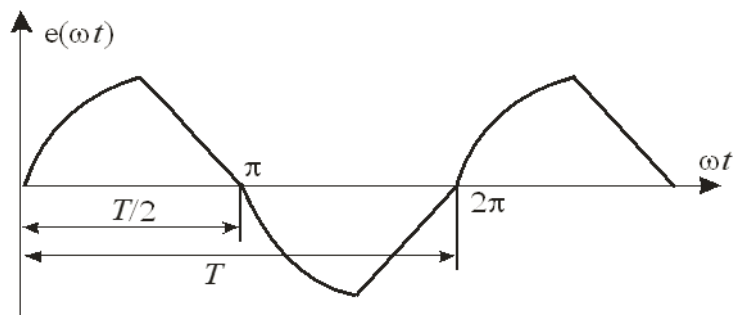


Рисунок 7 Несинусоидальные периодические ЭДС

Несинусоидальные ЭДС и токи возникают в следующих случаях:

- а) при включении в цепь переменного тока элемента с насыщенным стальным (ферромагнитным) сердечником;
- б) при наличии нелинейных сопротивлений в цепи;
- в) если источник ЭДС или источник тока выдаёт несинусоидальное напряжение или ток.

Далее рассмотрим анализ линейных электрических цепей, на входе которых действуют периодические несинусоидальные ЭДС и токи.

Из курса высшей математики известно, что любая периодическая функция $f(t)$ с периодом $2 \cdot \pi$, удовлетворяющая условиям Дирихле (то есть имеющая на конечном интервале $f(t)$ конечное число максимумов, минимумов и разрывов первого рода), может быть разложена в ряд Фурье. Практически все периодические функции, используемые в электротехнике, условиям Дирихле удовлетворяют.

Периодическая несинусоидальная ЭДС в общем случае может быть представлена тригонометрическим рядом Фурье:

$$e(t) = E_{(0)} + E_{(1)m} \sin(\omega t + \psi_{(1)}) + E_{(2)m} \sin(2\omega t + \psi_{(2)}) + \dots + E_{(k)m} \sin(k\omega t + \psi_{(k)}) = \\ = E_{(0)} + \sum_{k=1}^{\infty} E_{(k)m} \sin(k\omega t + \psi_{(k)})$$

где $E_{(0)}$ - постоянная составляющая;

$E_{(1)} \sin(\omega t + \psi_{(1)})$ - первая (основная) гармоническая составляющая, имеющая частоту

$$\omega = 2 \cdot \pi / T ;$$

$E_{(k)m} \sin(k\omega t + \psi_{(k)})$ - при $k \geq 2$ высшие гармонические составляющие (гармоники);

$E_{(k)m}$ - амплитуда k -й гармоники;

$\psi_{(k)}$ - начальная фаза k -й гармоники.

k - номер гармоники.

Совокупность постоянной составляющей, основной гармоники и высших гармонических составляющих называется спектром несинусоидальной величины.

Действующее и среднее значения несинусоидальных величин

Периодическую несинусоидальную величину (например, ток) обычно характеризуют следующими значениями: максимальным ($I_{\max}$), действующим (I), средним по модулю ($I_{\text{ср.мод.}}$) и постоянной составляющей ($I_{(0)}$). Действующее значение несинусоидального тока определяется его среднеквадратическим (эффективным) значением за период:

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t)^2 dt} . \quad (6)$$

Если ряд Фурье для тока ограничить конечным числом членов

$$i = I_{(0)} + I_{(1)m} \cdot \sin(\omega t + \psi_{(1)}) + I_{(2)m} \cdot \sin(2\omega t + \psi_{(2)}) + \dots + I_{(k)m} \cdot \sin(k\omega t + \psi_{(k)}),$$

то выражение (6) после интегрирования принимает вид:

$$I = \sqrt{I_{(0)}^2 + \frac{I_{(1)m}^2}{2} + \frac{I_{(2)m}^2}{2} + \dots + \frac{I_{(k)m}^2}{2}} . \quad (7)$$

Так как действующее значение гармонической составляющей

$$I = I_m / \sqrt{2}, \text{ то:}$$

$$I = \sqrt{I_{(0)}^2 + I_{(1)}^2 + I_{(2)}^2 + \dots + I_{(k)}^2}, \quad (8)$$

где $I_{(0)}$ - постоянная составляющая,

$I_{(1)}, I_{(2)}, I_{(k)}$ - действующие значения гармоник тока.

Аналогичное выражение имеет действующее значение напряжения:

$$U = \sqrt{U_{(0)}^2 + U_{(1)}^2 + \dots + U_{(k)}^2}. \quad (9)$$

Таким образом, действующее значение несинусоидальной электрической величины равно корню квадратному из суммы квадратов постоянной составляющей и действующих значений всех гармоник. Оно не зависит от начальных фаз гармоник.

Наряду с действующим значением в электротехнике используют понятие среднего по модулю значения функции. Оно, например, для тока, выражается интегралом вида:

$$I_{\text{ср.мод.}} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T |i(t)| dt.$$

Постоянная составляющая представляет собой среднее значение функции за период:

$$I_{(0)} = \frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) dt.$$

Особенности расчета линейной электрической цепи с несинусоидальными источниками

Расчет цепей, в которых действует один или несколько несинусоидальных источников периодических ЭДС и токов, раскладывается на три этапа;

- 1) Разложение ЭДС и токов источников на постоянную и синусоидальные составляющие (при этом ограничиваемся некоторым числом гармоник);
- 2) Применение принципа наложения и расчет токов и напряжений в цепи для каждой из составляющих в отдельности при этом, учитываем что структура цепи сохраняется, а сопротивления и проводимости реактивных элементов изменяются с изменением частоты гармоники;

- 3) Совместное рассмотрение решений, полученных для каждой из составляющих.

Рассмотрим каждый из этих этапов подробнее.

- 1) Если ЭДС изменяется по закону

$$e = E_0 + E_{1m} \sin(\omega_1 t + \psi_1) + E_{2m} \sin(\omega_2 t + \psi_2), \quad (10)$$

то действие источника такой ЭДС аналогично действию трёх последовательно соединённых источников ЭДС:

$$\left. \begin{aligned} e_0 &= E_0 \\ e_1 &= E_{1m} \sin(\omega_1 t + \psi_1) \\ e_2 &= E_{2m} \sin(\omega_2 t + \psi_2) \end{aligned} \right\} . \quad (11)$$

Если задача поставлена иначе: заданы не ЭДС, а токи несинусоидальных источников тока, то принцип решения задачи остаётся тем же. Источник несинусоидального тока всегда можно представить в виде параллельного соединения ряда источников тока. Если к узлам ветви или выходам двухполюсника подводится несинусоидальный ток

$$i = I_0 + I_{1m} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + I_{2m} \sin(\omega_2 t + \alpha_2), \quad (12)$$

то источник такого тока действует подобно параллельному соединению трёх источников:

$$\left. \begin{aligned} i_0 &= I_0 \\ i_1 &= I_{1m} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) \\ i_2 &= I_{2m} \sin(\omega_2 t + \alpha_2) \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

2) Применив принцип наложения, и, рассмотрев действие каждой составляющей ЭДС в отдельности, можно найти составляющие токов на всех участках цепи.

При рассмотрении каждой составляющей спектра необходимо учитывать, что для различных частот индуктивные и ёмкостные сопротивления неодинаковы:

$$x_{L_k} = k \cdot \omega \cdot L = k \cdot x_{L_1}; \quad (14) \quad x_{C_k} = \frac{1}{k \cdot \omega \cdot C} = \frac{x_{C_1}}{k}. \quad (15)$$

3) Мгновенные значения тока в любой ветви электрической цепи можем определить на основании принципа наложения:

$$i(t) = I_0 + I_{1m} \sin(\omega_1 t + \alpha_1) + I_{2m} \sin(\omega_2 t + \alpha_2). \quad (16)$$

Зная мгновенное значение тока, можем определить действующее:

$$I = \sqrt{I_0^2 + \frac{I_{1m}^2}{2} + \frac{I_{2m}^2}{2}}. \quad (17)$$

Мощность при несинусоидальных напряжениях и токах

Под активной мощностью (Р, Вт) несинусоидального тока понимают среднее значение мгновенной мощности за период первой гармоники:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u \cdot i \, dt. \quad (18)$$

$$P = I_0 \cdot U_0 + U_1 \cdot I_1 \sin \phi_1 + U_2 \cdot I_2 \sin \phi_2 + U_3 \cdot I_3 \sin \phi_3 + \dots + U_K \cdot I_K \sin \phi_K, \quad (19)$$

где ϕ_K - угол между U_K и I_K .

Таким образом, активная мощность несинусоидального тока равна сумме активных мощностей отдельных гармоник.

Аналогично выводится понятие реактивной мощности (Q , ВАр):

$$Q = \sum_{k=1}^{\infty} Q_k = \sum_{k=1}^{\infty} U_k \cdot I_k \cdot \sin \phi_k. \quad (20)$$

Полная мощность (S , ВА) равна произведению действующего значения несинусоидального напряжения на действующее значение несинусоидального тока:

$$S = U \cdot I, \quad (21)$$

$$\text{где } U = \sqrt{U_0^2 + U_1^2 + \dots + U_k^2}; \quad I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + \dots + I_k^2}.$$

В цепях с несинусоидальными токами в отличие от синусоидальных цепей

$$S^2 > P^2 + Q^2; \quad S^2 = P^2 + Q^2 + T^2, \quad (22)$$

так как в них действует мощность искажения (T , ВАр), обусловленная наличием высших гармоник:

$$T^2 = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2}. \quad (23)$$

Отношение активной мощности к полной называется коэффициентом мощности.

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{U \cdot I}. \quad (24)$$

Для синусоидальных цепей $\lambda = \cos \phi$, но в несинусоидальных цепях появляется коэффициент искажения K_u

$$\lambda = \frac{I_1}{I} \cos \phi = K_u \cos \phi$$

Задания:

Задание №1

Фазное напряжение работающего холостую генератора, соединенного звездой, содержит первую U_1 и третью U_3 гармоники.

1. Найти действующие значения напряжений этих гармоник по известным показаниям вольтметров фазного $U_\phi = 125 \text{ В}$ и линейного напряжений $U_\ell = 210 \text{ В}$.

2. Какова погрешность расчета, если в напряжении содержится еще и 5-я гармоника, составляющая не более 10% основной?

Задание №2

Симметричный генератор с фазным напряжением $u_A(\omega t) = 310 \cdot \sin(\omega t - 30^\circ) + 93 \cdot \sin(3\omega t + 45^\circ) \text{ В}$ питает соединённую звездой несимметричную нагрузку с сопротивлением фаз для тока основной гармоники $\underline{Z}_A^{(1)} = 15 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_B^{(1)} = j15 \text{ Ом}$, $\underline{Z}_C^{(1)} = -j15 \text{ Ом}$ (рис. 6.16); сопротивление нейтрали $\underline{Z}_N^{(1)} = 2 + j2 \text{ Ом}$. Определить показания приборов электромагнитной системы для случаев:

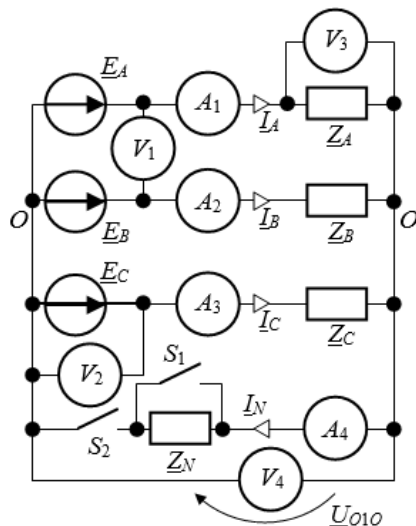


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

ЭДС одной фазы симметричного трехфазного генератора, соединенного звездой, $e = 20 \cdot \sin(\omega t) + 5 \cdot \sin(3\omega t - 20^\circ) \text{ В}$.

Нагрузка соединена тоже звездой: в фазе A – сопротивление r , в фазе B – индуктивность L и в фазе C – емкость C , причем $r = \omega L = 1/\omega C = 2 \text{ Ом}$.

Определить ток в фазе A и напряжение между нейтралью нагрузки и генератора.

Задание №4

Симметричный трехфазный генератор соединен треугольником и питает симметричную нагрузку, соединенную звездой. Ток в одной из фаз генератора (от B к A) $i_{BA} = 100 \cdot \sin(\omega t) + 20 \cdot \sin(3\omega t) + 10 \cdot \sin(5\omega t)$ А. Определить мгновенное значение тока в фазе C нагрузки.

Контрольные вопросы:

1. Системы напряжений (ЭДС, токов) какой последовательности в трехфазных цепях образуют гармоники порядка $k = (3n+1)$, $(3n-1)$, $3n$? Каким свойством обладают эти симметричные системы?
2. Почему в линейных напряжениях генератора при соединении его обмоток звездой отсутствуют гармоники, кратные трем?
3. Какие гармоники содержатся в фазных и линейных токах при соединении обмоток генератора и приемников треугольником?
4. Какие гармоники содержатся в фазных и линейных токах при соединении обмоток генератора и нагрузки звездой с нулевым проводом?
5. Почему при соединении нагрузки звездой с нулевым проводом ток нулевого провода содержит только гармоники, кратные трем?
6. Почему при соединении нагрузки звездой без нулевого провода линейные токи не содержат гармоник, кратных трем?

Практическая работа №16. Классический метод расчета переходных процессов. Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами классическим методом.

Цель: Приобрести практические навыки расчета переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами классическим методом.

Основы теории:

Если электрическая цепь достаточно долго сохраняла неизменный вид, то в ней создаётся так называемый установившийся (принуждённый) режим. Последнему соответствуют определённые законы изменения энергии электрических полей конденсаторов и магнитных полей индуктивностей цепи. В случае изменения схемы при переключениях, которые будем называть коммутациями, энергия полей должна измениться, а для этого требуется некоторое время. Процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому, называется переходным.

На протяжении ПП электрическая цепь может быть описана системой динамических уравнений, которая может быть сведена относительно одной электрической величины (тока или напряжения) к дифференциальному уравнению n -го порядка, причём его порядок определяется количеством накопителей энергии (к ним относятся индуктивности и ёмкости). Возникающее дифференциальное уравнение является линейным, неоднородным, с постоянными коэффициентами.

Общее решение полученного неоднородного линейного дифуравнения представляет собой сумму двух величин: частного решения неоднородного уравнения, выражающего принуждённый режим, задаваемый источниками, и решения соответствующего однородного дифуравнения, выражающего свободный режим.

В соответствии с этим для любого тока или напряжения можно записать:

$$i = i_{\text{пр}} + i_{\text{св}}, u = u_{\text{пр}} + u_{\text{св}},$$

где $i_{\text{пр}}, u_{\text{пр}}$ – принуждённые составляющие тока и напряжения;

$i_{\text{св}}, u_{\text{св}}$ – свободные составляющие тока и напряжения.

Метод нахождения электрических величин в виде суммы двух рассмотренных составляющих называется классическим.

Принуждённые составляющие рассчитываются любыми ранее изученными методами, а вид свободных составляющих зависит от числа и вида корней характеристического уравнения. Существует несколько способов составления характеристического уравнения.

1 способ. По имеющемуся дифференциальному уравнению:

$$K_n \cdot \frac{d^n i}{dt^n} + K_{n-1} \cdot \frac{d^{n-1} i}{dt^{n-1}} + \dots + K_1 \cdot \frac{di}{dt} + K_0 \cdot i = f(t).$$

n -я производная заменяется на p^n ; ...; первая производная на p ; сама величина – 1; правая часть – 0, то есть

$$K_n \cdot p^n + K_{n-1} \cdot p^{n-1} + \dots + K_1 \cdot p + K_0 = 0.$$

2 способ. Путём записи входного сопротивления в операторной форме:

1. Источники заменяются их внутренними сопротивлениями, а ключ показывается в послекоммутационном состоянии.
2. Цепь размыкается в любом месте. Рекомендуется разрывать в ветви с конденсатором, а при его отсутствии – в ветви с индуктивностью.
3. Относительно полученных зажимов записывается входное сопротивление в комплексной форме $\underline{Z}(j\omega)$ (индуктивное сопротивление – $j\omega L$, а ёмкостное – $1/(j\omega C)$).
4. Производится замена $j\omega = p$. Получаем входное сопротивление $Z(p)$ в операторной форме.
5. Полученное сопротивление приравниваем к нулю, т.е. $Z(p) = 0$. Это и есть характеристическое уравнение.

3 способ. Используя систему динамических уравнений цепи:

1. Составляется система динамических уравнений по законам Кирхгофа для послекоммутационного состояния цепи.
2. Полученная система алгебраизируется (из дифференциальных уравнения превращаются в алгебраические в операторной форме).
3. Определитель системы приравнивается к нулю и получается характеристическое уравнение.

Если корень характеристического уравнения один (обязательно отрицательный), свободная составляющая имеет вид: $i_{св}(t) = A \cdot e^{pt}$,

где A – постоянная интегрирования;

Если корней два, оба действительные, отрицательные, разные, причём $|p_1| < |p_2|$, то $i_{св}(t) = A_1 \cdot e^{p_1 t} + A_2 \cdot e^{p_2 t}$.

Если корней два – действительные, отрицательные, равные ($p_1 = p_2 = p$), то $i_{св}(t) = A_1 \cdot e^{pt} + A_2 \cdot t \cdot e^{pt}$,

где A_1 и A_2 – две постоянные интегрирования;

Если корней два – комплексные, сопряжённые, т.е. $p_{1,2} = -b \pm j\omega_0$, то

$$i_{св}(t) = A \cdot e^{-bt} \cdot \sin(\omega_0 t + \psi),$$

где A и ψ – постоянные интегрирования.

Количество корней характеристического уравнения определяет число постоянных интегрирования и равно количеству накопителей энергии в цепи после коммутации.

Постоянные интегрирования находятся из начальных условий (значения электрических величин и их производных в начальный момент после коммутации), которые делятся на независимые и зависимые. К независимым относятся значения в момент коммутации потокосцепления и тока индуктивности, заряда и напряжения конденсатора. Остальные начальные условия считаются зависимыми.

Высказанные выше положения о том, что запас энергии магнитного или электрического поля может изменяться только плавно, без скачков, выражают принцип непрерывности во времени потокосцепления индуктивности и электрического заряда ёмкости и называются законами коммутации.

Первый закон коммутации: в индуктивном элементе ток и магнитный поток непосредственно после коммутации сохраняют значения, которые они имели непосредственно перед коммутацией, и дальше начинают изменяться

$$\text{именно с этих значений: } \Psi(0_+) = \Psi(0_-), \quad i_L(0_+) = i_L(0_-),$$

где $t = 0_+$ – момент сразу после коммутации,

$t = 0_-$ – момент непосредственно перед коммутацией.

Второй закон коммутации: на ёмкостном элементе напряжение и заряд сохраняют в момент коммутации те значения, которые они имели непосредственно перед коммутацией, и в дальнейшем изменяются, начиная с этих значений:

$$q(0_+) = q(0_-), \quad u_C(0_+) = u_C(0_-).$$

При нулевых начальных условиях ($i_L(0_-) = 0$, $u_C(0_-) = 0$) индуктивность в начальный момент после коммутации равносильна разрыву цепи, а ёмкость – короткому замыканию. В случае ненулевых начальных условий ($i_L(0_-) \neq 0$, $u_C(0_-) \neq 0$) индуктивность в момент $t = 0_+$ равносильна источнику тока, а ёмкость – источнику ЭДС.

В зависимости от порядка дифуравнений различают цепи первого, второго и более высокого порядка.

Однако применен нерациональный порядок расчёта. Рекомендуется следующий порядок расчёта ПП:

1. Анализом цепи до коммутации определение независимых начальных условий.

2. Запись искомых электрических величин (токов и напряжений) в виде суммы двух составляющих – принуждённой и свободной.
3. Расчёт принуждённых составляющих.
4. Вид свободных составляющих зависит от числа и вида корней характеристического уравнения. Поэтому тем или иным способом составляется и решается характеристическое уравнение.
5. Запись свободных составляющих с учётом вида корней.
6. Определение тем или иным способом необходимых начальных условий.
7. Нахождение постоянных интегрирования из начальных условий.
8. Запись искомых величин в окончательной форме.

Задания:

Задание №1

Определить ток и напряжение катушки при переключении её на добавочное сопротивление r_∂ , если $U = 200 \text{ В}$, $r_k = 10 \text{ Ом}$, $L = 25 \text{ мГн}$, $r_\partial = 40 \text{ Ом}$.

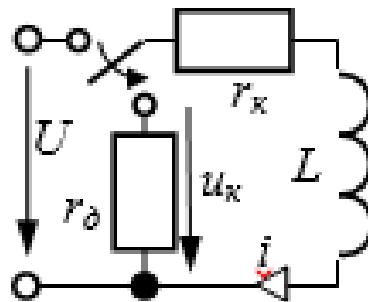


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Рассчитать ток переходного процесса при включении катушки на синусоидальное напряжение $u(t) = U_m \cdot \sin(\omega t + \psi_u)$ (рис. 7.9), если $U_m = 200 \text{ В}$, $\omega = 1000 \text{ рад/с}$, $\psi_u = -30^\circ$, $r_k = 10 \text{ Ом}$, $L = 25 \text{ мГн}$. Построить график $i(t)$.

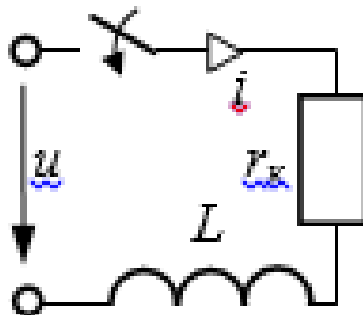


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

Определить ток и напряжение на ёмкости при переключении на добавочное сопротивление r_0 , если $U = 200 \text{ В}$, $r = 100 \text{ Ом}$, $C = 100 \text{ мкФ}$, $r_0 = 400 \text{ Ом}$.

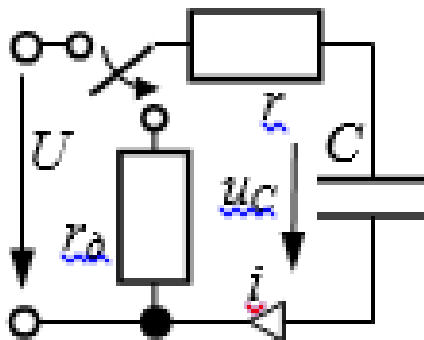


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

Рассчитать токи переходного процесса и напряжение на индуктивности в схеме если $E = 150 \text{ В}$, $r_1 = r_2 = 10 \text{ Ом}$, $r_3 = r_4 = 5 \text{ Ом}$, $L = 20 \text{ мГн}$. Построить графики $i_2(t)$, $u_L(t)$.

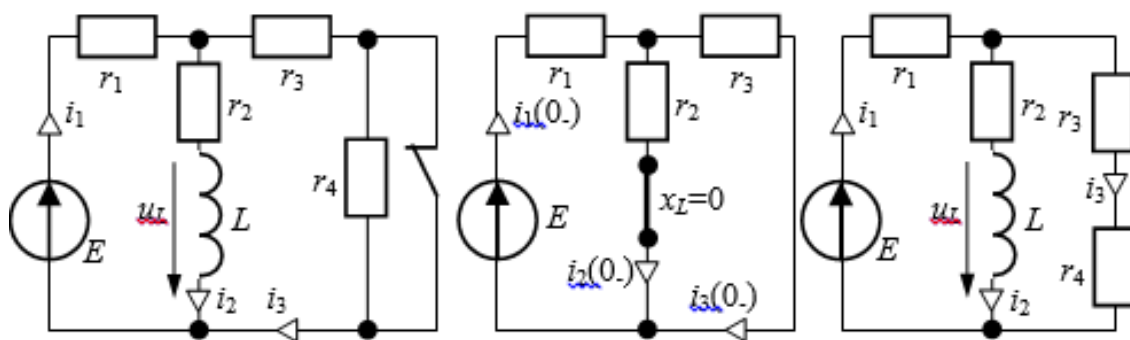


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Задание №5

В схеме рассчитать токи переходного процесса классическим методом. Параметры цепи: $U = 50 \text{ В}$, $r_1 = r_3 = 100 \text{ Ом}$, $r_2 = 50 \text{ Ом}$, $C = 100 \text{ мкФ}$.

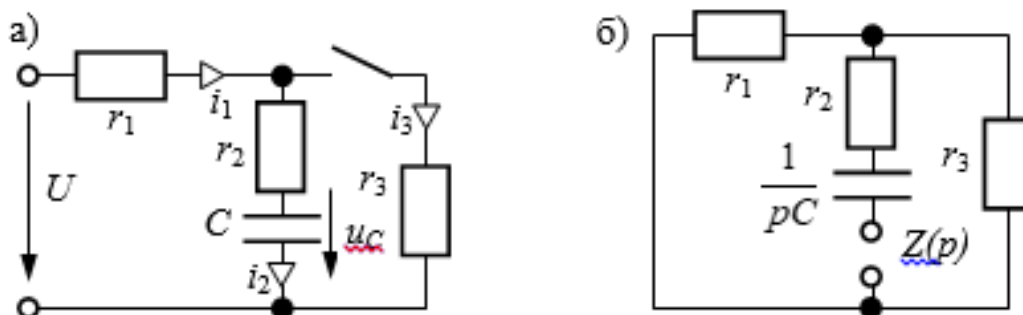


Рисунок 5 – Принципиальная схема к задаче

Задание №6

Рассчитать переходный ток $i_1(t)$ в схеме рис. 7.58 со следующими числовыми данными: $E_1 = 36 \text{ В}$, $E_2 = 6 \text{ В}$, $r_1 = 300 \text{ Ом}$, $r_2 = r_3 = 600 \text{ Ом}$, $C_1 = 300 \text{ мкФ}$, $C_2 = 200 \text{ мкФ}$.

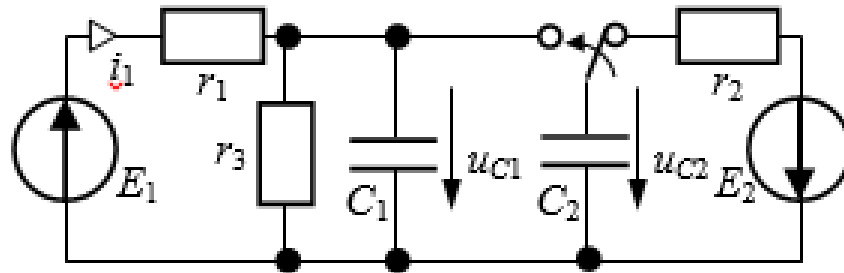


Рисунок 6 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Что такое переходной процесс?
2. Что называется коммутацией?
3. В чем заключаются причины возникновения переходных процессов?
4. Как читаются законы коммутации?
5. Что понимают под начальными значениями?
6. Чем обусловлены свободный и принужденный режимы?
7. Какие начальные условия называются зависимыми и независимыми?
8. Что называется коэффициентом затухания и постоянной времени переходного процесса?
9. Как определяются независимые и зависимые начальные условия?
10. Чем опасны переходные процессы?
11. В чем заключается сущность классического метода расчета переходных процессов?
12. Какие виды корней может иметь характеристическое уравнение второй степени?
13. Какой характер переходного процесса соответствует каждой паре корней характеристического уравнения второй степени?
14. Какие вы знаете способы составления характеристического уравнения?
15. Чем определяется число корней характеристического уравнения?

Практическая работа №17. Операторный метод расчёта переходных процессов. Расчет переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом.

Цель: Изучить методику расчета переходных процессов в линейных цепях с сосредоточенными параметрами операторным методом

Основы теории:

Сущность операторного метода заключается в том, что от некоторой функции вещественного переменного (например, времени t), называемой *оригиналом* $f(t)$, переходят к функции комплексного переменного $F(p)$, называемой *изображением*. При этом дифференцирования относительно оригиналов превращаются в алгебраические уравнения относительно изображений, решение которых проще.

Изображение и оригинал функции связывают формулой прямого преобразования Лапласа

$$F(p) = \int_0^{\infty} e^{-pt} f(t) dt.$$

В справочной литературе имеются таблицы оригиналов и соответствующих им изображений. Изображения наиболее характерных оригиналов приведены в табл. 7.3.

Таблица

Оригинал функции	Изображение по Лапласу
$U_0, J_k, u_C(0)$	$\frac{U_0}{p}, \frac{J_k}{p}, \frac{u_C(0)}{p}$
$U_0 \cdot e^{\pm \alpha t}, 1 - 1 \cdot e^{-\alpha t}$	$\frac{U_0}{p \mp \alpha}, \frac{\alpha}{p(p + \alpha)}$
$1 \cdot t, t^n, t \cdot e^{-\alpha t}$	$\frac{1}{p^2}, \frac{n!}{p^{n+1}}, \frac{1}{(p + \alpha)^2}$
$e^{j(\omega t + \psi)}$	$\frac{e^{j\psi}}{p - j\omega}$
$\sin(\omega t + \psi)$	$\operatorname{Im} \left(\frac{e^{j\psi}}{p - j\omega} \right) = \frac{p \sin \psi + \omega \cos \psi}{p^2 + \omega^2}$

$\cos(\omega t + \psi)$	$\operatorname{Re} \left(\frac{e^{j\psi}}{p - j\omega} \right) = \frac{p \cos \psi - \omega \sin \psi}{p^2 + \omega^2}$
Теорема дифференцирования, $f'(t)$	$pF(p) - f(0)$
Теорема интегрирования $\int_0^t f(t) dt$	$\frac{F(p)}{p}$

Закон Ома для последовательного участка R-L-C:

$$I(p) = \frac{U(p) + L \cdot i_L(0) - \frac{u_C(0)}{p}}{Z(p)},$$

где $Z(p) = R + pL + \frac{1}{pC}$ – операторное сопротивление этого участка.

В числителе кроме изображения напряжения на зажимах участка $U(p)$

фигурируют внутренние операторные ЭДС $i_L(0)$ и $\frac{u_C(0)}{p}$, учитывающие незави-

симые начальные условия.

I закон Кирхгофа: для любого узла $\sum \pm I(p) = 0$.

II закон Кирхгофа: для любого контура

$$\sum_{k=1}^n I_k(p) Z_k(p) = \sum_{k=1}^n \left(E_k(p) + L_k i_k(p) - \frac{u_{Ck}(0)}{p} \right).$$

Поскольку законы Ома и Кирхгофа в операторной форме имеют такой же вид, как и в цепях постоянного тока (ЦПТ), то все методы анализа ЦПТ, основанные на этих законах, могут быть применены для анализа операторных схем с учётом независимых начальных условий.

По изображениям искомых величин, полученным в результате анализа операторной схемы, находят оригиналы искомых величин. Для этого применяют обратное преобразование Лапласа или используют таблицу преобразований Лапласа, или пользуются теоремой разложения. В последнем случае изображение искомой величины приводят к виду:

$$F(p) = \frac{F_1(p)}{F_2(p)} \quad \text{или} \quad \frac{F_1(p)}{p F_2(p)},$$

где $F_1(p)$ и $F_2(p)$ – степенные многочлены:

$$F_1(p) = b_m p^m + b_{m-1} p^{m-1} + \dots + b_1 p + b_0, \quad F_2(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0,$$

причём $m \leq n$ и дробь несократима (числитель и знаменатель не имеют одинаковых корней). Оригинал определяется по формулам:

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} \rightarrow f(t) = \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{F_2'(p_k)} e^{p_k t} \quad \text{или} \quad \frac{F_1(p)}{pF_2(p)} \rightarrow f(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + \sum_{k=1}^n \frac{F_1(p_k)}{p_k F_2'(p_k)} e^{p_k t},$$

где p_k – корни уравнения $F_2(p) = 0$, а n – число корней этого уравнения,

$F_1(p_k)$ и $F_2'(p_k)$ – значения многочлена $F_1(p)$ и производной от многочлена $F_2(p)$ при k -м корне.

В случае пары комплексных сопряжённых корней можно использовать следующие формулы:

$$\frac{F_1(p)}{F_2(p)} \rightarrow f(t) = 2\operatorname{Re} \left(\frac{F_1(p_1)}{F_2'(p_1)} e^{p_1 t} \right)$$

$$\frac{F_1(p)}{pF_2(p)} \rightarrow f(t) = \frac{F_1(0)}{F_2(0)} + 2\operatorname{Re} \left(\frac{F_1(p_1)}{p_k F_2'(p_1)} e^{p_1 t} \right).$$

Рекомендуемая последовательность расчёта ПП операторным методом.

1. Расчётом цепи до коммутации определяют независимые начальные условия $i_L(0)$, $u_C(0)$ и записывают величины внутренних операторных ЭДС $Li_L(0)$ и $\frac{u_C(0)}{p}$.

2. Для цепи после коммутации составляется эквивалентная операторная схема.

3. Любым методом анализа ЦПТ определяют изображения требуемых токов и напряжений, приводя затем их к виду рациональной дроби.

4. По теореме разложения или с помощью обратных преобразований Лапласа находят оригиналы искомых токов и напряжений переходного процесса.

Задания:

Задание №1

Напряжение, приложенное к цепи изменяется по закону $u(t) = 30t^2 + 18t + 10$ В. Параметры цепи: $r_1 = r_2 = 100$ Ом, $C = 10$ мкФ. Рассчитать ток конденсатора.

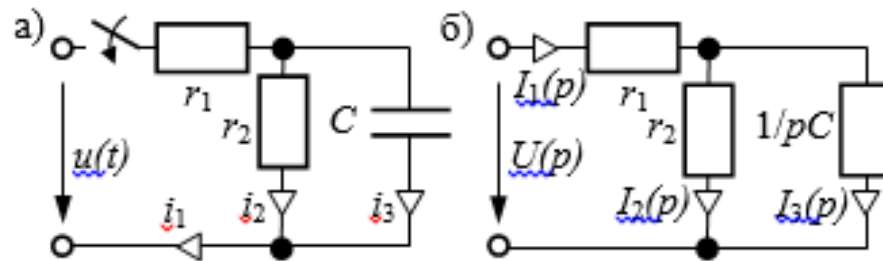


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

В приведенной на рис. схеме рассчитать напряжение и ток индуктивности. Числовые значения: $U = 24 \text{ В}$, $L = 0,25 \text{ Гн}$, $R_1 = 30 \text{ Ом}$, $R_2 = 10 \text{ Ом}$.

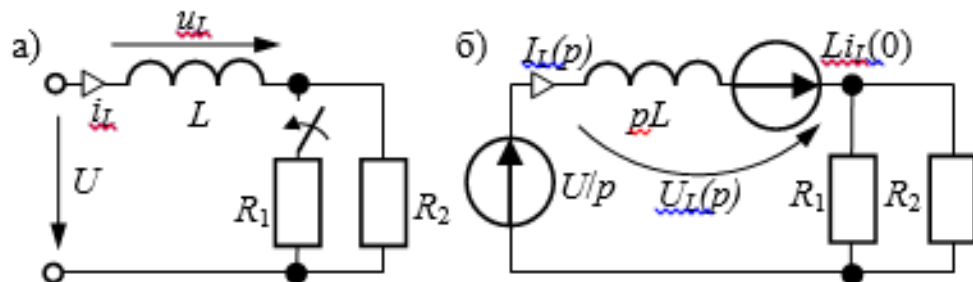


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

В схеме рис. 7.70,а рассчитать ток $i_2(t)$ и напряжение на ёмкости $u_C(t)$, если $U = 240 \text{ В}$, $E_3 = 100 \text{ В}$, $R_1 = R_3 = 50 \text{ Ом}$, $C = 1000 \text{ мкФ}$.

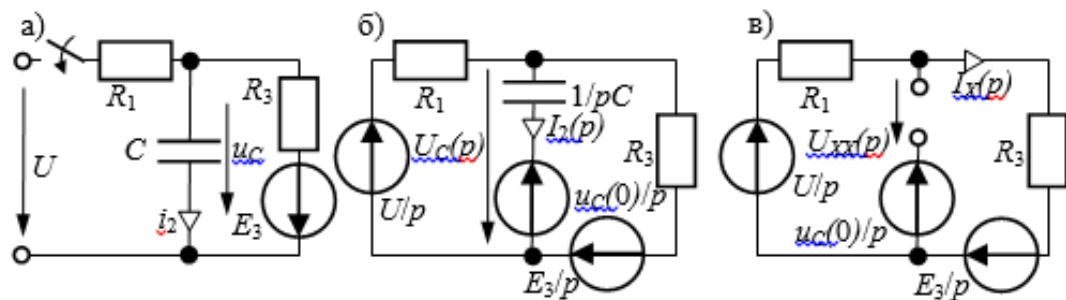


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Задание №4

Рассчитать переходный процесс в схеме операторным методом: $u(t) = 100 \cdot \sin(200t + 90^\circ) \text{ В}$, $r_1 = r_2 = 100 \text{ Ом}$, $C = 50 \text{ мкФ}$.

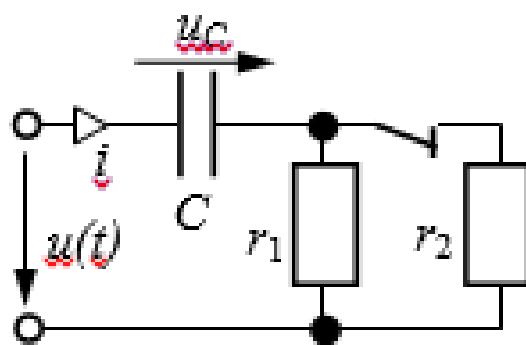


Рисунок 4 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Что такое переходной процесс?
2. Что называется коммутацией?
3. В чем заключаются причины возникновения переходных процессов?
4. Как читаются законы коммутации?
5. Чем опасны переходные процессы?
6. Сущность операторного метода расчета переходных процессов.
7. Как определить операторное сопротивление цепи?
8. Записать закон Ома в операторной форме.
9. Записать второй закон Кирхгофа в операторной форме.
10. Что характеризует с физической точки зрения внутренний источник катушки индуктивности в операторной схеме замещения?
11. Что характеризует с физической точки зрения внутренний источник конденсатора в операторной схеме замещения?
12. Как определить оригинал с помощью таблицы соответствия?
13. Как определить оригинал с помощью теоремы разложения?
14. Зарисовать операторную схему замещения для катушки индуктивности.
15. Зарисовать операторную схему замещения для конденсатора.
16. Как составить операторную схему замещения для свободного процесса?
17. Как составить операторную схему замещения для переходного процесса?

Практическая работа №18. Операторный метод расчёта переходных процессов. Расчет переходных процессов в нелинейных электрических цепях.

Цель: Освоить методику расчета переходных процессов в нелинейных электрических цепях

Основы теории:

Переходные процессы (ПП) в нелинейных электрических цепях носят значительно более сложный и многообразный характер, чем в линейных, так как нелинейность характеристик элементов может приводить как к чисто количественным изменениям показателей ПП, так и к возникновению качественно новых явлений, принципиально недостижимых в линейных цепях. ПП в нелинейных цепях описываются нелинейными дифференциальными уравнениями. Поскольку не найдено общего метода решения таких уравнений, то нельзя указать общего аналитического метода расчета ПП в нелинейной цепи произвольной конфигурации. Существует много частных методов, направленных на решение конкретных задач расчета ПП в нелинейных цепях. Перечислим наиболее распространенные из них и обозначим их сущность.

1. Метод условной линеаризации. Его суть заключается в том, что характеристика нелинейного элемента (НЭ) заменяется прямой линией, проходящей через начальную и конечную точки переходного процесса на характеристике НЭ. Уравнение этой прямой подставляется в дифуравнение, описывающее ПП, в результате чего оно становится линейным и его решение большого труда не представляет.

2. Метод аналитической аппроксимации. Сущность метода заключается в приближенном выражении характеристики НЭ некоторой аналитической функцией, которая подставляется в дифуравнение, описывающее ПП, и производится его решение. Успешность применения этого метода зависит не только от того, насколько точно выражена характеристика НЭ, но еще и от того, насколько просто находится решение полученного дифуравнения.

3. Метод кусочно-линейной аппроксимации. Его сущность заключается в замене характеристики НЭ отрезками прямых линий (ломаной), уравнения которых подставляются в нелинейные дифуравнения, описывающие ПП. При этом системе исходных нелинейных соответствует совокупность систем линейных дифуравнений, решение которых может быть найдено известными методами. Постоянные интегрирования, появляющиеся при решении системы линейных дифуравнений, определяются путем «припасовывания», т.е. согласования решений, полученных на соседних линейных участках.

4. Метод последовательных интервалов. Сущность метода основана на предложенном Эйлером приближенном способе решения нелинейного дифуравнения. При этом время ПП разбивается на ряд достаточно малых интервалов t , которыми заменяется dt , имеющееся в уравнении. Это позволяет на каждом интервале определять приращение одной из величин, характеризующих НЭ. Допущение о том, что другая величина, характеризующая НЭ, имеет значение, соответствующее предыдущему участку, позволяет осуществлять переход от одного интервала к другому и произвести расчет ПП от начального состояния до его практического завершения.

5. Метод графического интегрирования. Его сущность: в исходном дифуравнении нужно разделить переменные, выразив производную одной из них, например, по времени t в виде некоторой функции. Тогда ответ для этой переменной будет представлять собой интеграл от указанной функции. Поскольку значение интеграла равно площади, ограниченной подынтегральной функцией, то, задаваясь различными значениями верхнего предела интеграла, можно каждый раз определять соответствующее значение искомой переменной и получить зависимость между этими величинами в течение всего переходного процесса.

Задания:

Задание №1

В схеме методом графического интегрирования рассчитать ток i переходного процесса в катушке со сталью, построить его график, если в цепи действует источник постоянного тока $J = 10\text{ A}$, $r = 1\text{ Ом}$, длина средней магнитной линии $l = 50\text{ см}$, сечение сердечника (сталь 1512) $S = 100\text{ см}^2$, а число витков катушки $w = 490$. Поток рассеяния и потерями в стали пренебречь.

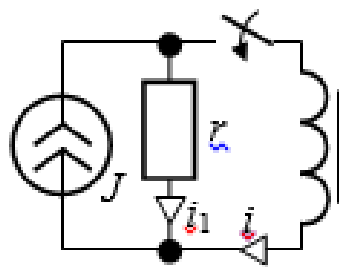


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

Катушка, содержащая 200 витков, намотанных на сердечнике из стали 1512, включается на напряжение $u = 2000\sin(100\pi \cdot t)\text{ В}$. Длина средней магнитной линии состав-

ляет 50 см , а сечение сердечника 200 см^2 . Активное сопротивление провода обмотки составляет 1 Ом . Требуется: пренебрегая потерями в стали и потоком рассеяния, рассчитать потокосцепление и ток переходного процесса, построить их графики; определить степень превышения максимальным током переходного процесса амплитуды тока установившегося режима.

Контрольные вопросы:

1. В чем заключаются особенности расчета переходных процессов в нелинейных цепях?
2. В чем состоит сущность метода условной линеаризации? С чем связана его невысокая точность?
3. В чем заключается основное преимущество метода аналитической аппроксимации?
4. Следует ли применять метод кусочно-линейной аппроксимации для расчета переходных процессов в цепях с питанием от источника переменного напряжения?

Практическая работа №19. Решение дифференциальных уравнений для однородной линии с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном токе. Расчет электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме.

Цель: Изучить методику расчета электрических цепей с распределенными параметрами в установившемся режиме.

Устройства или электрические цепи, в которых токи $i(x,t)$ и напряжения $u(x,t)$ являются функциями не только времени t , но и зависят от координаты x , называют длинными линиями или линиями с распределёнными параметрами (ЛРП). Факторами, которые обуславливают распределённость параметров, являются значительная протяжённость устройства в пространстве, высокое напряжение, высокая частота. Примерами ЛРП являются: линии электропередач напряжением 110 кВ и выше, короткие линии связи у микрофона, кабель телеантенны, сами антенны радио и телепередатчиков, устройства задержки сигналов, гирлянды изоляторов.

Исходными характеристиками или первичными параметрами длинных линий являются:

- r_0 , Ом/м – продольное сопротивление линии на единице длины;
- g_0 , См/м – поперечная проводимость линии, причём $g_0 \neq r_0^{-1}$;
- L_0 , Гн/м и C_0 , Ф/м, соответственно, – индуктивность и емкость линии на единице длины.

Если параметры r_0 , g_0 , L_0 , C_0 одинаковы по всей длине линии, то линия называется однородной. В справочной литературе существуют формулы, по которым можно рассчитать первичные параметры линии по известным конструктивным параметрам.

Наиболее общие уравнения двухпроводной линии, которые справедливы для любого режима работы, имеют вид:

$$\begin{aligned} -\frac{\partial u}{\partial x} &= r_0 \cdot i + L_0 \frac{\partial i}{\partial t}, \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= g_0 \cdot u + C_0 \frac{\partial u}{\partial t}. \end{aligned}$$

Если же линия работает при синусоидальных токах и напряжениях, то уравнения упрощают, сводя их в комплексной форме к одному дифференциальному уравнению второго

порядка с нулевой правой частью. Решение таких уравнений можно записать для действующих и мгновенных значений напряжения и тока в любой точке, отстоящей на расстоянии x от начала линии или на расстоянии y от её конца:

$$\begin{cases} \underline{U}(x) = \underline{A}_1 e^{\gamma x} + \underline{A}_2 e^{-\gamma x} = \underline{U}_{обp} + \underline{U}_{np}; \\ \underline{I}(x) = -\frac{1}{\underline{Z}_0} \cdot \frac{d\underline{U}}{dx} = -\frac{1}{\underline{Z}_0} [\gamma \underline{A}_1 e^{\gamma x} - \gamma \underline{A}_2 e^{-\gamma x}] = -\underline{I}_{обp} + \underline{I}_{np}; \end{cases}$$

$$u(x,t) = \sqrt{2} A_1 e^{\alpha x} \cdot \sin(\omega t + \psi_{обp} + \beta x) + \sqrt{2} A_2 e^{-\alpha x} \cdot \sin(\omega t + \psi_{np} - \beta x);$$

$$i(x,t) = -\sqrt{2} \frac{A_1}{Z_C} e^{\alpha x} \cdot \sin(\omega t + \psi_{обp} - \varphi_C + \beta x) + \sqrt{2} \frac{A_2}{Z_C} e^{-\alpha x} \cdot \sin(\omega t + \psi_{np} - \varphi_C - \beta x);$$

$$\begin{cases} \underline{U}(x) = \underline{U}_1 ch \gamma x - \underline{Z}_C \underline{I}_1 sh \gamma x; \\ \underline{I}(x) = -\frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_C} sh \gamma x + \underline{I}_1 ch \gamma x; \end{cases}$$

$$\begin{cases} \underline{U}(y) = \underline{U}_2 ch \gamma y + \underline{Z}_C \underline{I}_2 sh \gamma y; \\ \underline{I}(y) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} sh \gamma y + \underline{I}_2 ch \gamma y. \end{cases}$$

Здесь: $\underline{Z}_0 = r_0 + j\omega L_0$, Ом/км, $\underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0$, См/км;

$\underline{Z}_C = Z_C \cdot e^{j\varphi_C} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}}$, Ом – характеристическое (волновое) сопротивление линии;

$\gamma = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} = \alpha + j\beta$, 1/км – коэффициент распространения волны в линии;

α , Нп/км – коэффициент затухания волны;

β , рад/км – коэффициент изменения фазы волны в линии;

$A_1, A_2, \psi_{np}, \psi_{обp}$ – постоянные интегрирования;

U_1, U_2, I_1, I_2 – напряжение и ток, соответственно, в начале и в конце линии.

Величины $\underline{Z}_C$ и γ называют вторичными параметрами линии, их можно рассчитать через первичные параметры линии r_0, g_0, L_0, C_0 , и наоборот.

Из уравнений (8.3) для мгновенных значений следует, что в любом сечении линии ток и напряжение есть наложение двух встречных затухающих синусоид-волн – прямой (падающей) и обратной (отражённой). Иными словами: в линии имеют место волновые процессы, причём:

$$u(x,t) = u_{np} + u_{обp}; \quad i(x,t) = i_{np} - i_{обp}$$

Бегущую электромагнитную волну можно охарактеризовать напряжением, током, длиной волны λ и фазовой скоростью её распространения v :

$$\lambda = 2\pi/\beta = v/f, \quad v = \omega/\beta.$$

Поскольку коэффициент фазы β выражается через ω , $\underline{Z}_0$, $\underline{Y}_0$, то длина волны и скорость её распространения зависят от частоты и параметров самой линии.

Для воздушных линий характерно:

$$Z_C > 150 \text{ Ом}, \quad v \approx \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \cdot \varepsilon_0}} = c = 300 \cdot 10^3 \text{ км/с},$$

для кабельных линий обычно: $Z_C < 120\text{-}150 \text{ Ом}$, $v \approx \frac{1}{2}c = 150 \cdot 10^3 \text{ км/с}$.

Входное сопротивление и параметры линии могут быть определены по её конструктивным параметрам (по справочным данным) или по результатам опытов холостого хода и короткого замыкания ($\underline{Z}_H$ – сопротивление нагрузки, l – длина линии):

$$\underline{Z}_{BX} = \frac{U_1}{I_1} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\underline{Z}_H + \underline{Z}_C \cdot \text{th} \gamma l}{\underline{Z}_H \cdot \text{th} \gamma l + \underline{Z}_C} = \underline{Z}_{XX} \cdot \frac{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{K3}}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_{XX}}; \quad \underline{Z}_{XX} = \frac{\underline{Z}_C}{\text{th} \gamma l}; \quad \underline{Z}_{K3} = \underline{Z}_C \cdot \text{th} \gamma l.$$

Через сопротивления $\underline{Z}_{XX}$ и $\underline{Z}_{K3}$ вторичные, а затем и первичные параметры линии определяются по выражениям:

$$\underline{Z}_C = \sqrt{\underline{Z}_{XX} \cdot \underline{Z}_{K3}}; \quad \text{th} \gamma l = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{K3}}{\underline{Z}_{XX}}}; \quad \frac{1 + \text{th} \gamma l}{1 - \text{th} \gamma l} = e^{2\alpha l} \cdot e^{j2\beta l},$$

$$\gamma \cdot \underline{Z}_C = \sqrt{\underline{Z}_0 \underline{Y}_0} \cdot \sqrt{\frac{\underline{Z}_0}{\underline{Y}_0}} = \underline{Z}_0 = R_0 + j\omega L_0; \quad \gamma / \underline{Z}_C = \underline{Y}_0 = g_0 + j\omega C_0.$$

Отношение напряжения падающей волны в конце линии к напряжению отражённой волны в конце линии называется коэффициентом отражения волны:

$$K = \frac{A_1 e^{\gamma l}}{A_2 e^{-\gamma l}} = \frac{\underline{Z}_H - \underline{Z}_C}{\underline{Z}_H + \underline{Z}_C}.$$

Соотношения для линий при согласованной нагрузке $\underline{Z}_H = \underline{Z}_C$:

$$\underline{Z}_{BX} = \underline{Z}_C; \quad \eta = e^{-2\alpha l}; \quad \begin{cases} \underline{U}(y) = \underline{U}_2 e^{\gamma y} = \underline{U}_2 \cdot e^{\alpha y} \cdot e^{j\beta y}; \\ \underline{I}(y) = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot e^{\gamma y} = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \cdot e^{\alpha y} \cdot e^{j\beta y}. \end{cases}$$

В технике связи, где возможны сигналы широкого диапазона частот, выделяют понятия линии без искажений сигналов (ЛБИ), в которой сигналы на всех частотах распространяются с одинаковой скоростью и затухают в равной степени, и линии без потерь (ЛБП), в которой $\omega L_0 \gg r_0$, $\omega C_0 \gg g_0$ и величинами r_0 , g_0 можно пренебречь.

Соотношения для ЛБИ:

$$\frac{r_0}{L_0} = \frac{g_0}{C_0}; \quad \alpha = \sqrt{r_0 g_0} \neq f(\omega), \quad \beta = \omega \sqrt{L_0 C_0}; \quad v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \neq f(\omega),$$

характеристическое сопротивление $\underline{Z}_C = \sqrt{L_0 / C_0}$ резистивное. (8.11)

Соотношения для ЛБП: $r_0 = 0, \quad g_0 = 0; \quad \alpha = 0 \neq f(\omega), \quad \beta = \omega \sqrt{L_0 C_0};$

$v = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} \neq f(\omega);$ ЛБП является частным случаем ЛБИ;

характеристическое сопротивление $\underline{Z}_C = \sqrt{L_0 / C_0}$ резистивное;

основные уравнения ЛБП:

$$\begin{cases} \underline{U}(y) = \underline{U}_2 \cos \beta y + j \underline{Z}_C \underline{I}_2 \sin \beta y; \\ \underline{I}(y) = j \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_C} \sin \beta y + \underline{I}_2 \cos \beta y; \end{cases}$$

входное сопротивление ЛБП:

$$\underline{Z}_{BX} = \underline{Z}_C \cdot \frac{\underline{Z}_H + j \underline{Z}_C \cdot \operatorname{tg} \beta l}{\underline{Z}_H \cdot j \operatorname{tg} \beta l + \underline{Z}_C}, \quad \underline{Z}_{XX} = -j \frac{\underline{Z}_C}{\operatorname{tg} \beta l}; \quad \underline{Z}_{K3} = j \underline{Z}_C \cdot \operatorname{tg} \beta l.$$

В курсе ТОЭ основы теории ЛРП рассматриваются применительно к однородным двухпроводным линиям, работающим при синусоидальных токах и напряжениях. Все расчетные соотношения могут быть распространены на симметричные трехфазные линии с учётом одной фазы, а также на линии постоянного тока. Линиям постоянного тока индуктивность L_0 и ёмкость C_0 также присущи, но не проявляют себя. Здесь учитываются лишь параметры r_0, g_0 .

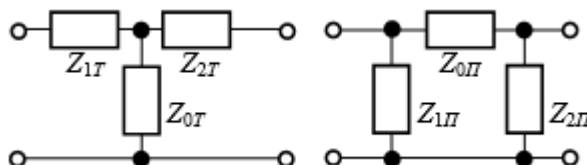
Линия с распределёнными параметрами является симметричным четырёхполюсником. Поэтому, сопоставляя уравнения ЛРП (8.4) при $y = l$ с уравнениями четырёхполюсника формы А (см. /1/, разд. 5)

$$\underline{U}_1 = \underline{A} \cdot \underline{U}_2 + \underline{B} \cdot \underline{I}_2; \quad \underline{I}_1 = \underline{C} \cdot \underline{U}_2 + \underline{D} \cdot \underline{I}_2,$$

получаем следующие соотношения:

$$\underline{A} = \underline{D} = \operatorname{ch} \gamma l, \quad \underline{B} = \underline{Z}_C \cdot \operatorname{sh} \gamma l, \quad \underline{C} = \frac{\operatorname{sh} \gamma l}{\underline{Z}_C}.$$

ЛРП как четырёхполюсник может быть представлена Т- или П- эквивалентной схемой (рис. 8.1), сопротивления которых вычисляются по формулам:



$$Z_{1T} = Z_{2T} = \frac{A-1}{C} = \underline{Z}_C \cdot \frac{ch \underline{\gamma} l - 1}{sh \underline{\gamma} l}; \quad Z_{0T} = \frac{1}{C} = \frac{\underline{Z}_C}{sh \underline{\gamma} l};$$

$$Z_{1П} = Z_{2П} = \frac{B}{D-1} = \underline{Z}_C \cdot \frac{sh \underline{\gamma} l}{ch \underline{\gamma} l - 1}; \quad Z_{0П} = \underline{B} = \underline{Z}_C \cdot sh \underline{\gamma} l.$$

Задания:

Задание №1

Для определения параметров линии связи длиной 160 км на частоте 1000 Гц поставлены опыты холостого хода и короткого замыкания, в результате которых получено: $\underline{Z}_{ХХ} = 887 \cdot e^{-j35^\circ}$ Ом, $\underline{Z}_{КЗ} = 540 \cdot e^{j21^\circ}$ Ом. Определить первичные и вторичные параметры линии.

Задание №2

Из опытов холостого хода и короткого замыкания для линии связи длиной $l = 120$ км на частоте 800 Гц найдено: $\underline{Z}_{ХХ} = 182 e^{j3,55^\circ}$ Ом, $\underline{Z}_{КЗ} = 209 e^{-j22,1^\circ}$ Ом. Требуется определить вторичные и первичные параметры линии, а также вычислить входное сопротивление линии, если её нагрузить на $\underline{Z}_H = 2 \underline{Z}_C$.

Задание №3

Экспериментальным путём удалось получить некоторые параметры линии связи длиной $l = 140$ км, работающей на частоте $f = 1500$ Гц: $\underline{Z}_C = 710 \cdot e^{-j9^\circ}$ Ом, $\underline{Z}_0 = 19,2 \cdot e^{j70^\circ}$ Ом/км. Требуется рассчитать первичные и вторичные параметры, определить входное сопротивление в режиме холостого хода и в режиме короткого замыкания.

Задание №4

Для двухпроводной воздушной линии связи известны вторичные параметры на частоте 50 Гц: $\underline{Z}_C = 440 \cdot e^{-j10^\circ}$ Ом, $\underline{\gamma} = (4 + j18) \cdot 10^{-3}$ 1/км. Эта линия работает на постоянном токе и питает нагрузку $r_H = 400$ Ом. Напряжение на входе линии $U_1 = 600$ В. Определить U_2 и I_1 , если длина линии $l = 200$ км. Определить сопротивления Т- и П-схем замещения ЛРП длиной $l = 400$ км с параметрами: $\underline{Z}_C = 391 e^{-j3,75^\circ}$ Ом и $\underline{\gamma} = (0,187 + j1,058) \cdot 10^{-3}$ 1/км.

Задание №5

Трёхфазная сталеалюминиевая воздушная линия электропередачи длиной 300 км имеет следующие параметры (на фазу): $r_0 = 0,08$ Ом/км, $g_0 = 3,75 \cdot 10^{-8}$ См/км, $\omega L_0 = 0,42$ Ом/км, $\omega C_0 = 2,7$ мкСм/км. Вычислить вторичные параметры линии, фазовую скорость и

длину волны. Найти фазное напряжение, ток и активную мощность в начале линии, КПД, если на приёмном конце линейное напряжение 330 кВ , активная мощность 300 МВт и коэффициент мощности нагрузки равен $0,92$. Вычислить комплексы напряжения падающей и отражённой волн в начале и в конце ЛЭП.

Задание №6

Для трёхфазной ЛЭП, согласованной с нагрузкой, известны комплексы фазного напряжения в начале линии $\underline{U}_1 = 100 \text{ кВ}$ и фазного тока в конце линии $\underline{I}_2 = 190e^{-j90^\circ} \text{ А}$. Определить КПД линии, если её характеристическое сопротивление $\underline{Z}_C = 500e^{-j10^\circ} \text{ Ом}$.

Задание №7

Двухпроводная линия длиной 100 км нагружена на повторное сопротивление $\underline{Z}_C = 410e^{-j30^\circ} \text{ Ом}$. Напряжение на входе линии – $u_1(t) = 220\sqrt{2} \sin(314t + 120^\circ) \text{ В}$, на выходе – $u_2(t) = 188,7\sqrt{2} \sin(314t + 79,9^\circ) \text{ В}$. Определить ток и напряжение, записать их мгновенные значения в точке A в 20 км от конца линии.

Задание №8

Линия длиной 25 км получает питание от источника ЭДС $e_1 = 141,4\sin 5000t \text{ В}$ с внутренним сопротивлением $r_{BH} = 100 \text{ Ом}$. Параметры линии: $\underline{Z}_C = 335,5 - j497,4 \text{ Ом}$, $\gamma = (3,48 + j19,70) \cdot 10^{-3} \text{ 1/км}$, $\underline{Z}_H = \underline{Z}_C$. Определить токи, напряжения, мощности на входе и в конце линии, найти КПД линии.

Задание №9

Линия длиной $l = 20 \text{ км}$ и вторичными параметрами $\underline{Z}_C = 1350e^{-j24^\circ} \text{ Ом}$ и $\gamma = 0,0175 + j0,039 \text{ 1/км}$ нагружена на сопротивление, равное волновому. Определить мощность P_2 , передаваемую в нагрузку, и мощность P_1 , подводимую к линии, если напряжение $U_1 = 10 \text{ В}$

Задание №10

Генератор постоянного тока с напряжением 10 кВ питает последовательно соединённые воздушную линию и кабельную. Параметры воздушной ЛРП: $l_1 = 20 \text{ км}$, $r_{01} = 4 \text{ Ом/км}$, $g_{01} = 1 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$. Параметры кабеля: $l_2 = 40 \text{ км}$, $r_{02} = 0,5 \text{ Ом/км}$, $g_{02} = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ См/км}$. Кабель имеет согласованную нагрузку. Определить мощности генератора и приёмника, КПД воздушной линии, кабеля и всей линии.

Задание №11

По силовой ЛЭП длиной 50 км передаются сигналы автоматики и телемеханики. На частоте сигнала коэффициент затухания $\alpha = 96 \text{ мНп/км}$, а $Z_C = 640e^{-j10^\circ} \text{ Ом}$. На частоте сигнала приёмник согласован с линией. Уровень сигнала в начале линии (по мощности) равен $4,6 \text{ Нп}$. Определить напряжение сигнала на приёмном устройстве.

Задание №12

Мощность передающего устройства 1 мВт . На приёмник, согласованный с линией, имеющей $\alpha = 0,02 \text{ Нп/км}$, необходимо передать сигнал мощностью не менее 1 мкВт .

Определить допустимую дальность связи и соотношение напряжений U_1/U_2 сигнала на входе и на выходе линии.

Контрольные вопросы:

1. В чем заключается разница между цепями с сосредоточенными и распределенными параметрами?
2. По какому критерию цепь относят к классу цепей с распределенными или сосредоточенными параметрами?
3. Нарисуйте схему замещения длинной линии.
4. Объясните понятия прямой и обратной бегущих волн.
5. Что такое согласованный режим работы цепи с распределенными параметрами, чем он характеризуется?

Практическая работа №20. Решение дифференциальных уравнений для однородной линии с распределенными параметрами при установившемся синусоидальном токе. Расчет переходных процессов в длинных линиях.

Цель: Приобрести навыки расчета и анализа переходных процессов в длинных линиях.

Основы теории:

При анализе переходных процессов в ЛРП делаются следующие допущения:

- рассматриваются переходные процессы, возникающие только в результате коммутаций;
- при анализе переходных процессов в ЛРП не требуется высокая точность, что позволяет сделать нижеприведенные допущения;
- пренебрегают резистивными элементами ЛРП r_0 и g_0 , то есть рассматриваются только линии без потерь. В этом случае расчёт упрощается, поскольку в ЛБП волны распространяются без затухания, а характеристическое сопротивление является чисто резистивным, благодаря чему не искажается фронт волны при её движении;
- в течение переходного процесса источники считаются постоянными, поскольку длительность пробега волны вдоль линии почти всегда значительно меньше периода переменного источника;
- при рассмотрении многократных отражений в линиях ограничиваются только резистивными цепями. Если источники считаются постоянными, то в линии будут только волны с прямоугольным фронтом.

Исходными для расчётов являются уравнения линии без потерь в частных производных:

$$\begin{aligned}-\frac{\partial u}{\partial x} &= L_0 \frac{\partial i}{\partial t}; \\ -\frac{\partial i}{\partial x} &= C_0 \frac{\partial u}{\partial t}.\end{aligned}$$

Уравнения (8.13) сводятся к виду дифференциальных уравнений второго порядка без правой части

$$\begin{aligned}\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \\ \frac{\partial^2 i}{\partial x^2} &= \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 i}{\partial t^2}.\end{aligned}$$

Решение записывают в виде наложения двух встречных волн, прямой и обратной:

$$u(x;t) = \varphi_1\left(t - \frac{x}{v}\right) + \varphi_2\left(t + \frac{x}{v}\right) = u_{np} + u_{обр};$$

$$i(x;t) = \frac{1}{Z_C} \cdot \left[\varphi_1\left(t - \frac{x}{v}\right) - \varphi_2\left(t + \frac{x}{v}\right) \right] = i_{np} - i_{обр}$$

Поскольку линии без потерь имеют чисто активное волновое сопротивление, то закон Ома в пределах каждой из волн (но не для результирующих u , i) применим и к мгновенным значениям величин:

$$u_{np} = Z_C \cdot i_{np}; \quad u_{обр} = Z_C \cdot i_{обр}; \quad u \neq Z_C \cdot i.$$

Уравнения для тока и для напряжения волны совершенно одинаковы, причём, в них производные по координате пропорциональны производным по времени от тех же величин. Это означает, что в переходном процессе достаточно найти зависимость либо тока, либо напряжения от времени при фиксированной координате, а затем, для получения зависимости от координаты для фиксированного момента времени, перейти к аргументу $[t_{\phi} - x/v]$.

Началом линии будем называть место подключения к линии источника, а *концом* линии – место, где подключается нагрузка. Волны, движущиеся от начала линии к концу (в направлении возрастания координаты x , отсчитываемой от начала линии), называются *прямыми*. Волны, движущиеся обратно (в направлении возрастания координаты y , отсчитываемой от конца линии), называются *обратными*. Возникающую в результате коммутации волну назовём *падающей*, а возникшую в результате отражения падающей – *отражённой*. Таким образом, если коммутация происходит в начале линии, падающая волна является прямой, а отражённая обратной. В случае коммутации в конце линии обратная волна есть падающая, а прямая – отражённая.

Расчёт как возникающих волн, так и отражённых и преломлённых, выполняется по схемам замещения, составленным для сечений линии, где эти волны возникают. Если волна вызвана коммутацией в произвольном сечении линии, то её расчёт на основании принципа наложения сводится к рассмотрению переходного процесса *от включения* соответствующей пассивной цепи на эквивалентный источник ЭДС $e_{\text{экв}} = u_{руб}$ (при замыкании рубильника, см. задачи 8.30-8.33) или *тока* $j_{\text{экв}} = i_{руб}$ (при размыкании рубильника, см. задачи 8.34-8.36). Здесь $u_{руб}$ – напряжение на разомкнутом рубильнике, $i_{руб}$ – ток через замкнутый рубильник в докоммутационном режиме. В схему замещения для соответствующего сечения линии включаются все элементы с сосредоточенными параметрами, имеющиеся в данном сечении, а линия представляется резистором Z_C . Вычисленные в переходном процессе $i(t)$, $u(t)$ накладываются на установившиеся значения докоммутационного режима.

Расчёт переходного процесса, возникающего в результате прихода падающей волны в конец линии (в узел неоднородности 2-2'), нагруженной на произвольное сопротивление Z (рис. 8.2,а), выполняется по эквивалентной схеме с сосредоточенными параметрами (рис. 8.2,б) при нулевых независимых начальных условиях. Далее, из формул $i_{22'} = i_{nad} - i_{omp}$ и $u_{22'} = u_{nad} + u_{omp}$, основанных на принципе наложения, зная параметры падающей волны, можно рассчитать напряжение и ток отражённой волны в функции времени t для нулевой координаты $y = 0$. Сопротивление Z может включать в себя другие линии, представленные своими характеристическими сопротивлениями. Рассчитанные для них токи и напряжения по схеме 8.2,б являются параметрами преломлённых волн, записанные в функции времени для нулевой координаты $x = 0$ (см. задачи 8.44-8.48).

При анализе многократных отражений расчет последующих волн ведётся через коэффициенты отражения от внутренних цепей источника (n_1) и от нагрузки (n_2):

$$n_1 = \frac{R_{BH} - Z_C}{R_{BH} + Z_C}; \quad n_2 = \frac{R_H - Z_C}{R_H + Z_C};$$

$$u_{omp\ k} = n_2 \cdot (n_1 \cdot n_2)^{k-1} \cdot u_{nad1}; \quad u_{nad\ k+1} = (n_1 \cdot n_2)^k \cdot u_{nad1}.$$

Результирующие ток и напряжение на любой момент времени находятся наложением всех прошедших к данному моменту волн. Переходный процесс может иметь аperiodический или колебательный характер. Переходный процесс считают закончившимся, когда результирующие ток и напряжение достигают 95-98% от установившихся значений: $T_{III} = k \cdot t_{пробега}$.

Задания:

Задание №1

Линия без потерь с параметрами $Z_C = 250\ \text{Ом}$, $l = 140\ \text{км}$, $v = 280 \cdot 10^3\ \text{км/с}$ подключается к источнику постоянного напряжения $E_0 = 120\ \text{кВ}$ с внутренней индуктивностью $L_0 = 0,15\ \text{Гн}$. Конец линии разомкнут. Требуется построить графики распределения напряжения $u(t_\phi, y)$ и тока $i(t_\phi, y)$ вдоль линии для двух моментов времени: $t_1 = 0,75l/v$ и $t_2 = 1,5l/v$.

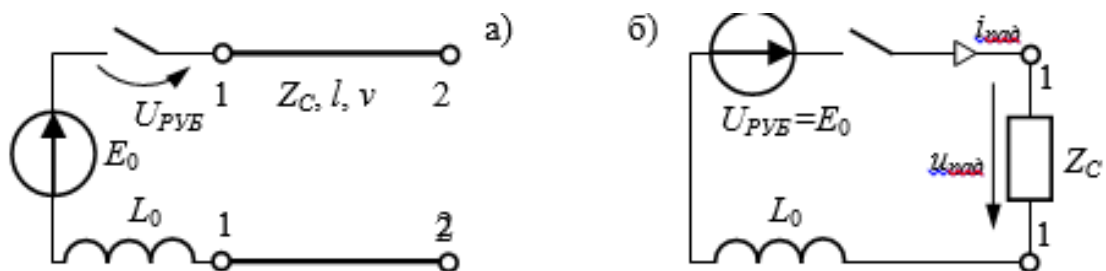


Рисунок 1 – Принципиальная схема к задаче

Задание №2

К линии без потерь, работающей в режиме холостого хода, подключается rC -нагрузка. Определить параметры возникающей обратной волны и построить график распределения волны по линии через $t_{\phi} = 150 \text{ мкс}$ после подключения нагрузки. Числовые данные: $E_0 = 100 \text{ В}$, $Z_C = 250 \text{ Ом}$, $l = 25 \text{ км}$, $v = 100 \cdot 10^3 \text{ км/с}$, $r_H = 150 \text{ Ом}$, $C_H = 0,125 \text{ мкФ}$.

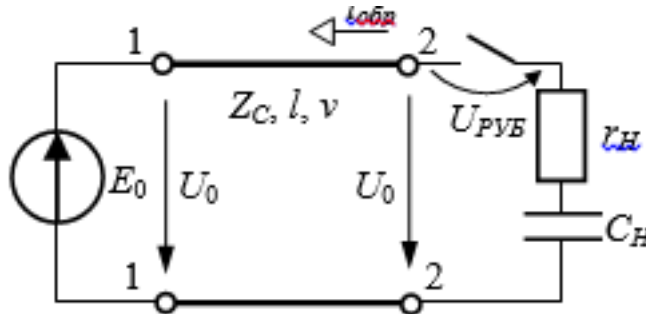


Рисунок 2 – Принципиальная схема к задаче

Задание №3

Воздушная линия ($l = 70 \text{ км}$, $Z_C = 400 \text{ Ом}$), присоединённая к генератору с напряжением $U_0 = 100 \text{ кВ}$ ($r_0 = 0$), длительно работала в режиме холостого хода.

Построить графики распределения напряжения и тока вдоль линии для момента времени спустя $0,2 \text{ мс}$ после подключения к концу линии неразветвлённой активно-индуктивной нагрузки: $r = 200 \text{ Ом}$, $L = 100 \text{ мГн}$.

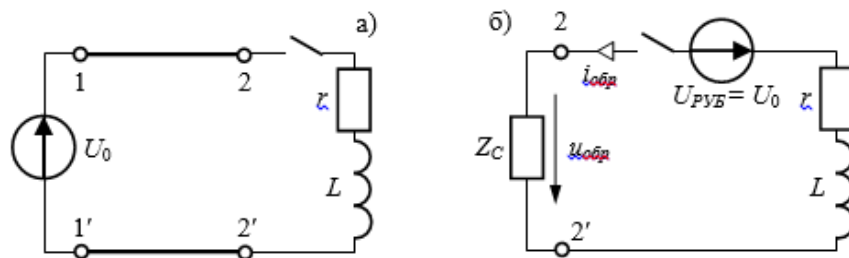


Рисунок 3 – Принципиальная схема к задаче

Контрольные вопросы:

1. Какие цепи называют цепями с распределенными параметрами? В чем состоят их особенности? Почему длинные линии относят к цепям с распределенными параметрами?
2. Как составляют дифференциальные уравнения длинных линий? Как осуществляется переход от уравнений в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям?
3. Опишите волновые процессы в длинной линии при гармоническом воздействии и их особенности.

4. Дайте общую характеристику режима бегущих волн. Каковы законы изменения амплитуд и фазовых углов в этом режиме?
5. В чем состоят особенности режимов стоячих и смешанных волн?
6. Какие особенности нестационарных процессов наблюдаются в линии с согласованной нагрузкой, в несогласованной линии, в разомкнутой и короткозамкнутой линиях?

Практическая работа №21. Электростатическое поле. Электростатическое поле.

Цель: Изучить методику и приобрести практические навыки расчета электростатического поля.

Основы теории:

Электростатическое поле является частным случаем электромагнитного, оно создается в диэлектрике неподвижными в пространстве и неизменными во времени зарядами. Различают:

- линейный заряд:

$$\tau = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\sum q}{l} = \frac{dq}{dl};$$

- поверхностный заряд:

$$\sigma = \lim_{S \rightarrow 0} \frac{\sum q}{S} = \frac{dq}{dS};$$

- объемный заряд:

$$\rho = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum q}{V} = \frac{dq}{dV}.$$

Основными величинами, характеризующими свойства этого поля, являются его напряженность и потенциал. Если в электростатическое поле поместить настолько малый пробный заряд, что он своим присутствием не исказит его, то на него будет действовать

сила $\vec{F}$, отношение которой к величине заряда и даёт напряженность поля $\vec{E} = \lim_{q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{q}$.

Размерность напряженности

$$[E] = \frac{H}{Kл} = \frac{Дж}{м \cdot Кл} = \frac{В \cdot А \cdot с}{м \cdot А \cdot с} = \frac{В}{м}.$$

Электростатическое поле является потенциальным или безвихревым во всем объеме.

Записывается это следующим образом: $\text{rot } \vec{E} = 0, \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$.

Для характеристики электростатического поля используется скалярный электрический потенциал φ , удовлетворяющий условию

$$\vec{E} = -\text{grad}\varphi = -\nabla \varphi.$$

Диэлектрические тела в электростатическом поле могут поляризоваться, то есть может происходить упорядоченное изменение расположения связанных зарядов под действием сил поля. Степень поляризации характеризуется вектором поляризации $\vec{P} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\sum \vec{q}l}{V}$. Для большинства диэлектриков вектор поляризации пропорционален напряженности поля: $\vec{P} = \epsilon_0 k_{\epsilon} \vec{E}$,

где k_{ϵ} - электрическая восприимчивость.

В теории поля в расчет еще вводят вектор $\vec{D}$, который называется вектором электрического смещения или вектором электрической индукции:

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P} = \epsilon_0 \vec{E} + \epsilon_0 k_{\epsilon} \vec{E} = \epsilon_0 \vec{E} (1 + k_{\epsilon}) = \epsilon_0 \epsilon \vec{E} = \epsilon_a \vec{E},$$

где: $\epsilon = 1 + k_{\epsilon}$ - относительная диэлектрическая проницаемость среды;

$\epsilon_a = \epsilon_0 \epsilon$ - абсолютная диэлектрическая проницаемость среды, в которой создано поле.

Теорема Гаусса представляет собой основной закон электро-статического поля. Ее интегральная и дифференциальная формы записи:

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{s} = \sum q, \quad \text{div } \vec{D} = \rho.$$

Из теоремы Гаусса и соотношения (12.1) вытекают **уравнения Пуассона и Лапласа**.

Уравнение Пуассона: $\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\epsilon_a}$.

Частный вид уравнения Пуассона при $\rho = 0$ называется уравнением Лапласа: $\nabla^2 \varphi = 0$.

Решение уравнений Пуассона и Лапласа позволяет определить закон изменения потенциала по известному распределению заряда. При решении этих уравнений появляются постоянные интегрирования, которые определяются, исходя из граничных условий.

Граничные условия:

- граница диэлектрик-проводник: для всех точек диэлектрика, непосредственно прилегающих к поверхности проводника, равна нулю тангенциальная составляющая напряженности поля ($E_t = 0$), а вектор электрического смещения численно равен поверхностной плотности индуцированного заряда ($D = \sigma$);

- граница диэлектрик-диэлектрик: для всех точек, являющихся общими для двух различных диэлектриков, равны по величине тангенциальные составляющие вектора напряженности ($E_{1t} = E_{2t}$) и нормальные составляющие вектора электрического смещения ($D_{1n} = D_{2n}$).

При расчёте электростатических полей в однородных средах при наличии нескольких зарядов целесообразным является применение **принципа наложения**. При этом найденные от отдельных зарядов величины суммируются: скалярные – алгебраически ($\varphi = \Sigma \pm \varphi_q$, $U = \Sigma \pm U_q$ и т.д.), векторные – векторно ($\vec{E} = \Sigma \vec{E}_q$, $\vec{D} = \Sigma \vec{D}_q$, $\vec{F} = \Sigma \vec{F}_q$).

При расчете полей, где имеется геометрически правильной формы граница раздела различных сред, применяется **метод зеркальных изображений**, сущность которого заключается в том, что влияние границы учитывается введением фиктивных зарядов, расположенных симметрично реальным относительно границы. Величина фиктивных зарядов определяется с помощью коэффициентов неполного отражения (коэффициентов фиктивных зарядов), которые в случае плоской границы диэлектрик-диэлектрик вычисляются по формулам

$$k_1 = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}; \quad k_2 = \frac{2\varepsilon_2}{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}.$$

Электрические ёмкости рассчитываются для устройств, в которых электростатические поля не имеют зон с объёмно распределённым зарядом. Под ёмкостью C между двумя телами, на которых имеются равные и противоположные по знаку заряды, понимают абсолютную величину отношения заряда на одном из тел к напряжению между телами:

$$C = q/U.$$

Энергия электростатического поля может быть определена по её

$$\text{объёмной плотности} \quad w_{\text{э}} = \frac{1}{2}DE = \frac{1}{2}\varepsilon\varepsilon_0 \cdot E^2 = D^2/(2\varepsilon\varepsilon_0).$$

$$\text{Энергия поля в объеме } V \quad W_{\text{э}} = \int_V w_{\text{э}} dV.$$

Силу, действующую со стороны поля на тело, изменение положения которого влияет на энергию поля, можно определять через производную от энергии: $\vec{F} = -\text{grad}W_{\text{э}}$. Сила в

$$\text{некотором направлении } x: F_x = -\frac{\partial W_{\text{э}}}{\partial x}.$$

Для **системы проводников** с радиусами r_k , расположенных вблизи проводящей поверхности, используют формулы Максвелла, основанные на применении метода зеркальных изображений.

$$\text{I группа формул Максвелла: } \varphi_1 = \alpha_{11}\tau_1 + \alpha_{12}\tau_2 + \alpha_{13}\tau_3 + \dots + \alpha_{1n}\tau_n,$$

$$\varphi_2 = \alpha_{21}\tau_1 + \alpha_{22}\tau_2 + \alpha_{23}\tau_3 + \dots + \alpha_{2n}\tau_n,$$

$$\varphi_n = \alpha_{n1}\tau_1 + \alpha_{n2}\tau_2 + \alpha_{n3}\tau_3 + \dots + \alpha_{nn}\tau_n.$$

В этих уравнениях φ_k – потенциал проводников, τ_k – их заряды, потенциальные коэффициенты α вычисляются по формулам

$$\alpha_{kk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{2h_k}{r_k}, \quad \alpha_{km} = \alpha_{mk} = \frac{1}{2\pi\epsilon_a} \ln \frac{b_{km}}{a_{km}},$$

где h_k – высота подвеса провода k , a_{km} – расстояние между проводами k и m , b_{km} – расстояние между проводом k и изображением провода m .

Коэффициенты α_{kk} и α_{km} , зависящие от геометрических размеров тел, их взаимного расположения и свойств среды, в которой они находятся, имеют размерность [м/Ф] и являются положительными.

II группа формул Максвелла: $\tau_1 = \beta_{11}\varphi_1 + \beta_{12}\varphi_2 + \beta_{13}\varphi_3 + \dots + \beta_{1n}\varphi_n$,

$$\tau_2 = \beta_{21}\varphi_1 + \beta_{22}\varphi_2 + \beta_{23}\varphi_3 + \dots + \beta_{2n}\varphi_n,$$

$$\tau_n = \beta_{n1}\varphi_1 + \beta_{n2}\varphi_2 + \beta_{n3}\varphi_3 + \dots + \beta_{nn}\varphi_n.$$

В этих уравнениях $\beta_{km} = \frac{\Delta_{km}}{\Delta}$ – емкостные коэффициенты,

где Δ – определитель системы I группы формул Максвелла,

Δ_{km} – алгебраическое дополнение.

Размерность ёмкостных коэффициентов [Ф/м].

III группа формул Максвелла: $\tau_1 = C_{11}\varphi_1 + C_{12}U_{12} + C_{13}U_{13} + \dots + C_{1n}U_{1n}$,

$$\tau_2 = C_{21}U_{21} + C_{22}\varphi_2 + C_{23}U_{23} + \dots + C_{2n}U_{2n},$$

$$\tau_n = C_{n1}U_{n1} + C_{n2}U_{n2} + C_{n3}U_{n3} + \dots + C_{nn}\varphi_n,$$

где U_{km} – напряжение между проводами k и m .

Входящие в эти уравнения коэффициенты C называются частичными емкостями:

$$C_{kk} = \sum_{m=1}^n \beta_{km} = \beta_{k1} + \beta_{k2} + \dots + \beta_{kk} + \dots + \beta_{kn} - \text{собственная частичная емкость,}$$

$C_{km} = -\beta_{km}$ – взаимная частичная емкость k -го и m -го проводников.

Размерность частичных ёмкостей [Ф/м].

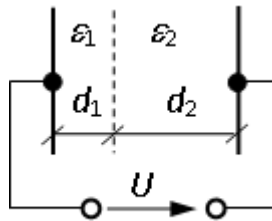
Задания:

Задание №1

Вывести формулы для определения потока вектора электростатической индукции в функции координат а) от точечного заряда через сферическую поверхность радиуса R ; б) от линейного заряда через цилиндрическую поверхность радиуса r .

Задание №2

Какое максимальное напряжение можно подвести к двухслойному плоскому конденсатору, если: $\varepsilon_1 = 2$, $\varepsilon_2 = 4$, $d_1 = 2,5 \text{ мм}$, $d_2 = 5 \text{ мм}$. Пробивная напряженность изоляции: $E_{проб} = 30 \text{ кВ/см}$. Запас электрической прочности принять равным $n = 2,5$. При найденном напряжении рассчитать объёмную плотность энергии второго диэлектрика.



Контрольные вопросы:

- 1 Что называется емкостью?
- 2 Какова емкость плоского конденсатора?
- 3 Какова емкость цилиндрического конденсатора?
- 4 Какова емкость двухпроводной линии?
- 5 Чему равна емкость при последовательном соединении конденсаторов?
- 6 Чему равна емкость при параллельном соединении конденсаторов?

Практическая работа №22. Электростатическое поле. Электрическое поле в проводящих средах.

Цель: Изучить методику и приобрести практические навыки расчета электрического поля в проводящих средах.

Основы теории:

Наличие стационарного электрического поля в проводящей среде вызывает упорядоченное движение зарядов, представляющее собой ток проводимости, который сопровождается выделением тепла. Поэтому для поддержания неизменного электрического поля (постоянной разности потенциалов) и компенсации тепловых потерь энергии нужен постоянный внешний источник, в котором создаётся стороннее электрическое поле процессами неэлектростатического происхождения.

Основными характеристиками электрического поля являются векторные величины – плотность тока проводимости $\vec{\delta}$ [А/м²] и напряжённость поля $\vec{E}$ [В/м], а также скалярный электрический потенциал φ [В]. Проводящую среду характеризуют удельной проводимостью γ [См/м]. В данном разделе рассматриваются поля только в линейных стационарных средах, для которых $\gamma = \text{const}$.

Ток через какую-либо поверхность (сечение) и напряжение на каком-либо участке пути по проводящей среде записываются как интегральные величины:

$$I = \int_S \vec{\delta} \cdot \vec{dS}, \text{ А}; \quad U_{1-2} = \varphi_1 - \varphi_2 = \int_1^2 \vec{E} \cdot \vec{dl}, \text{ В}.$$

Сопротивление участка проводящей среды длиной l и сечением S находится как $R = \frac{1}{\gamma} \frac{l}{S}$, Ом.

Основные законы электрического поля в проводящих средах – это закон Ома и законы Кирхгофа, а также закон Джоуля-Ленца. Законы используются в интегральной и дифференциальной формах:

$U = R \cdot I$ и $\vec{\delta} = \gamma \cdot \vec{E}$ – закон Ома для областей вне источников энергии;

$\vec{\delta} = \gamma \cdot (\vec{E} + \vec{E}_{\text{стор}})$ – обобщённая форма закона Ома для областей поля, занятых источниками энергии. Это выражение одновременно отражает II закон Кирхгофа в дифференциальной форме.

$$\oint_S \vec{\delta} d\vec{S} = 0 \text{ и } \operatorname{div} \vec{\delta} = 0 \text{ – первый закон Кирхгофа;}$$

$$P = \int_V \gamma E^2 dV \text{ и } \frac{dP}{dV} = \vec{\delta} \cdot \vec{E} = \gamma \cdot E^2 \text{ – закон Джоуля-Ленца.}$$

В случае нескольких источников справедлив принцип наложения:

$$\vec{E} = \vec{E}' + \vec{E}'' + \vec{E}''' + \dots; \quad \varphi = \varphi' + \varphi'' + \varphi''' + \dots$$

В областях проводящей среды вне источников ЭДС электрическое поле имеет потенциальный (безвихревой) характер. В этом случае для него справедливы соотношения:

$$\vec{E} = -\operatorname{grad} \varphi, \quad \oint_L \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0, \quad \operatorname{rot} \vec{E} = 0.$$

Получаемое из этих соотношений и первого закона Кирхгофа уравнение Лапласа описывает закон изменения потенциала в проводящей среде вне источников и имеет такой же вид, как и для электростатического поля:

$$\nabla^2 \varphi = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0.$$

Для полей в проводящих средах возможен лишь один тип границы: «среда с проводимостью γ_1 – среда с проводимостью γ_2 ». Основные величины поля $\vec{\delta}$, $\vec{E}$ и φ при этом подчиняются следующим граничным условиям:

$$\delta_{1n} = \delta_{2n}, \quad E_{1t} = E_{2t}, \quad \varphi_1 = \varphi_2.$$

Между электростатическим и полем в проводящей среде в областях вне источников поля существует формальная аналогия, поскольку в обоих случаях работает уравнение Лапласа, граничные условия записываются идентичными формулами и основные величины связаны друг с другом аналогичным образом. Это обстоятельство используется при моделировании полей, а также при их анализе (подраздел 13.2).

Аналогичным же образом используется метод зеркальных изображений, в котором коэффициенты неполного отражения вычисляются по формулам

$$k_1 = \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}, \quad k_2 = \frac{2\gamma_2}{\gamma_1 + \gamma_2}$$

В общем случае задачей расчёта поля в проводящей среде является получение законов изменения $\vec{\delta}$, $\vec{E}$, $\varphi(x,y,z)$ или их интегральных характеристик I , R , U . Наиболее общим методом решения является интегрирование уравнения Лапласа $\nabla^2 \varphi(x,y,z) = 0$, которым описывается это поле (подраздел 13.3).

В прикладных задачах по расчёту полей в проводящих средах чаще всего требуется определить токи утечки и тепловые потери в изоляции кабелей и конденсаторов, а также параметры растекания тока заземлителей: R_3 – сопротивление заземлителя, $U_{ш}$ – шаговое напряжение на поверхности почвы над заземлителем (подраздел 13.5).

Если электрод и его поле имеют правильные формы, например, форму шара или цилиндра, расчёт облегчается, так как имеются уже готовые выражения:

- для поля шарового электрода в однородной неограниченной среде:

$$\delta(R) = \frac{I}{4\pi R^2}, \quad E(R) = \frac{I}{4\pi \gamma R^2}, \quad \varphi(R) = - \int E dR = \frac{I}{4\pi \gamma R} + A.$$

- для поля цилиндрического электрода в однородной неограниченной среде (задача 13.2):

$$\delta(r) = \frac{I_0}{2\pi r}, \quad E(r) = \frac{I_0}{2\pi \gamma r}, \quad \varphi(r) = - \int E dr = \frac{I_0}{2\pi \gamma} \cdot \ln \frac{H}{r}.$$

- ёмкость и удельная проводимость однослойного коаксиального кабеля и двухпроводной линии в однородной среде (задачи 12.8 и 12.47):

$$C_{ок} = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon}{\ln(r_2 / r_1)}, \quad C_{ол} = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon}{\ln(d / r_0)}, \quad g_{ок} = \frac{2\pi \gamma}{\ln(r_2 / r_1)}, \quad g_{ол} = \frac{\pi \gamma}{\ln(d / r_0)}.$$

Задания:

Задание №1

Два металлических шара с радиусами $r_1 = 2$ см и $r_2 = 4$ см погружены глубоко в морскую воду. Расстояние между шарами значительно больше их радиусов: $d = 2$ м.

Определить сопротивление воды между шарами, если удельное сопротивление морской воды $\rho = 100$ Ом·м.

Задание №2

Однослойный коаксиальный кабель работает под напряжением 600 В и имеет размеры: $r_1 = 4$ мм, $r_2 = 8$ мм, $l = 10$ км, удельная проводимость изоляции $\gamma = 1 \cdot 10^{-9}$ См/м. Определить ток утечки и его плотность в изоляции на поверхности жилы и на внутренней стороне оболочки кабеля, а также тепловые потери кабеля.

Контрольные вопросы:

1. Каково значение величины $\text{rot } \mathbf{H}$ в однородном магнитном поле?
2. Является ли функция $\text{div } \mathbf{D}$ векторной?

3. Свободные заряды в некотором объеме отсутствуют, так что $\operatorname{div} \mathbf{D} = 0$. Справедливо ли равенство $\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$ в точках объема, если среда а) однородна б) неоднородна?
4. При каком характере распределения в пространстве электрического тока и заряда величины $\operatorname{rot} \mathbf{H}$, $\operatorname{div} \mathbf{D}$ теряют смысл?
5. Чему равна функция $\operatorname{grad} \varphi$ внутри проводящего тела?

Практическая работа №23. Магнитное поле постоянного тока. Магнитное поле.

Цель: Изучить методику и приобрести практические навыки расчета магнитного поля.

Основы теории:

Магнитное поле неразрывно связано с электрическим током: если где-то протекает ток, то обязательно возникает магнитное поле; если имеется магнитное поле, то оно обязательно создано током. Основной величиной, характеризующей магнитное поле, является вектор магнитной индукции $\vec{B}$, определяемый по силовому воздействию со стороны магнитного поля на помещенный в него проводник с током. В расчетах магнитных полей широко используется вектор напряженности $\vec{H}$. Два указанных вектора связаны между собой соотношением: $\vec{B} = \mu_a \vec{H}$, где $\mu_a = \mu_0 \cdot \mu_r$ – абсолютная магнитная проницаемость среды, в которой создано поле; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ – абсолютная магнитная проницаемость вакуума (магнитная постоянная); μ_r – относительная магнитная проницаемость среды, в которой создано поле. Широкое распространение получил также магнитный поток, представляющий собой поток вектора $\vec{B}$ через некоторую поверхность S : $\Phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{ds}$.

Основным законом магнитного поля является закон полного тока. Его интегральная и дифференциальная формы записи: $\oint_L \vec{H} \cdot \vec{dl} = I$, $\text{rot} \vec{H} = \vec{\delta}$, где I – полный ток, связанный с контуром L ;

$\vec{\delta}$ – плотность тока в рассматриваемой точке поля.

Используя закон полного тока в интегральной форме, легко получить опорные формулы, по которым можно вычислить напряженность поля, созданного в однородной среде цилиндрическим проводником (задача 14.5) и плоской шиной (задача 14.6).

В областях, не занятых токами ($\delta = 0$), магнитное поле является *безвихревым* или *потенциальным* и его можно рассчитывать с помощью скалярного магнитного потенциала φ_M , причем $\vec{H} = -\text{grad } \varphi_M$. Рассчитывают φ_M с помощью уравнения Лапласа $\nabla^2 \varphi_M = 0$. Разность скалярных магнитных потенциалов называется магнитным напряжением

$$U_{M12} = \varphi_{M1} - \varphi_{M2} = \int_1^2 \vec{H} \cdot \vec{dl}.$$

Расчёт магнитного напряжения, созданного уединённым проводником в однородной среде подробно рассмотрен в задаче 14.17.

С помощью векторного магнитного потенциала $\vec{A}$ можно рассчитать магнитное поле в любой области, в том числе и занятой током. Определяется $\vec{A}$ по уравнению Пуассона $\nabla^2 \vec{A} = -\mu_a \vec{\mathcal{J}}$, причем $\operatorname{div} \vec{A} = 0$ и $\Phi = \oint_L \vec{A} \cdot d\vec{l}$.

Граничные условия в магнитном поле: $H_{1t} = H_{2t}$, $B_{1n} = B_{2n}$, $\varphi_{M1} = \varphi_{M2}$.

При расчёте магнитных полей в однородных средах при наличии нескольких источников поля целесообразным является принцип наложения. При этом найденные от отдельных источников величины суммируются: скалярные – алгебраически ($\varphi_M = \Sigma \pm \varphi_{Mq}$, $U_M = \Sigma \pm U_{Mq}$, $\Phi = \Sigma \pm \Phi_q$ и т.д.), векторные – векторно ($\vec{B} = \Sigma \vec{B}_q$, $\vec{H} = \Sigma \vec{H}_q$, $\vec{A} = \Sigma \vec{A}_q$).

Если магнитное поле создается проводниками, расположенными вблизи границы раздела разных сред, то его расчет упрощается применением метода зеркальных изображений аналогично тому, как это делалось при расчете электрических полей. Коэффициенты неполного отражения (коэффициенты фиктивных токов) при этом вычисляются как

$$k_1 = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\mu_1 + \mu_2}, \quad k_2 = \frac{2\mu_1}{\mu_1 + \mu_2}.$$

Индуктивность и взаимная индуктивность контуров:

$$L = \frac{\Psi}{I}; \quad M = \frac{\Psi_{12}}{I_1} = \frac{\Psi_{21}}{I_2}.$$

Энергия магнитного поля контура и её объемная плотность, соответственно,

$$W_M = \frac{LI^2}{2} \quad \text{и} \quad w_M = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{W_M}{V} = \frac{BH}{2} = \frac{\mu_a H^2}{2}.$$

Во многих случаях индуктивность проще рассчитывать через энергию магнитного поля $L = \frac{2W}{I^2}$, а не через потокосцепление Ψ .

Задания:

Задание №1

По тонкому проводнику, представляющему собой окружность радиуса $a = 1,2 \text{ см}$, протекает ток $I = 5 \text{ А}$. Требуется рассчитать магнитную индукцию на оси витка.

Задание №2

В равномерное магнитное поле с напряженностью $H_0 = 120 \text{ А/см}$, созданное в воздухе, помещен сферический магнитный экран с внутренним радиусом $a = 6 \text{ см}$ и наружным $b = 7 \text{ см}$. Тело экрана выполнено из материала с относительной магнитной проницаемостью $\mu_r = 400$. Рассчитать коэффициент ослабления поля $K_{осл} = H_1/H_0$, где H_1 – напряженность поля внутри экрана.

Рассчитать $K_{осл}$ для цилиндрического экрана с теми же размерами a и b .

Контрольные вопросы:

1. Что понимается под магнитным полем? Когда и кем было открыто магнитное поле проводника с током?
2. Как графически изображаются магнитные поля? Что такое силовая линия? Изобразите графически простейшие магнитные поля.
3. Какими силовыми величинами характеризуется магнитное поле? Почему их две? Как они связаны между собой?
4. Запишите закон Био – Саварра – Лапласа в дифференциальной форме и рассмотрите его частные случаи. В каких единицах измеряется напряженность магнитного поля в СИ?
5. Как определить величину и направление силы Ампера?
6. Как установить единицу измерения индукции магнитного поля в СИ? Найдите силу взаимодействия двух параллельных токов.
7. Чему равна индукция магнитного поля движущегося заряда?
8. Сформулируйте и поясните закон полного тока.
9. Что такое магнитный поток? В каких единицах он измеряется в СИ? Чему равна работа перемещения проводника и контура с током в магнитном поле?
10. Что понимается под силой Лоренца? Как определить ее величину и направление?
11. Рассмотрите некоторые частные случаи движения заряженных частиц в однородном магнитном поле.
12. В чем состоит эффект Холла и где он используется?

Практическая работа №24. Переменное электромагнитное поле в однородном и изотропной проводящей среде. Переменное электромагнитное поле.

Цель: Изучить методику и приобрести практические навыки расчета переменного магнитного поля.

Основы теории:

Переменное электромагнитное поле характеризуется изменяющимися во времени точечными и интегральными характеристиками. В этом едином поле для удобства анализа выделяются две стороны – электрическое поле и магнитное поле, которые взаимно связаны и взаимно обусловлены.

Теория электромагнитного поля оперирует полными токами, включающими в себя три вида тока: 1) ток проводимости; 2) ток смещения; 3) ток переноса.

$$\text{Плотность полного тока} \quad \vec{\mathcal{D}} = \gamma \vec{E} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} + \rho \vec{v},$$

где $\gamma \vec{E} = \vec{\mathcal{D}}_{np}$ – плотность тока проводимости (движущихся свободных зарядов), γ – удельная проводимость проводящей среды, $\vec{E}$ – напряжённость электрического поля;

$\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = \vec{\mathcal{D}}_{см}$ – плотность тока смещения, $\vec{D}$ – вектор электрического смещения (электростатической индукции); напомним, что $\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$, $\vec{P}$ – вектор поляризации вещества, определяющий поле смещённых связанных зарядов вещества; таким образом, в плотности тока смещения выделяют два слагаемых $\vec{\mathcal{D}}_{см} = \vec{\mathcal{D}}'_{см} + \vec{\mathcal{D}}''_{см}$, где $\vec{\mathcal{D}}'_{см} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$, что

указывает на наличие тока смещения и в пустоте, а $\vec{\mathcal{D}}''_{см} = \frac{\partial \vec{P}}{\partial t}$; в свою очередь, $\vec{D} = \epsilon \epsilon_0$

$$\vec{E}, \text{ поэтому } \vec{\mathcal{D}}_{см} = \epsilon \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t};$$

$\rho \vec{v} = \vec{\mathcal{D}}_{пер}$ – плотность тока переноса, ρ – объёмная плотность переносимых свободных зарядов; $\vec{v}$ – вектор скорости переноса.

Полный ток $i = \int_S \vec{\delta} d\vec{S}$, как и ток проводимости, обладает свойством непрерывности,

то есть для полного тока выполняется как интегральное соотношение $\oint_S \vec{\delta} d\vec{S} = 0$, известное

под названием первого закона Кирхгофа, так и дифференциальное $\operatorname{div} \vec{\delta} = 0$.

Заслугой Д. Максвелла является то, что он ввёл в теорию электромагнитных явлений ток смещения и предположил, что последний создаёт в окружающем пространстве магнитное поле так же, как и ток проводимости, что впоследствии было неоднократно подтверждено экспериментами (в частности, радио, телевидение и др.). Д. Максвелл также сформулировал основные уравнения поля.

Задания:

Задание №1

Обкладки плоского конденсатора разделены несовершенным диэлектриком с удельной проводимостью $\gamma = 5 \cdot 10^{-5} \text{ См/м}$, относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4$. Конденсатор подключен к источнику синусоидального напряжения $u = 3000 \sin \omega t \text{ В}$. Расстояние между обкладками конденсатора $d = 1 \text{ см}$. Считая, что ε и γ не зависят от частоты, а линейные размеры обкладок значительно превышают расстояние d , вычислить амплитуды плотностей тока проводимости $\delta_{\text{тпр}}$ и тока смещения $\delta_{\text{тсм}}$ для следующих частот: 1) $f_1 = 0$; 2) $f_2 = 50 \text{ Гц}$; 3) $f_3 = 400 \text{ Гц}$; 4) $f_4 = 400 \text{ кГц}$. Записать для этих четырёх случаев мгновенное значение тока i_0 , приходящееся на 1 м^2 поверхности обкладок конденсатора, а также их комплексные амплитуды.

Задание №2

Обкладки плоского конденсатора имеют форму дисков и расположены на расстоянии $d = 1 \text{ см}$ друг от друга, разделены несовершенным диэлектриком с удельной проводимостью $\gamma = 5 \cdot 10^{-5} \text{ См/м}$, относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 4$, магнитной проницаемостью $\mu = 1$. Считая, что параметры диэлектрика не зависят от частоты, найти выражения для мгновенных значений напряжённости и магнитной индукции в точках, лежащих между обкладками конденсатора на расстоянии r от оси симметрии, пренебрегая краевым эффектом. Радиус диска $a = 6 \text{ см}$. К конденсатору приложено напряжение $u = 3000 \sin \omega t \text{ В}$.

Задачу решить для двух значений частоты 1) $f_1 = 0$; 2) $f_2 = 400 \text{ кГц}$.

Задание №3

По уединённому медному проводу радиусом $a = 0,5 \text{ см}$ протекает постоянный ток $I = 500 \text{ А}$. Удельная проводимость меди $\gamma = 5,7 \cdot 10^7 \text{ См/м}$. Длина провода $l = 50 \text{ м}$. Найти поток мощности, входящий внутрь провода, и с его помощью определить сопротивление провода R .

Задание №4

Плоская, линейно поляризованная электромагнитная волна распространяется по диэлектрику со свойствами $\varepsilon_1 = 7$, $\mu_1 = 1$, $\gamma_1 = 0$ в направлении, перпендикулярном плоской неограниченной поверхности второго диэлектрика со свойствами $\varepsilon_2 = 2$, $\mu_2 = 1$, $\gamma_2 = 0$. Частота гармонического сигнала $f = 10^9 \text{ Гц}$, амплитуда вектора напряженности электрического поля прямой волны $E_{\text{мр}} = 450 \text{ мВ/м}$.

Найти законы изменения действующих значений H и E в обеих средах, построить их графики в функции координат.

Контрольные вопросы:

1. Что называют магнитным полем?
2. Составной частью какого поля является магнитное поле?
3. Как определяют направление магнитного поля?
4. Как определяют направление магнитного поля в зависимости от направления электрического тока?
5. Как применить правило левой руки для определения направления поля катушки?
6. Что называют магнитной индукцией и в чем ее измеряют?
7. От чего зависит магнитная индукция в точке?
8. От чего зависит сила электромагнитного воздействия на проводник?
9. Как определить направление силы по правилу левой руки?
10. От чего зависит электромагнитная сила двух проводников с током?
11. Что называют магнитным потоком и в чем его измеряют?
12. Что характеризует абсолютная магнитная проницаемость среды и в каких единицах она измеряется? Чему равна магнитная постоянная?
13. Что характеризует относительная магнитная проницаемость?
14. Что такое напряженность магнитного поля и какова ее единица измерения?
15. Какие зависимости показаны в законе полного тока?
16. Какая зависимость магнитного поля в электрическом проводе и вне его?

17. На основании какого закона определяют магнитное поле кольцевой и цилиндрической катушек?

5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

5.1.2 Перечень основной литературы:

1. Теоретические основы электротехники : учебник / И. Я. Лизан, К. Н. Маренич, И. В. Ковалева [и др.]. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. — 628 с. — ISBN 978-5-9729-0663-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/114971.html>

2. Зонов, В. Н. Теоретические основы электротехники. Электрические и магнитные цепи постоянного тока : учебное пособие / В. Н. Зонов, П. В. Зонов, Ю. Б. Ефимова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 80 с. — ISBN 978-5-7782-4090-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98742.html>

3. Петренко, Ю. В. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи с распределенными параметрами : учебное пособие / Ю. В. Петренко. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2019. — 64 с. — ISBN 978-5-7782-3876-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99223.html>

5.1.3 Перечень дополнительной литературы:

1. Горбунова Л.Н. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] / Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева. — Электрон. текстовые данные. — Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2015. — 117 с. — 978-5-9642-0269-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55913.html>

2. Крутов А.В. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 376 с. — 978-985-503-580-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67742.html>

5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным занятиям по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

3. Методические рекомендации для выполнения расчетно-графической работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

4. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

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

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению расчетно-графической работы
по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	
1.	Цель, задачи и реализуемые компетенции дисциплины	
2.	Формулировка задания и ее объем	
3.	Общие требования к написанию и оформлению работы	
4.	Рекомендации по выполнению задания	
5.	План-график выполнения задания	
6.	Критерии оценивания работы	
7.	Порядок защиты работы	
8	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	
8.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины	
8.2	Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине	
8.3	Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины	

Введение

Одним из основных видов занятий по курсу дисциплины «Теоретические основы электротехники» является выполнение расчетно-графической работы. Предлагаемые в методическом указании задания охватывают весь основной материал курса и соответствуют утвержденной программе.

1. Цель, задачи и реализуемые компетенции дисциплины

Целью дисциплины «Теоретические основы электротехники» является изучение студентами основных закономерностей процессов протекающих в электротехнических цепях и методов определения электрических величин, характеризующие эти процессы, приобретение теоретических и практических знаний по теоретическим основам электротехники, необходимых для успешного освоения последующих дисциплин специальности.

Задачи дисциплины состоят в освоении студентами:

- принципов составления и записи уравнений, описывающих процессы в цепи в соответствии с законами Кирхгофа, Ома, Фарадея - Максвелла - Ленца;
- основных принципов анализа процессов по линейным схемам замещения цепей: наложения, линейности, компенсации, взаимности;
- основных методов анализа линейных схем (методы контурных токов, узловых потенциалов, эквивалентного источника) и получении начальных сведений о возможности использования ЭВМ при расчетах;
- комплексного метода определения амплитуд и начальных фаз гармонических токов и напряжений в установившихся режимах;
- классического, операторного и интегрального метода анализа переходных процессов по линейным схемам замещения цепей, а также принципов составления уравнений и подготовки информации для расчета переходных процессов на ЭВМ методом переменных состояний;
- методов расчета электромагнитных процессов во взаимосвязанных контурах;
- основ теории четырехполюсников;
- методов построения фильтров и их расчета в электротехнических и электронных схемах;
- основ анализа процессов в цепях с распределенными параметрами;
- основ теории поля;
- методов электрических измерений с использованием измерительных приборов;
- основных процессов, протекающих в электрических цепях с негармоническими токами.

При выполнении контрольной работы реализуются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-4 Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин	ИД-1 _{ОПК-4} Использует методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока.	Знает основные законы электротехники, теорию электромагнитного поля и цепей с распределенными параметрами, методы анализа, моделирования и расчета линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока
	ИД-2 _{ОПК-4} Использует методы расчета переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.	Умеет использовать методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока.
	ИД-3 _{ОПК-4} Применяет знания теории электромагнитного поля и цепей с распределенными параметрами.	Владеет навыками расчета переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.

2. Формулировка задания и ее объем

Задание №1

Номер рисунка, на котором изображена расчетная схема, номер таблицы значений параметров и метод, которым необходимо решить задачу, представлены в таблице №1.

Таблица 1 – Методы решения задач

Номер варианта	Номер рисунков	Номер таблиц	Методы решения задач
1...10	1	2	контурных токов
11...20	2	3	преобразования схемы и узлового напряжения
21...30	3	4	узловых потенциалов

Варианты 1 – 10

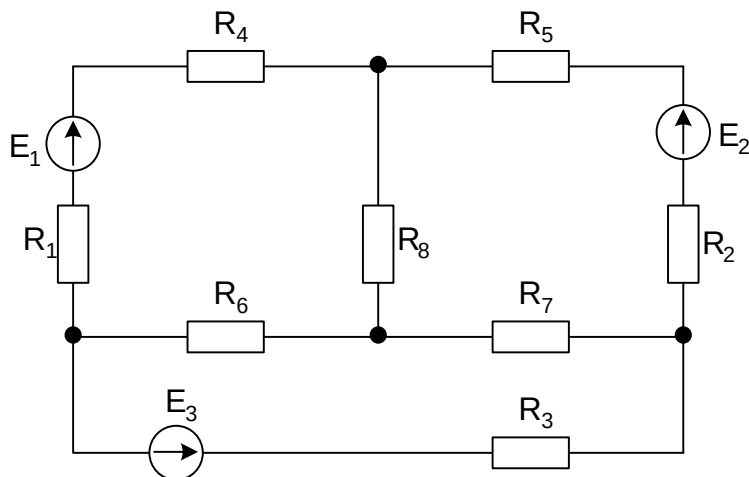


Рисунок 1 – Схема электрическая принципиальная к вариантам 1...10

Таблица 2 – Варианты заданий для вариантов 1-10

№ варианта	E_1 , В	E_2 , В	E_3 , В	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом	R_7 , Ом	R_8 , Ом
1	220	220	110	5	5	2	55	55	20	20	40
2	15	12	6	0,3	0,2	0,1	19,7	24,8	29,9	30	15
3	24	12	6	0,3	0,2	0,1	9,7	9,8	50	50	20
4	220	110	110	6	3	3	54	87	57	40	83
5	12	6	6	2	1	1	3	12	5	7	8
6	24	12	6	4	2	1	6	8	10	10	20
7	24	12	12	4	2	2	12	16	20	20	40
8	24	6	6	6	1	1	4	4	10	10	10
9	12	12	6	2	2	1	6	16	10	20	40
10	100	70	30	5	4	2	15	60	70	28	60

Расчет выполнить методом контурных токов

Варианты 11 – 20

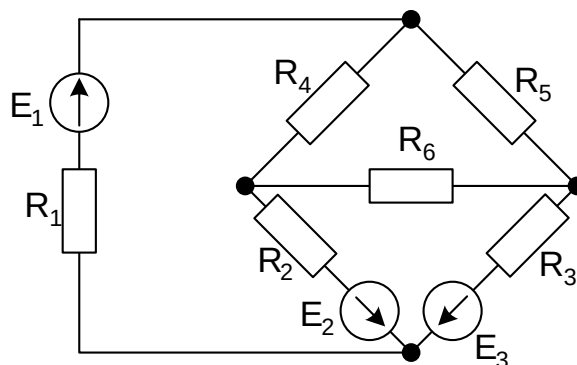


Рисунок 2 – Схема электрическая принципиальная к вариантам 11...20

Таблица 3 – Варианты заданий для вариантов 11-20

№ варианта	E_1 , В	E_2 , В	E_3 , В	R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	R_6 , Ом
11	20	12	6	3,8	3	7	4	6	10
12	-20	12	6	12	1	2,5	6	10	0,5
13	15	5	-5	0,4	0,8	0,8	20	30	25
14	24	-5	5	0,2	0,8	0,8	30	50	40
15	24	12	12	0,2	0,4	0,4	12	24	4
16	200	50	50	3,5	3,75	7,5	25	50	25
17	100	25	-25	12	6	1,83	15	40	20
18	100	50	25	4	6,5	0,5	20	15	15
19	200	12	-12	20	4	1,25	40	45	15
20	220	-24	15	2,5	5	7	25	15	10

Расчет выполнить использованием методов преобразования схемы и узлового напряжения.

Варианты 21 – 30

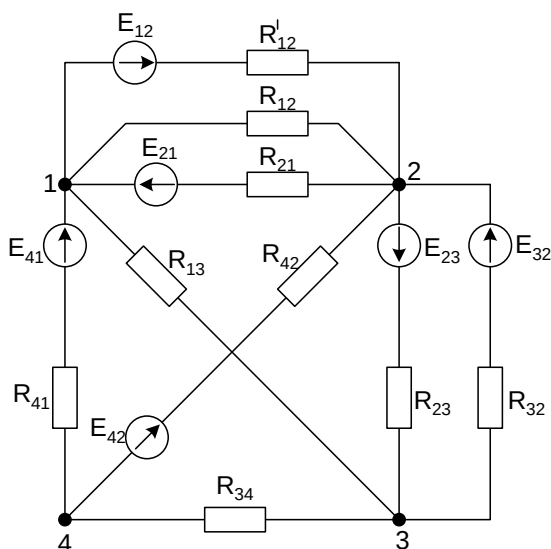


Рисунок 3 – Схема электрическая принципиальная к вариантам 21...30

Таблица 4 – Варианты заданий для вариантов 21-30

№ варианта	$E_{12}, \text{В}$	$E_{21}, \text{В}$	$E_{23}, \text{В}$	$E_{32}, \text{В}$	$E_{41}, \text{В}$	$E_{42}, \text{В}$	$R_{12}, \text{Ом}$	$R'_{12}, \text{Ом}$	$R_{21}, \text{Ом}$	$R_{23}, \text{Ом}$	$R_{32}, \text{Ом}$	$R_{34}, \text{Ом}$	$R_{13}, \text{Ом}$	$R_{41}, \text{Ом}$	$R_{42}, \text{Ом}$
21	8	8	15	5	12	20	4	2,5	10	0,5	2	1	5	6,25	10
22	6	12	12	6	24	24	8	0,5	0,4	0,4	0,5	4	10	12,5	8
23	5	15	5	15	12	12	5	12,5	25	10	20	2	0,5	2,5	4
24	12	12	6	6	5	15	2	4	4	8	12,5	20	50	0,4	1
25	24	12	24	6	15	15	80	25	12,5	40	20	25	40	0,2	0,1
26	100	50	100	100	100	50	250	40	50	25	50	200	250	2	5
27	250	100	100	50	250	100	500	400	200	125	250	500	200	10	5
28	250	250	100	100	250	50	50	400	200	50	100	20	50	4	2
29	12	24	5	15	100	100	8	4	8	25	50	10	20	25	10
30	24	12	5	15	250	250	100	125	125	5	10	250	50	2,5	2,5

Задание №2

Во всех вариантах выполняется расчет схемы, представленной на Рис. 4. Значения параметров элементов схемы помещены в таблице 5. Для некоторых реактивных в таблице указаны сопротивления (под чертой), для других - индуктивности или емкости (над чертой).

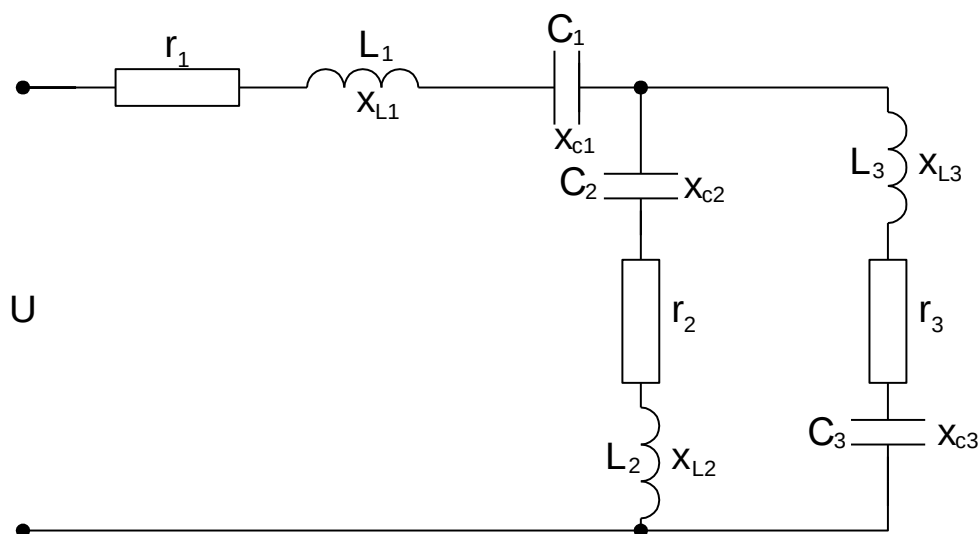


Рисунок 4 – Схема электрическая принципиальная к задаче №2

Таблица 5 – Варианты заданий к задаче №2

№ варианта	$U, \text{В}$	$f, \text{Гц}$	$r_1, \text{Ом}$	$L_1, \text{мГ}$ $x_{L1}, \text{Ом}$	$C_1, \text{мкФ}$ $x_{C1}, \text{Ом}$	$r_2, \text{Ом}$	$L_2, \text{мГ}$ $x_{L2}, \text{Ом}$	$C_2, \text{мкФ}$ $x_{C2}, \text{Ом}$	$r_3, \text{Ом}$	$L_3, \text{мГ}$ $x_{L3}, \text{Ом}$	$C_3, \text{мкФ}$ $x_{C3}, \text{Ом}$
1	250	50	30	30	106	20	31,8	50	40	127,3	10
2	127	50	20	40	79,6	40	30	79,6	60	140	63,7
3	220	50	30	30	30	260	159	30	40	63,7	50
4	220	50	10	159	100	20	99,5				

№ вари- анта	U, В	f, Гц	r ₁ , Ом	L ₁ , мГ X _{L1} , Ом	C ₁ , мкФ X _{C1} , Ом	r ₂ , Ом	L ₂ , мГ X _{L2} , Ом	C ₂ , мкФ X _{C2} , Ом	r ₃ , Ом	L ₃ , мГ X _{L3} , Ом	C ₃ , мкФ X _{C3} , Ом
				20			80	10			40
5	127	50	50	40	40	45	318,4	67	50	127,3	106
6	127	50	50	63,7	25	30	127,4	10	50	25	106
7	220	50	40	50	50	10	63,7	50	55	250	159
8	380	50	20	20	318,3	100	80	50	30	36	318,5
9	380	50	20	10	40	50	10	10	50	79,6	159
10	380	50	30	25	50	30	40	79,6	50	63,7	10
11	220	50	30	40	80	68	110	30	40	95,5	53
12	220	50	40	30	60	80	62,5	79	30	63,7	60
13	127	50	30	31,8	50	50	100	159	40	40	70
14	380	50	30	10	50	50	318,5	50	33	100	63,7
15	127	50	50	100	53	20	127,3	40	20	44,7	50
16	127	50	40	95,5	53	30	40	40	40	10	159
17	127	50	40	10	40	45	53	40	65	207	88,5
18	220	50	30	31,8 10	63,7	40	25	30	30	63,7	60
19	380	50	40	31,8	20	25	30	40	80	80	45,5
20	380	50	30	10	63,7	30	40	63,7	30	95,5	70
21	220	60	30	106,1	33,2	68	30	110	40	30	60
22	220	60	40	79,6	44,2	30	40	40	45	65	60
23	127	60	40	106,1	63,7	30	10	106,1	50	100	70
24	380	60	30	26,5	53	50	40	20	30	10	50
25	127	60	40	20	60	20	106,1	40	50	10	53
26	127	60	40	26,5	66,3	30	20	60	30	20	58

№ варианта	U, В	f, Гц	r ₁ , Ом	L ₁ , мГ X _{L1} , Ом	C ₁ , мкФ X _{C1} , Ом	r ₂ , Ом	L ₂ , мГ X _{L2} , Ом	C ₂ , мкФ X _{C2} , Ом	r ₃ , Ом	L ₃ , мГ X _{L3} , Ом	C ₃ , мкФ X _{C3} , Ом
27	127	60	40	30	44,2	30	106,1	63,7	40	10	40
28	220	60	30	79,6	30	40	26,5	88,4	30	20	60
29	380	60	40	53	50	40	79,6	25	40	40	37,9
30	380	60	30	26,5	50	30	40	30	30	30	37,9

Задание №3

Для получения исходных данных необходимо:

1. Нарисовать скелет схемы (Рис. 5).
2. Выбрать строку данных об элементах схемы по Таблице 6, исходя из номера заданного варианта.
3. Выбрать строку данных о параметрах элементов по Таблице 7, исходя из данных Таблицы 6.
4. Заполнить скелет схемы соответствующими элементами по варианту
 - 4.1. В Таблице 6 указаны элементы, которые необходимо включить в соответствующие ветви: R, L или C.
 - 4.2. В ту ветвь, где стоит знак “+”, необходимо включить источник Э.Д.С. E(t) последовательно с пассивным элементом. Направление источника студент может задать произвольно.
 - 4.3. Ветвь, обозначенная XX, находится в режиме холостого хода, то есть она обрвана. Рисовать эту ветвь в схеме не следует.
 - 4.4. Ветвь, обозначенная КЗ, находится в режиме короткого замыкания, то есть на ее месте будет закоротка, которую нужно стянуть в узел.
 - 4.5. Параметры всех включенных элементов даны в Таблице 7.

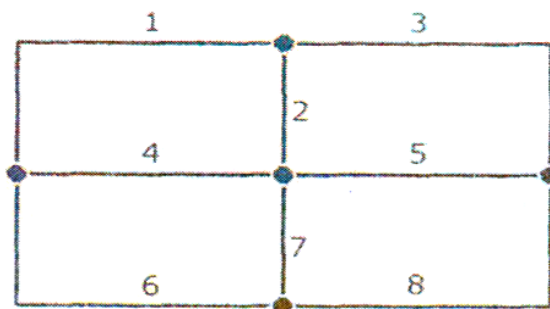


Рисунок 5 – Скелет схемы

Таблица 6 – Элементы схемы

№ Варианта	Номера ветвей								№ Варианта Табл. 7
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	XX	+L1	C1	R1	L2	C2	R2	R3	1
2	XX	C1	+R1	L2	C2	R2	R3	L1	2
3	XX	R1	L2	+C2	R2	R3	L1	C1	3
4	XX	L2	C2	R2	+R3	L1	C1	R1	4
5	XX	C2	R2	R3	L1	+C1	R1	L2	5
6	XX	R2	R3	L1	C1	R1	+L2	C2	6
7	XX	R3	L1	C1	R1	L2	C2	+R2	7
8	+C1	K3	R1	L2	C2	R2	R3	L1	8
9	R	K3	+L2	C2	R2	R3	L1	C1	9
10	L2	K3	C2	+R2	R3	L1	C1	R1	10
11	C2	K3	R2	R3	+L1	C1	R1	L2	11
12	R2	K3	R3	L1	C1	+R1	L2	C2	12
13	R3	K3	L1	C1	R1	L2	+C2	R2	13
14	L1	K3	C1	R1	L2	C2	R2	+R3	14
15	+L1	L2	XX	C2	R2	R3	L1	C1	15
16	L2	+C2	XX	R2	R3	L1	C1	R1	16
17	C2	R2	XX	+R3	L1	C1	R1	L2	17
18	R2	R3	XX	L1	+C1	R1	L2	C2	18
19	R3	L1	XX	C1	R1	+L2	C2	R2	19
20	L1	C1	XX	R1	L2	C2	+R2	R3	20

Таблица 7 – Параметры элементов

№ Варианта	E, В	f, Гц	Ψ, гра- дусы	Параметры пассивных элементов						
				R1 Ом	R2 Ом	R3 Ом	L1 мГн	L2 мГн	C1 мкФ	C2 мкФ
1	30	100	-70	20	30	10	31,8	63,7	53,08	24,5
2	20	200	-30	50	40	20	39,8	31,85	39,61	12,25
3	40	300	45	28	33	15	10,6	13,27	8,85	10,62
4	12	400	35	46	35	30	25,881	14,73	11,38	6,13
5	50	500	120	20	45	12	6,36	20,7	4,9	15,92
6	40	600	30	36	58	24	6,63	15,29	4,42	10,62
7	60	700	50	45	25	16	8,41	4,79	3,5	6,5
8	30	800	160	30	40	22	3,98	12,94	3,06	9,95
9	25	900	20	26	30	30	11,5	8,85	10,61	5,06
10	20	1000	-150	65,4	50	40	7,17	10,35	2,45	3,98
11	35	100	-15	38	42	15	39,8	79,6	31,85	63,69
12	10	200	-120	27	48	14	15,9	47,75	13,27	39,81
13	45	300	45	37	45	12	13,27	31,83	8,85	21,23
14	70	400	90	32	57	10	11,95	25,88	6,13	13,27
15	55	500	-40	26	35	20	19,1	6,36	15,92	5,31
16	35	600	60	56	38	25	7,97	17,25	4,42	13,27

17	20	700	-30	40	30	30	13,64	8,41	9,1	3,5
18	40	800	20	25	45	15	12,94	3,98	9,95	3,06
19	30	900	-20	35	60	12	6,54	11,5	2,72	5,06
20	20	1000	50	55	25	20	9,55	7,96	3,18	2,65
21	40	100	120	47	48	14	47,8	95,5	26,54	53,08
22	10	200	-160	38	42	20	19,9	35,85	15,93	31,85
23	45	300	200	26	35	30	10,6	23,9	11,8	26,54
24	12	400	-60	34	36	25	7,95	17,93	8,85	13,91
25	50	500	-20	27	38	12	6,36	14,34	7,08	15,92
26	30	600	-270	45	50	14	5,3	11,95	5,9	13,27
27	55	700	-70	20	25	20	4,54	10,24	5,06	11,37
28	15	800	-135	38	24	30	3,98	8,86	4,42	9,96
29	100	60	0	100	150	175	1,57	12,75	20,31	15,29
30	220	50	0	150	220	330	19,12	11,90	10,00	20,00

Задание №4

К трёхфазному трансформатору, вторичная обмотка которого соединена по схеме «звезда», подключена несимметричная нагрузка по такой же схеме. Задана величина фазного напряжения U_ϕ на зажимах вторичной обмотки трансформатора и сопротивления нагрузки

$$Z_a = r_a + jx_a, Z_b = r_b + jx_b, Z_c = r_c + jx_c.$$

Необходимо найти линейные токи и ток нейтрального провода. При отсутствии нейтрального провода найти напряжение смещения нейтрали и напряжения на каждой фазе нагрузки. Построить векторные диаграммы токов и напряжений для схем с нейтральным проводом и без него. Значения U_ϕ и сопротивлений нагрузки представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Варианты к задаче 4

№ варианта	U_ϕ , В	r_a , Ом	X_a , Ом	r_b , Ом	X_b , Ом	r_c Ом	X_c Ом
1	50	4	-5	8	-10	4	12
2	220	12	20	20	12	25	15
3	110	15	-8	18	10	14	-15
4	100	20	15	8	-12	7	30
5	200	4	-20	15	8	12	7
6	50	16	-4	20	-15	8	12
7	110	25	16	4	20	15	-8
8	220	10	25	16	-4	20	-15
9	100	12	-10	25	16	4	-20
10	200	18	12	10	-25	16	4
11	50	4	-18	12	10	25	-16
12	110	12	16	18	-12	10	25
13	220	25	30	25	-18	12	10

14	100	8	-25	12	15	18	12
15	200	20	-25	30	25	12	-10
16	6	2	-2	4	4	6	-3
17	12	4	8	6	-5	8	12
18	15	6	4	8	5	10	-5
19	24	6	-3	4	3	2	15
20	48	12	12	8	-8	6	6
21	60	9	0	15	-10	6	10
22	6	6	-2	4	8	2	0
23	12	8	-5	6	-2	3	8
24	24	10	12	15	6	8	-10
25	48	15	0	10	-2	25	20
26	60	18	15	15	-6	18	12
27	120	25	22	40	25	15	-15
28	6	3	2	10	-6	6	4
29	12	14	7	16	-9	25	20
30	15	2	1	20	20	10	-10

Задание №5

В электрической цепи, представленной на рис.6, действует несинусоидальная э.д.с. Значения частоты первой гармоники и параметры элементов электрической цепи сведены в таблицу 9. Кривая изменения э.д.с., симметричная относительно оси абсцисс, представлена в таблице 10 ордина интервалом фазы 10° в пределах от 0° до 180° . В электрической цепи имеется сопротивление нагрузки R_H и фильтр, состоящий либо из параллельно включённых конденсатора C_1 и катушки индуктивности с параметрами L_1 и R_K , либо из последовательно включённых конденсатора C_2 и катушки индуктивности с параметрами L_2 и R_K .

Требуется разложить несинусоидальную э.д.с. на гармонические составляющие, для каждой гармоники определить величину и фазу тока в цепи нагрузки, действующее значение тока и мощность в цепи нагрузки. Построить графики изменения во времени э.д.с. и её отдельных гармоник, а также график изменения во времени гармоники тока, имеющей наибольшую амплитуду.

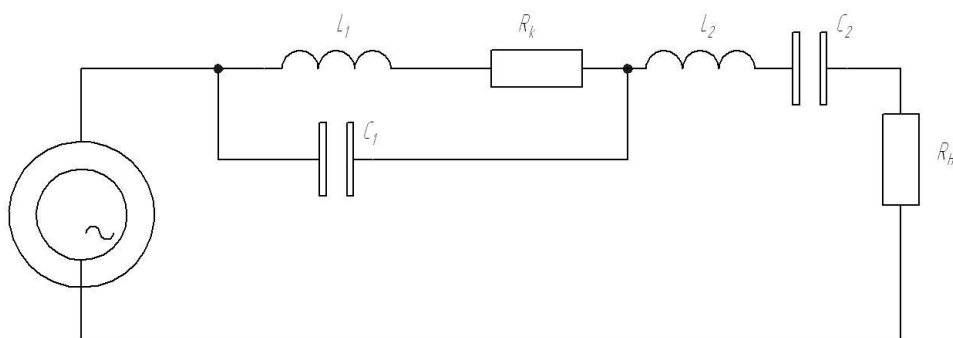


Рисунок 6 – Принципиальная схема к задаче №5

Таблица 9 – Исходные данные к задаче №5

№ варианта	$r_H,$ $Ом$	r_k $Ом$	L_1 $Гн$	C_1 $мкФ$	L_2 $Гн$	C_2 $мкФ$	$f,$ $Гц$
1	200	10	-	-	0,507	20	50
2	100	5	-	-	0,078	10	60
3	150	5	0,0563	20	-	-	100
4	500	10	0,0125	10	-	-	150
5	200	2	-	-	0,633	1	200
6	300	4	-	-	0,09	0,5	250
7	140	10	0,281	1	-	-	300
8	400	6	0,0625	0,5	-	-	350
9	300	3	-	-	0,158	1	400
10	500	10	-	-	0,225	5	50
11	250	5	0,352	20	-	-	60
12	240	8	0,5	1	-	-	75
13	260	6	-	-	1,268	2	100
14	350	7	-	-	0,391	0,5	120
15	180	5	1,127	1	-	-	150
16	320	6	0,141	0,5	-	-	200
17	520	4	-	-	0,811	0,5	250
18	360	10	-	-	0,0313	1	300
19	600	5	0,414	0,5	-	-	350
20	100	7	0,0176	1	-	-	400
21	50	8	-	-	1,014	10	50
22	600	10	-	-	0,156	5	60
23	70	4	0,451	10	-	-	75
24	120	3	0,0563	5	-	-	100
25	25	1	-	-	0,352	5	120
26	130	6	-	-	0,0352	2	200
27	540	7	0,203	2	-	-	250
28	720	10	0,0625	0,5	-	-	300
29	580	4	-	-	0,207	1	350
30	150	8	-	-	0,088	0,2	400

Таблица 10 – Исходные данные к задаче №5

вар \ ωt°	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	по	120	130	140	150	160	170
1	0	4,22	8,32	11,5	13,4	13,6	12,3	9,96	7,37	5,18	3,89	3,71	4,48	5,74	6,81	7,07	6,05	3,6
2	0	7,22	12,1	14,1	13,6	11,5	9,00	7,40	7,80	10,4	14,7	19,9	24,5	27,1	26,7	23,1	16,6	8,45
3	0	78,7	140	169	159	112	42,6	-	-	-	-	-	4,50	74,1	127	147	129	75,7
4	0	101	172	197	169	99	6	-83	-	-	-	-42	57	150	212	226	187	105

5	0	12,7	26,5	39,5	50	56	58	55,5	50	43	36	30	26,8	24,8	23,5	21,5	17,4	10,2
6	0	18,2	28,6	30,8	26,8	19,9	14,5	13,9	20,2	33,1	50,5	68,2	81,9	87,8	83,7	69,8	48,4	23,6
7	0	15	31,7	48,3	62,5	72,8	77,9	77,8	73,3	65,7	56,9	48,5	41,5	36	31,7	27,2	21	12,1
8	0	20,3	47,4	76,3	101	117	120	110	89	62,2	35,2	13,2	0	-3,7	0	7	12,2	10,8
9	0	18	28,3	31,7	31	30	32,4	40,4	54,3	72,6	91,8	108	116	114	102	79,9	52,7	24,6
10	0	26,4	53,9	78,8	97,9	109	111	106	96,1	83,9	72,7	64,3	59,2	56,5	53,9	48,8	38,7	22,3
11	0	166	278	312	262	146	0	-	-	-	-	0	165	312	401	407	327	179
12	0	28	60,5	93,2	121	140	147	142	128	108	86	67,2	53,8	46,1	42,4	39,6	33,2	20,6
13	0	33,1	69	103	130	146	151	144	130	111	93,5	79	69,6	64,4	61	55,8	45,1	26,7
14	0	42,5	66,7	71,9	62,5	46,5	33,7	32,4	47,1	77,4	118	159	191	205	195	163	113	55
15	0	26	45,1	58,3	68	77,3	88,8	104	122	141	157	167	167	156	134	103	68	32,2
16	0	43,8	93,8	142	180	202	206	191	163	129	96,6	71,7	57,6	53,5	55,2	56,3	50,3	32
17	0	45,3	74,9	88	87,9	81,4	76,2	79,1	94	120	153	185	208	214	200	164	114	55,7
18	0	119	231	310	341	319	252	161	69	0	- 30	- 16	32,6	98	155	183	166	102
19	0	47,4	105	163	212	244	252	238	205	161	117	80,6	57	47,4	47,6	50,4	47,6	32
20	0	41	69,4	85,8	94	99	107	122	144	172	200	222	232	225	199	158	106	51
21	0	82,5	169	244	293	307	287	239	177	116	70,6	48,6	50,6	70	94	108	100	64
22	0	30	33,6	19,4	0	-	0	36,5	97	171	245	302	330	322	278	210	130	55,8
23	0	51,3	89	112	124	130	136	148	167	193	221	244	256	250	225	181	124	61
24	0	366	681	865	872	703	402	48	-	-	-	-	-	191	443	571	532	326
25	0	75	130	161	168	161	148	141	148	171	206	246	278	292	278	236	168	85,5
26	0	45	84	116	143	167	190	213	235	253	265	268	258	236	200	155	104	51
27	0	54	114	173	225	265	288	293	283	261	232	202	175	151	130	108	81	45,3
28	0	57,4	97,2	120	131	139	150	170	201	240	280	311	325	314	279	221	148	71,2
29	0	90	188	278	345	378	373	336	278	213	157	120	104	107	118	123	109	69
30	0	96,5	161	188	184	160	134	123	137	179	242	311	367	395	380	323	229	115

Задание №6

Выполнить расчёт переходного процесса в электрической цепи (рис. 7,8,9) при подключении её к источнику постоянного напряжения. Рассчитать и построить графики изменения во времени токов в ветвях и напряжений на ёмкости и индуктивности. Задачу решить операторным методом. Варианты задачи представлены в таблице 11.

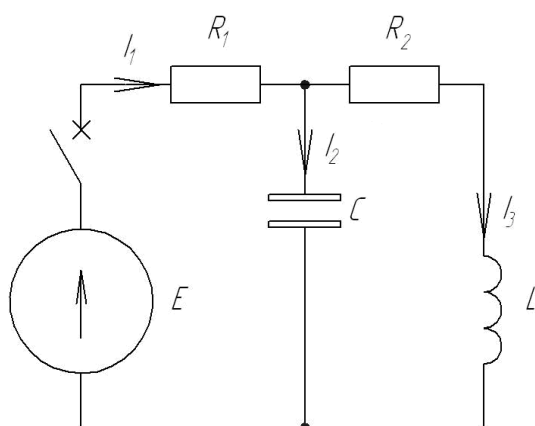


Рисунок 7 – Принципиальная схема к задаче №6

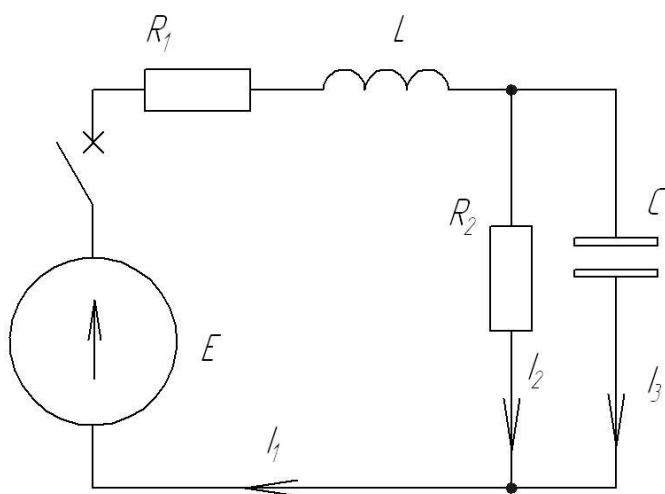


Рисунок 8 – Принципиальная схема к задаче №6

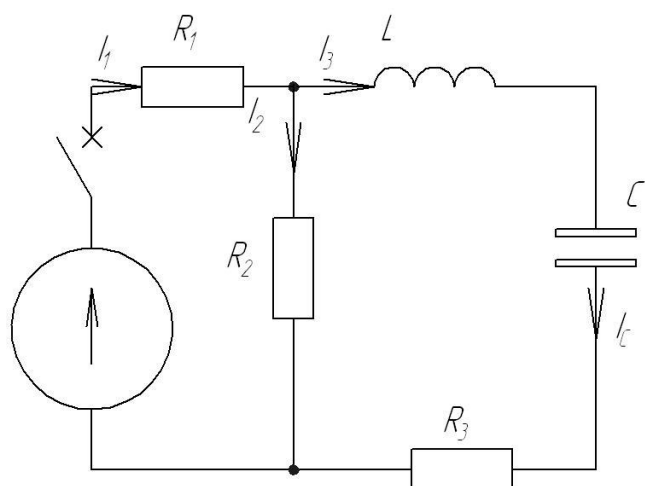


Рисунок 9 – Принципиальная схема к задаче №6

Таблица 11 – Исходные данные к задаче №6

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
№ рис.	7	8	9	7	8	9	7	8	9	7
№ вар.	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

№ рис.	8	9	7	8	9	7	8	9	7	8
№ вар.	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
№ рис.	9	7	8	9	7	8	9	7	8	9
E, B	10	50	100	15	20	9	24	15	100	15
R_1, kOm	0,5	0,2	1	0,5	0,2	0,1	0,5	2	5	1
R_2, kOm	2	1	2	1	0,5	0,2	0,5	3	5	1
$C, мкФ$	100	10	20	5	10	1	0,5	50	1	0,2
$L, Гн$	0,5	20	5	10	10	5	2	20	0,5	2
$R_3, кOm$	0	3,346	0,452	3,131	2,315	15,568	6,363	0,127	0	10

Задание №7

На рис. 10...19 приведены схемы трехфазных цепей. В каждой из них имеется трехфазный генератор, создающий трехфазную симметричную систему ЭДС, и симметричная нагрузка. Действующее значение ЭДС фазы генератора E_A , период T , параметры R_1 , R_2 , L , C_1 и C_2 приведены в таблице 12.

Начальную фазу ЭДС E_A принять нулевой. Требуется: рассчитать токи, построить векторную диаграмму токов и напряжений, определить действующее и мгновенное напряжение между заданными точками и подсчитать активную мощность трехфазной системы.

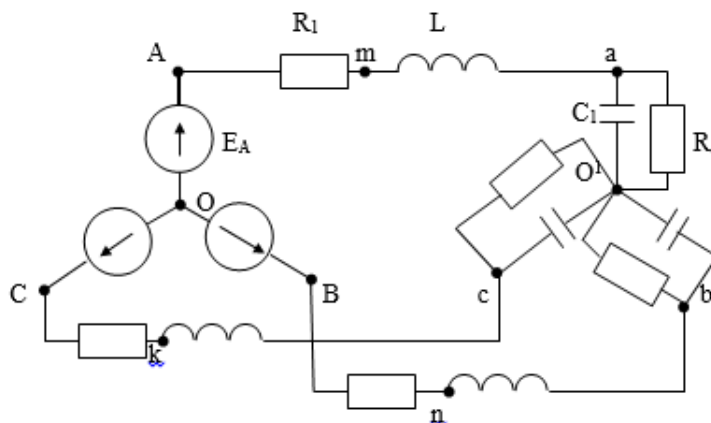


Рисунок 10 – Принципиальная схема к задаче №7

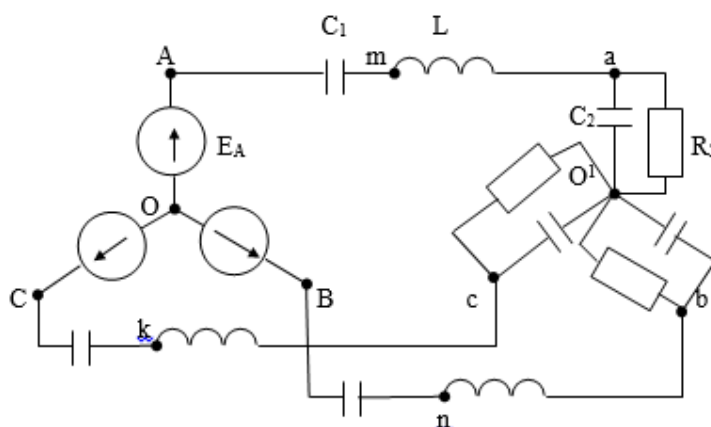


Рисунок 11 – Принципиальная схема к задаче №7

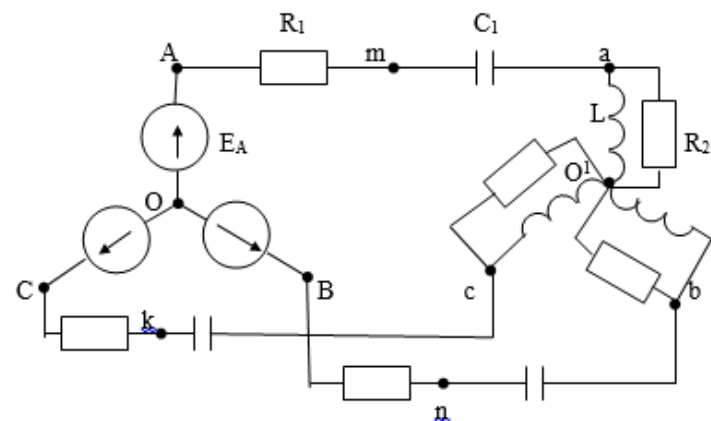


Рисунок 12 – Принципиальная схема к задаче №7

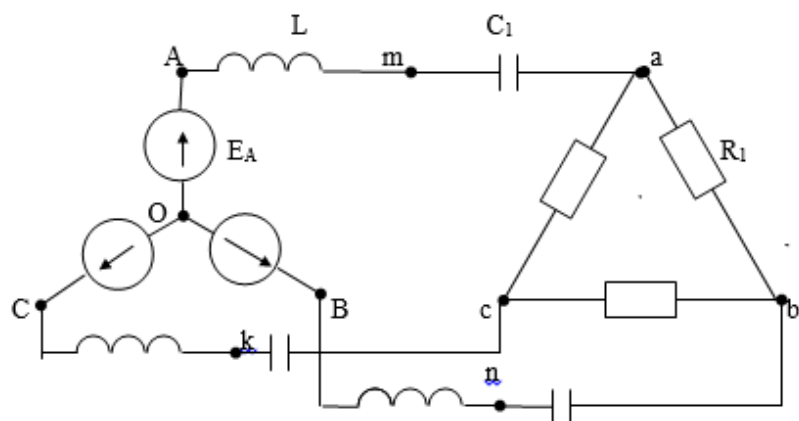


Рисунок 13 – Принципиальная схема к задаче №7

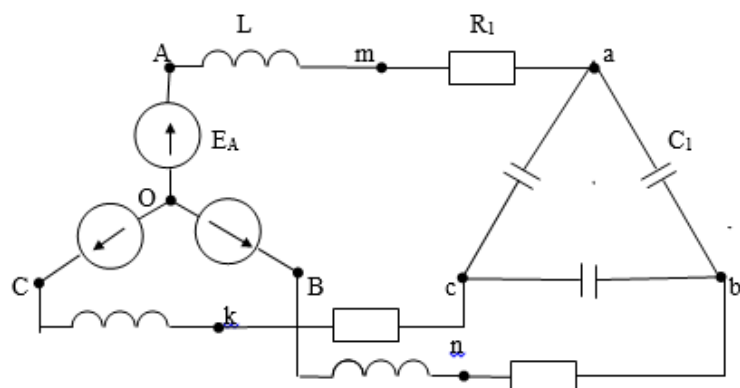


Рисунок 14 – Принципиальная схема к задаче №7

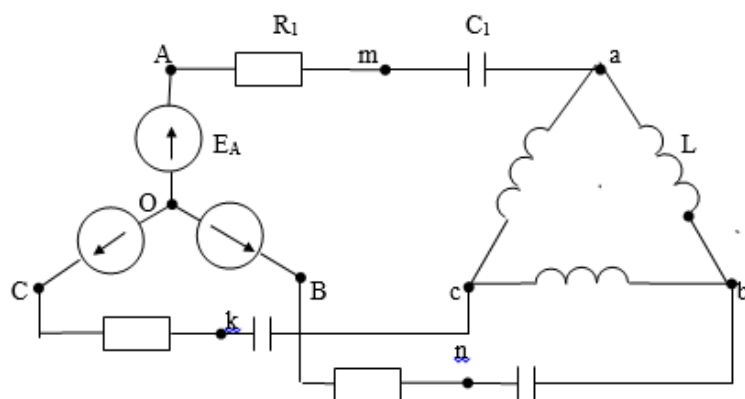


Рисунок 15 – Принципиальная схема к задаче №7

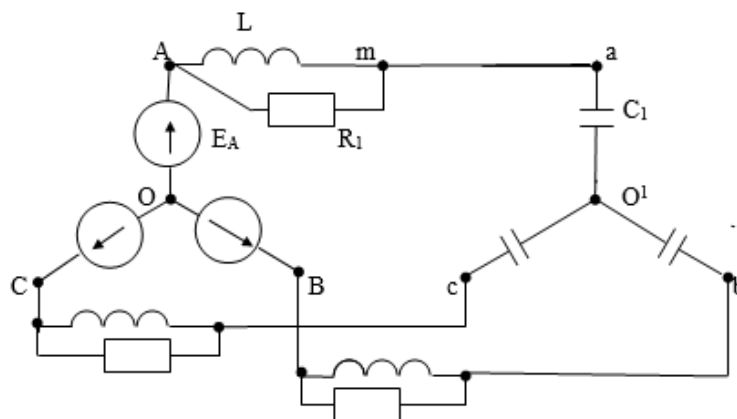


Рисунок 16 – Принципиальная схема к задаче №7

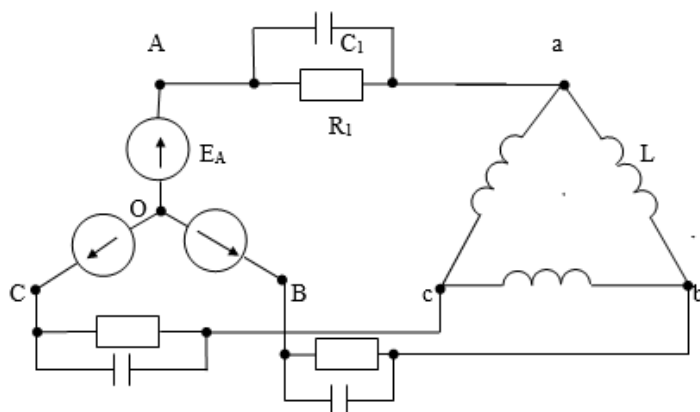


Рисунок 17 – Принципиальная схема к задаче №7

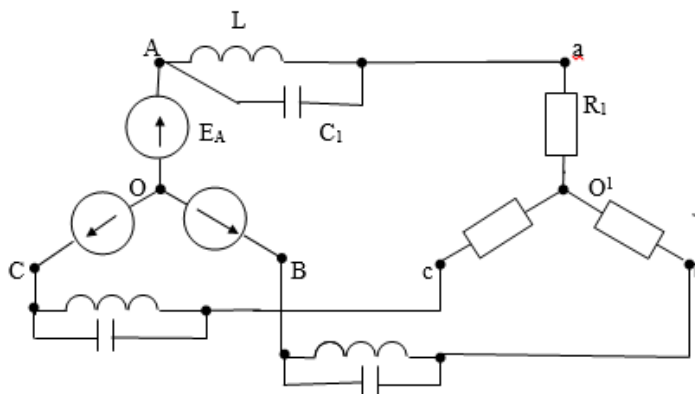


Рисунок 18 – Принципиальная схема к задаче №7

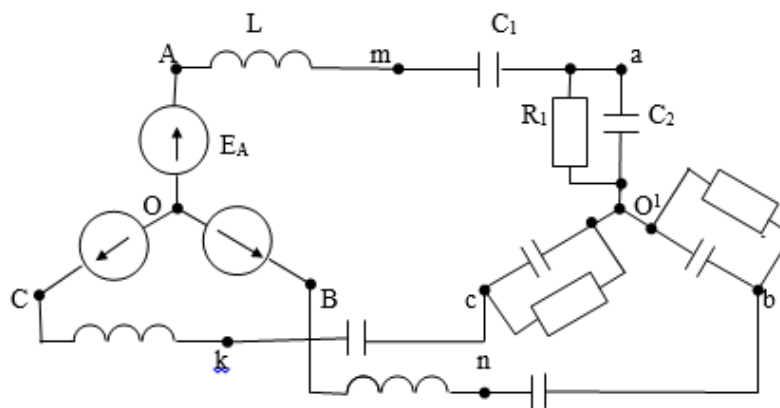


Рисунок 19 – Принципиальная схема к задаче №7

Таблица 12 – Исходные данные к задаче №6

Вариант	Рису- нок	$E_A, В$	$T, с$	$L, мГн$	$C_1, мкФ$	$C_2, мкФ$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	Опреде- лить
1	10	100	0,015	22,32	276	-	44,3	8,66	U_{bc}
2	11	80	0,015	18,33	598	138	-	17,32	U_{bc}
3	12	60	0,015	4,78	398	-	7,66	2	U_{bc}
4	13	40	0,015	35,88	119,6	-	25,98	-	U_{bc}
5	14	20	0,015	17,94	79,7	-	4,33	-	U_{bc}
6	15	90	0,015	107,6	119,6	-	8,66	-	U_{bc}

7	16	70	0,015	41,4	175,1	-	17,32	-	U _{bc}
8	17	50	0,015	8,75	138	-	17,32	-	U _{bc}
9	18	30	0,015	23,92	478,5	-	17,32	-	U _{bc}
10	19	10	0,015	35,88	210,9	138	17,32	-	U _{bc}
11	10	80	0,02	29,71	376,5	-	4,33	8,66	U _{ca}
12	11	60	0,02	24,39	796,2	183,8	-	17,32	U _{ca}
13	12	40	0,02	6,36	530	-	7,66	2	U _{ca}
14	13	100	0,02	47,7	159,2	-	25,98	-	U _{ca}
15	14	70	0,02	23,88	106,1	-	4,33	-	U _{ca}
16	15	20	0,02	143,3	159,2	-	8,66	-	U _{ca}
17	16	30	0,02	55,16	233,1	-	17,32	-	U _{ca}
18	17	10	0,02	11,65	183,8	-	17,32	-	U _{ca}
19	18	50	0,02	31,85	636,9	-	17,32	-	U _{ca}
20	19	90	0,02	47,7	280,8	183,7	1732	-	U _{ca}
21	10	10	0,025	37,32	461,6	-	4,33	8,66	U _{mn}
22	11	30	0,025	30,64	1000	230	-	17,32	U _{mn}
23	12	50	0,025	8	666	-	7,66	2	U _{mn}
24	13	70	0,025	60	200	-	25,98	-	U _{mn}
25	14	90	0,025	30	133,3	-	4,33	-	U _{mn}
26	15	100	0,025	180	200	-	8,66	-	U _{mn}
27	16	80	0,025	69,28	292,8	-	17,32	-	U _{Ab}
28	17	60	0,025	14,64	230,8	-	17,32	-	U _{Ab}
29	18	40	0,025	40	800	-	17,32	-	U _{Ab}
30	19	20	0,025	60	352,7	230	17,32	-	U _{mn}
31	10	100	0,04	59,42	735	-	4,33	8,66	U _{nk}
32	11	80	0,04	48,78	1592	368	-	17,32	U _{nk}
33	12	60	0,04	12,738	1061	-	7,66	2	U _{nk}
34	13	40	0,04	95,5	318,4	-	25,98	-	U _{nk}
35	14	20	0,04	47,77	212,2	-	4,33	-	U _{nk}
36	15	90	0,04	286,6	318	-	8,66	-	U _{nk}
37	16	70	0,04	110,32	466,3	-	17,32	-	U _{nk}
38	17	50	0,04	23,3	367,5	-	17,32	-	U _{nk}
39	18	30	0,04	63,69	1273,9	-	17,32	-	U _{nk}
40	19	10	0,04	95,5	561,7	36,75	17,32	-	U _{nk}
41	10	100	0,01	14,86	183,8	-	4,33	8,66	U _{ab}
42	11	80	0,01	12,19	398	91,9	-	17,32	U _{ab}
43	12	60	0,01	3,18	265,2	-	7,66	2	U _{ab}
44	13	40	0,01	23,8	79,6	-	25,98	-	U _{ab}
45	14	20	0,01	11,94	53	-	4,33	-	U _{ab}
46	15	90	0,01	71,65	79,6	-	8,66	-	U _{ab}
47	16	70	0,01	27,58	116,5	-	17,32	-	U _{ab}
48	17	50	0,01	5,82	91,8	-	17,32	-	U _{ab}
49	18	30	0,01	15,92	318,4	-	17,32	-	U _{ab}
50	19	10	0,01	23,8	140,4	91,9	17,32	-	U _{ab}

Задание №8

По параметрам линии, частоте и значениям величин в конце линии, указанным в таблице 13, определить:

1. Третью неизвестную величину в конце линии.

2. Волновое сопротивление линии.
3. Постоянную распространения.
4. Комплекс напряжения и тока в начале линии.
5. Активную и полную мощности в начале и в конце линии.
6. КПД линии.
7. Полагая, что линия стала линией без потерь, а нагрузка в конце линии стала активной и равной модулю комплексной нагрузки, указанной в варианте задания, определить комплексы напряжения и тока в начале линии, а также длину электромагнитной волны.
8. Для линии без потерь построить график распределения действующего напряжения вдоль линии в функции координаты u .

Таблица 13 – Исходные данные к задаче №7

Вариант	f , Гц	R_0 , Ом/км	C_0 , 10^{-9} , Ф/км	L_0 , 10^{-3} , Гн/км	G_0 , 10^{-6} , См/км	$\dot{U}_2$, В	$\dot{I}_2$, мА	Z_n , Ом	l , км
1	500	10	9,6	5,08	1,25	100	$64,2e^{j15^\circ}$	-	200
2	500	5	11,8	4,16	0,75	-	$21,1e^{j11^\circ}$	$1188 e^{-j10,9^\circ}$	250
3	10000	58	5,75	4,24	0,51	34,4	-	$1720 e^{-j6,15^\circ}$	11,65
4	2500	78,6	11,5	10	1,75	-	$10 e^{j13,2^\circ}$	$1965 e^{-j13,2^\circ}$	23,7
5	1500	24	10,6	4,6	0,175	40	100	-	73
6	1500	10	12	4,1	1,25	-	50	300	80
7	600	12,6	12,7	3,85	0,8	5	-	$1270 e^{-j20^\circ}$	120
8	7000	135	6,11	5,7	2,25	-	$23,9 e^{j14,3^\circ}$	$512 e^{-j14,3^\circ}$	16,3
9	1200	12,4	10	4,8	1,6	40	-	$355 e^{-j8,8^\circ}$	100
10	400	2,9	13	3,8	0,7	-	$18 e^{j7,8^\circ}$	$278 e^{-j7,8^\circ}$	315
11	600	11	10	6	0,65	94,7	-	$1620 e^{-j12,4^\circ}$	142
12	450	9,6	14,8	10,8	0,725	-	$12,2 e^{j8,2^\circ}$	$1800 e^{-j8,3^\circ}$	114
13	8000	97,2	6,4	7,5	0,82	60	-	667	12,7
14	4330	102	4,2	6,4	3,3	-	$16,3 e^{j15,4^\circ}$	$800 e^{-j15,35^\circ}$	21
15	2000	25,2	3,6	6,7	1	31	-	$690 e^{-j7,75^\circ}$	64,8
16	2000	16,7	19	2,66	1,5	-	13,1	800	42,7
17	1800	54	6,8	7,08	1,9	24	-	$2000 e^{-j16,25^\circ}$	47,1
18	4500	54	8,2	10,4	0,46	-	$20 e^{j5,2^\circ}$	$400 e^{-j5,3^\circ}$	23
19	1600	20,4	3,4	7,08	0,9	33,9	-	$1060 e^{-j7,25^\circ}$	92,3
20	700	29,2	8,2	6,08	0,675	-	$33,3 e^{j23,3^\circ}$	$1800 e^{-j23,15^\circ}$	105
21	500	20	4,8	10,16	0,625	-	$32,1 e^{j15^\circ}$	$3120 e^{-j15^\circ}$	200
22	1000	10	11,8	4,16	1,5	100	-	$1188 e^{-j10,25^\circ}$	125
23	5000	29	11,5	4,24	0,51	-	$10 e^{j6,3^\circ}$	$1220 e^{-j6,15^\circ}$	15
24	5000	157,2	11,5	10	3,5	78,6	-	$1965 e^{-j13,2^\circ}$	11,85
25	1500	48	5,3	9,2	0,0875	-	50	800-	73
26	3000	20	12	4,1	2,5	60	200	-	40
27	2400	50,4	3,175	3,85	0,8	-	$1,97 e^{j20^\circ}$	$2540 e^{-j20^\circ}$	60
28	3500	22,55	12,22	1,9	2,25	5	-	$209,5 e^{-j14,3^\circ}$	40
29	1200	24,8	5	9,6	0,8	-	$56,4 e^{j8,8^\circ}$	$710 e^{-j8,8^\circ}$	100
30	800	5,8	13	3,8	104	20	-	$278 e^{-j7,8^\circ}$	157,5

31	300	5,5	20	6	0,65	-	$26,05 e^{j12,9^\circ}$	$1150 e^{-j12,4^\circ}$	200
32	900	19,2	14,8	10,8	1,55	88	-	$1800 e^{-j8,3^\circ}$	57
33	8000	194,4	3,2	15	0,41	-	45	1334	12,7
34	6500	204	2,8	8,54	2,1	25,4	$24,5 e^{j15,4^\circ}$	-	14,9
35	1000	12,6	7,2	6,7	1	-	$22,5 e^{j7,75^\circ}$	$490 e^{-j7,75^\circ}$	91,5
36	4000	33,4	19	2,66	3	42	-	800	21,35
37	1800	108	3,4	14,16	0,95	-	$6 e^{j6,25^\circ}$	$4000 e^{-j16,25^\circ}$	47,1
38	9000	108	8,2	10,4	0,92	32	-	$400 e^{-j5,2^\circ}$	11,5
39	800	10,2	6,8	7,08	0,9	-	$16 e^{j7,25^\circ}$	$750 e^{-j7,25^\circ}$	130
40	700	14,6	8,2	3,04	0,675	42,3	-	$1255 e^{-j23,15^\circ}$	149

3. Общие требования к написанию и оформлению работы

Основные требования к работе

При выполнении и оформлении контрольной по ГОСТу надо учитывать общие требования, которые предъявляются к работе:

- студент должен придерживаться заданной тематики;
- запрещено менять тему самостоятельно без обращения к преподавателю;
- при оформлении работы нужно учитывать нормы и ГОСТы;
- контрольная выполняется на основании не менее семи источников, выбранных автором;
- работа должна быть авторской, в ней должны содержаться собственные выводы студента;
- текст контрольной должен иметь объем не менее 7 листов.

Оформление по ГОСТу текста контрольной

Когда работа выполнена, ее необходимо привести в соответствующий вид согласно ГОСТам:

- контрольную набирают в Word или другом текстовом редакторе с аналогичным функционалом;
- при наборе нужно использовать шрифт Times New Roman;
- интервал между строк — полуторный;
- размер шрифта — 14;
- текст выравнивается по ширине;
- в тексте делают красные строки с отступом в 12,5 мм;
- нижнее и верхнее поля страницы должны иметь отступ в 20 мм;
- слева отступ составляет 30 мм, справа — 15 мм;
- контрольная всегда нумеруется с первого листа, но на титульном листе номер не ставят;
- номер страницы в работе всегда выставляется в верхнем правом углу;
- заголовки работы оформляются жирным шрифтом;
- в конце заголовков точка не предусмотрена;
- заголовки набираются прописными буквами;
- все пункты и разделы в работе должны быть пронумерованы арабскими цифрами;
- названия разделов размещаются посередине строки, подразделы — с левого края;
- работа распечатывается в принтере на листах А4;

– текст должен располагаться только на одной стороне листа.

Работа имеет такую структуру:

1. Титульный лист;
2. Оглавление и введение;
3. Основной текст и расчет контрольной;
4. Заключительная часть работы;
5. Перечень использованной литературы и источников;
6. Дополнения и приложения.

Если в работе есть приложения, о них надо упоминать в оглавлении.

Ссылки нумеруются арабскими цифрами, при этом учитывают структуру работы (разделы и подразделы).

4. Рекомендации по выполнению задания

Указание к решению задачи №1

Решение задачи заключается в определении токов всех ветвей и напряжений на всех элементах электрической цепи. Далее на миллиметровой бумаге необходимо построить потенциальную диаграмму одного из контуров схемы замещения. Заканчивается решение задачи проверкой баланса мощности, одновременно являющейся проверкой правильности определения токов в ветвях.

Метод, которым необходимо решить задачу, указан в соответствующем варианте. Уравнения и другие аналитические выражения необходимо записывать сначала в общем виде, затем подставлять численные значения входящих в выражения величин, а затем записать полученный результат.

Указание к решению задачи №2

Решение данной задачи выполняется комплексным методом. Все комплексные величины (напряжения, токи, сопротивления) необходимо записывать в двух формах: алгебраической и показательной. Первую удобно использовать при выполнении операций сложения и вычитания, а также при построении векторных диаграмм; вторую – при умножении и делении.

Решение задачи заключается в определении токов и напряжений на всех элементах электрической схемы. В процессе выполнения расчета рекомендуется выполнять промежуточные проверки правильности вычислений. Например, если найдены токи, сходящиеся в узле, то их сумма должна быть равной нулю; или если найдены напряжения на элементах, включенных последовательно между двумя узлами, то их сумма должна равняться напряжению между этими узлами.

Завершается расчет проверкой баланса активной и реактивной мощности. Активная и реактивная мощность, потребляемые всей схемой должны быть соответственно равны сумме активной и реактивной мощностей, потребляемыми отдельными элементами схемы.

Построение векторной диаграммы токов и напряжений, действующих в последовательно-параллельной цепи синусоидального тока рекомендуется выполнять в следующем порядке:

отсчет углов производим относительно горизонтальной оси (ось «Х», ось абсцисс); причем положительные углы откладываем против часовой стрелки, а отрицательные – по часовой стрелке.

Алгоритм построения векторной диаграммы следующий:

1. Из начала координат проводим направления токов:

2. Построение начинаем с «дальней» (третьей) ветви:

2.1. Падение напряжения на R_3 совпадает с направлением тока $\dot{I}_3$. Поэтому вектор $\dot{U}_{R3}$ в масштабе откладываем в направлении тока $\dot{I}_3$.

2.2. Падение напряжения на L_3 на 90° опережает ток $\dot{I}_3$. Поэтому вектор $\dot{U}_{L3}$ в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока $\dot{I}_3$ с опережением на 90° начиная с конца вектора $\dot{U}_{R3}$.

2.3. Падение напряжения на C_3 на 90° отстает от тока $\dot{I}_3$. Поэтому вектор $\dot{U}_{C3}$ в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока $\dot{I}_3$ с отставанием на 90° начиная с конца вектора $\dot{U}_{R3}$.

2.4. Векторы $\dot{U}_{L3}$ и $\dot{U}_{C3}$ имеют противоположное направление; их результирующий вектор $\dot{U}_{P3}$ (реактивное напряжение третьей ветви) равен их геометрической разности и, в данном случае, направлен перпендикулярно току $\dot{I}_3$ с отставанием на 90° .

2.5. Геометрическая сумма активного и реактивного падений напряжений третьей ветви (геометрическая сумма векторов $\dot{U}_{R3}$ и $\dot{U}_{P3}$) определит полное падение напряжения на третьей ветви $\dot{U}_3$.

3. Аналогично строим вектор падения напряжения на второй ветви:

3.1. Падение напряжения на R_2 совпадает с направлением тока $\dot{I}_2$. Поэтому вектор $\dot{U}_{R2}$ в масштабе откладываем в направлении тока $\dot{I}_2$.

3.2. Падение напряжения на L_2 на 90° опережает ток $\dot{I}_2$. Поэтому вектор $\dot{U}_{L2}$ в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока $\dot{I}_2$ с опережением на 90° начиная с конца вектора $\dot{U}_{R2}$.

3.3. Падение напряжения на C_2 на 90° отстает от тока $\dot{I}_2$. Поэтому вектор $\dot{U}_{C2}$ в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока $\dot{I}_2$ с отставанием на 90° начиная с конца вектора $\dot{U}_{R2}$.

3.4. Векторы $\dot{U}_{L2}$ и $\dot{U}_{C2}$ имеют противоположное направление; их результирующий вектор $\dot{U}_{P2}$ (реактивное напряжение второй ветви) равен их геометрической разности и, в данном случае, направлен перпендикулярно току $\dot{I}_2$ с опережением на 90° .

3.5. Геометрическая сумма активного и реактивного падений напряжений второй ветви (геометрическая сумма векторов $\dot{U}_{R2}$ и $\dot{U}_{P2}$) определит полное падение напряжения на второй ветви $\dot{U}_2$.

4. Т.к. вторая и третья ветви параллельны, то, естественно, $\dot{U}_2 = \dot{U}_3$, т.е. векторы $\dot{U}_2$ и $\dot{U}_3$ совпадают по величине и по направлению. Обозначим этот вектор $\dot{U}_{23}$.

5. Полное падение напряжения на всех элементах схемы представляет собой геометрическую сумму векторов $\dot{U}_{23}$ и $\dot{U}_1$ (вектор полного падения напряжения на элементах первой ветви).

6. Построение вектора полного падения напряжения на элементах первой ветви (вектора $\dot{U}_1$) производим следующим образом:

6.1. С конца вектора $\dot{U}_{23}$ проводим линию, параллельную направлению тока $\dot{I}_1$.

6.2. Падение напряжения на R_1 совпадает с направлением тока $\dot{I}_1$. Поэтому вектор $\dot{U}_{R1}$ в масштабе откладываем в направлении тока $\dot{I}_1$.

6.3. Падение напряжения на L_1 на 90° опережает ток $\dot{I}_1$. Поэтому вектор $\dot{U}_{L1}$ в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока $\dot{I}_1$ с опережением на 90° начиная с конца вектора $\dot{U}_{R1}$.

6.4. Падение напряжения на C_1 на 90° отстает от тока $\dot{I}_1$. Поэтому вектор $\dot{U}_{C1}$ в масштабе откладываем перпендикулярно направлению тока $\dot{I}_1$ с отставанием на 90° начиная с конца вектора $\dot{U}_{R1}$.

6.5. Векторы $\dot{U}_{L1}$ и $\dot{U}_{C1}$ имеют противоположное направление; их результирующий вектор $\dot{U}_{P1}$ (реактивное напряжение первой ветви) равен их геометрической разности и, в данном случае, равен нулю, т.е. в первой ветви мы наблюдаем резонанс напряжений.

6.6. Геометрическая сумма активного и реактивного падений напряжений первой ветви (геометрическая сумма векторов $\dot{U}_{R1}$ и $\dot{U}_{P1}$) определит полное падение напряжения на первой ветви $\dot{U}_1$ и, в данном случае, оно по величине и по направлению совпадает с вектором $\dot{U}_{R1}$. Обозначим его « $\dot{U}_{R1} = \dot{U}_1$ ».

7. Как отмечалось выше, полное падение напряжения на всех элементах схемы представляет собой геометрическую сумму векторов $\dot{U}_{23}$ и $\dot{U}_1$, которую и обозначаем $\dot{U}$.

8. Вектор тока $\dot{I}_1$ представляет собой геометрическую сумму векторов $\dot{I}_2$ и $\dot{I}_3$, которую строим в выбранном удобном масштабе токов на уже проведенных направлениях.

Указание к решению задачи №3

1. Определить комплексные действующие значения токов всех ветвей схемы замещения методом эквивалентных преобразований.

2. Проверить правильность расчета путем составления баланса мощностей. Погрешность в определении активной и реактивной мощностей не должна превышать 1%.

Задание повышенного уровня:

1. В ветви с активным сопротивлением R_1 «включить» амперметр электромагнитной системы и определить его показание.

4. «Подключить» вольтметр электромагнитной системы к полюсам ветви с источником Э.Д.С. и определить его показание.

5. Записать функции мгновенных значений тока амперметра и напряжения на вольтметре. Построить графики зависимости тока $i_A = f(t)$ и напряжения от времени.

6. Построить векторную диаграмму токов ветвей.

7. Выбрать контур схемы, содержащий источник Э.Д.С. В тех же координатах комплексной плоскости (п. 6) построить векторную диаграмму напряжений.

Указание к решению задачи №4

Решение задачи заключается в определении действующих значений и фаз линейных токов, а также тока нейтрального провода, а при его отсутствии - в определении напряжения смещения нейтрали и определении фазных напряжений на нагрузке. Задачу следует решать с использованием метода узлового напряжения. Необходимо построить векторные диаграммы токов и напряжений при наличии нейтрального провода и при его отсутствии.

Линейные токи, которые при соединении нагрузки звездой равны фазным, вычисляются в соответствии с законом Ома:

$$I_a = \frac{U_a}{Z_a} = \frac{U_{\phi}}{(r_a + jx_a)}; \quad I_b = \frac{U_b}{Z_b} = \frac{U_{\phi} \dot{a}^{-j120^\circ}}{(r_b + jx_b)}; \quad I_c = \frac{U_c}{Z_c} = \frac{U_{\phi} \dot{a}^{j120^\circ}}{(r_c + jx_c)};$$

Ток нейтрального провода, в соответствии с первым законом Кирхгофа

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c.$$

При отсутствии нейтрального провода напряжение смещения нейтрали

$$\dot{U}_{00} = \frac{U_A Y_a + U_B Y_b + U_C Y_c}{Y_a + Y_b + Y_c},$$

Проводимости фаз нагрузки:

$$Y_a = \frac{1}{Z_a} = \frac{r_a}{r_a^2 + x_a^2} - \frac{jx_a}{r_a^2 + x_a^2}$$

$$Y_b = \frac{1}{Z_b} = \frac{r_b}{r_b^2 + x_b^2} - \frac{jx_b}{r_b^2 + x_b^2}$$

$$Y_c = \frac{1}{Z_c} = \frac{r_c}{r_c^2 + x_c^2} - \frac{jx_c}{r_c^2 + x_c^2}$$

$U_A, U_{\hat{A}}, U_{\tilde{N}}$ - фазные напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

Фазные напряжения на нагрузке равны разности фазных напряжений на трансформаторе и напряжения смещения нейтрали

$$U_a = U_A - U_{00}, U_b = U_B - U_{00}, U_c = U_C - U_{00},$$

Указание к решению задачи №5

Любая периодическая несинусоидальная функция может быть представлена в общем случае постоянной составляющей и суммой синусоидальных функций, имеющих частоты, кратные частоте несинусоидальной функции:

$$f(\omega t) = A_0 + A_1 \sin \omega t + B_1 \cos \omega t + A_2 \sin 2\omega t + B_2 \cos 2\omega t + \dots A_k \sin k\omega t + B_k \cos k\omega t + \dots$$

где: A_0 - постоянная составляющая,

$$A_0 = \frac{1}{(2\pi) \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t}$$

A_k, B_k коэффициенты разложения в ряд Фурье, которые определяются по формулам:

$$A_k = \frac{1}{\pi \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t d\omega t}, B_k = \frac{1}{\pi \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos k\omega t d\omega t}$$

Обычно эти коэффициенты находят графо-аналитическим методом, разбивая период функции $f(\omega t)$ на n равных интервалов.

$$A_0 = \frac{1}{n \sum f(\omega t)}, A_k = \frac{2}{n \sum_{i=1}^n f(\omega t_i) \sin k\omega t_i}, B_k = \frac{2}{n \sum_{i=1}^n f(\omega t_i) \cos k\omega t_i},$$

Разложение несинусоидальной функции в ряд Фурье может быть представлено иначе:

$$f(\omega t) = A_0 + C_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + C_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + \dots C_k \sin(k\omega t + \varphi_k) + \dots,$$

$$\text{где: } C_k = \sqrt{A_k^2 + B_k^2}, \varphi_k = \arctg \frac{B_k}{A_k}$$

Составляющую $C_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ называют первой или основной гармоникой, остальные составляющие - высшими гармониками.

В задаче данной контрольной работы функция Э.Д.С. $e(\omega t)$ представлена в виде таблицы ординат с интервалом фазы $\omega t = 10^\circ$ за полпериода, и т.к. функция симметрична относительно оси абсцисс, то суммирование достаточно проводить на интервале от 0 до π . Кроме того известно, что для функций, симметричных относительно оси абсцисс, чётные гармоники отсутствуют, поэтому в задаче требуется найти первую, третью и пятую гармоники.

Расчёт режима линейной электрической цепи при действии периодической несинусоидальной Э.Д.С. проводят для каждой гармоники отдельно, при этом необходимо учитывать. Что реактивные сопротивления для разных гармоник будут разными:

$$X_{lk} = Lk\omega, X_{ck} = \frac{1}{kC\omega}.$$

Действующее значение тока

$$I = \sqrt{I_0^2 + I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_k^2 + \dots}$$

где: I_0 - постоянная составляющая тока,

I_k - действующие значения гармоник токов.

Мощность электрической цепи

$$P = P_0 + P_1 + P_2 + \dots + P_k$$

где: $P_0 = U_0 I_0$ - мощность постоянной составляющей,

$P_k = U_k I_k \cos \varphi_k$ - мощность k -той гармоники,

$U_k I_k$ - напряжение и ток k -той гармоники,

φ_k - угол фазового сдвига между током и напряжением k -той гармоники (следует иметь ввиду, что для каждой гармоники эти углы будут разными по величине, они могут отличаться также и по знаку).

Указание к решению задачи №6

Во всех вариантах расчёт переходного процесса выполняется при нулевых начальных условиях (напряжение на ёмкости и ток через индуктивность в первый момент времени после коммутации равны нулю).

Для решения задачи необходимо составить систему уравнений, используя законы Кирхгофа, при этом напряжения на индуктивности и на ёмкости выразить через токи.

Например, если сопротивление R , индуктивность L и ёмкость C включены последовательно и по ним протекает ток i , то напряжение на этом участке цепи в любой момент времени

$$u = iR + L \frac{di}{dt} + \int i dt.$$

Полученную систему уравнений следует затем записать в операторной форме. Записанное выше уравнение будет иметь вид:

$$U(p) = i(p) \left[R + Lp + \frac{1}{Cp} \right]$$

Здесь $U(p)$ и $i(p)$ - изображения напряжения и тока, p - оператор преобразования.

Записанную в операторной форме систему уравнений необходимо решить относительно изображений токов известными в алгебре методами. Изображения токов будут иметь вид:

$$i(p) = \frac{(b_0 p^m + b_1 p^{m-1} + \dots + b_m)}{a_0 p^n + a_1 p^{n-1} + \dots + a_n} = \frac{N(p)}{M(p)}$$

где: a_i и b_i — некоторые постоянные коэффициенты.

Для нахождения токов, как функций времени, необходимо воспользоваться формулой разложения:

$$i(t) = \frac{N(0)}{M(0)} + \sum_{i=1}^n \left[\frac{N(p_i)}{p_i (p M_i)} \right] e^{p_i t}$$

где: $N(0)/M(0)$ - вынужденная составляющая тока,

p_i - корни характеристического уравнения $M(p)=0$

$$(p M_i) = \frac{dM(p)}{dp} \Big|_{p=p_i}$$

Во всех вариантах данной задачи $n=2$, $m<2$, т.е. характеристическое уравнение имеет вторую степень.

Для всех токов и напряжений необходимо построить графики переходных процессов.

Указание к решению задачи №7

- 1) Сопротивления обмоток генератора считать равными нулю.
- 2) Для вариантов, в которых нагрузка соединена треугольником, использовать преобразование треугольника в звезду.

3) Расчет выполнять символическим методом, оперируя с комплексами действующих значений.

Указание к решению задачи №8

1) Неизвестный из трех параметров в конце линии определить, пользуясь формулой закона Ома

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_n.$$

2) Определить волновое сопротивление линии

$$Z_B = \sqrt{(Z_0/Y_0)}, \text{ где } Z_0 = R_0 + j\omega L_0, Y_0 = G_0 + j\omega C_0.$$

3) Определить постоянную распространения

$$\gamma = \sqrt{(Z_0 Y_0)} = \beta + j\alpha.$$

4) Вычислить напряжение и ток в начале линии, пользуясь выражениями:

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \operatorname{ch} \gamma l + \dot{I}_2 Z_n \operatorname{sh} \gamma l,$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 \operatorname{ch} \gamma l + (\dot{U}_2/Z_n) \operatorname{sh} \gamma l$$

Учесть, что при умножении γ , имеющей размерность 1/км, на длину линии в километрах угол получается в радианах.

5) Полную и активную мощность в начале и в конце линии вычислить, пользуясь формулами:

$$S_1 = U_1 I_1, P_1 = U_1 I_1 \cos(\angle U_1, I_1),$$

$$S_2 = U_2 I_2, P_2 = U_2 I_2 \cos(\angle U_2, I_2).$$

6) К.п.д. линии

$$\eta = P_2/P_1.$$

7) Для линии без потерь

$$Z_B = \sqrt{(L_0/C_0)}, \gamma = j\omega \sqrt{(L_0 C_0)} = j\alpha,$$

$$\operatorname{ch} \gamma l = \cos \alpha l, \operatorname{sh} \gamma l = j \sin \alpha l,$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 \cos \alpha l + j \dot{I}_2 Z_n \sin \alpha l, \dot{I}_1 = \dot{I}_2 \cos \alpha l + j(\dot{U}_2/Z_n) \sin \alpha l,$$

фазовая скорость и длина волны:

$$v_\phi = \omega/\alpha = 1/\sqrt{(L_0 C_0)}, \lambda = v_\phi/\omega.$$

8) Графики изменения напряжения и тока вдоль линии строятся с использованием формул:

$$\dot{U} = \dot{U}_2 \cos \alpha y + j \dot{I}_2 Z_n \sin \alpha y, \dot{I} = \dot{I}_2 \cos \alpha y + j(\dot{U}_2/Z_n) \sin \alpha y.$$

9) Действующие значения напряжения и тока вычисляют по формулам:

$$U = \sqrt{[(U_2 \cos \alpha y)^2 + (I_2 Z_n \sin \alpha y)^2]},$$

$$I = \sqrt{\{(I_2 \cos \alpha y)^2 + [(U_2/Z_n) \sin \alpha y]^2\}}.$$

5. План-график выполнения задания

Работа над расчетно-графической работой может быть представлена в виде выполнения следующих этапов:

№ п/п	Наименование этапа	Сроки выполнения
Очная форма обучения		
1.	Получения задания	На первом практическом занятии
2.	Первичная консультация с преподавателем	На первом практическом занятии
3.	Работа с информационными источниками	В течении семестра
4.	Написание контрольной работы	В течении семестра
5.	Предоставление контрольной работы на кафедру	В течении семестра
6.	Защита контрольной работы	На последнем практическом занятии
Заочная форма обучения		
1.	Получения задания	На первом практическом занятии
2.	Первичная консультация с преподавателем	На первом практическом занятии
3.	Работа с информационными источниками	В течении сессии
4.	Написание контрольной работы	В течении сессии
5.	Предоставление контрольной работы на кафедру	В течении сессии
6.	Защита контрольной работы	На последнем практическом занятии

6. Критерии оценивания работы

В целях повышения качества выполняемых расчетно-графических работ преподаватель руководствуется следующими критериями оценивания письменных работ студентов.

Оценка «зачтено (отлично)» выставляется, если студент:

- представил расчетно-графическую работу в установленный срок и оформил ее в строгом соответствии с изложенными требованиями;
- использовал рекомендованную и дополнительную учебную и страноведческую литературу;
- при выполнении упражнений показал высокий уровень знания лексико-грамматического и страноведческого материала по заданной тематике, проявил творческий подход при ответе на вопросы, умение глубоко анализировать проблему и делать обобщающие выводы;
- выполнил работу грамотно с точки зрения поставленной задачи, т.е. без ошибок и недочетов или допустил не более одного недочета.

Оценка «зачтено (хорошо)» выставляется, если студент:

- представил расчетно-графическую работу в установленный срок и оформил ее в соответствии с изложенными требованиями;
- использовал рекомендованную и дополнительную литературу;
- при выполнении упражнений показал хороший уровень знания лексико-грамматического и страноведческого материала по заданной тематике, практически правильно сформулировал ответы на поставленные вопросы, представил общее знание информации по проблеме;
- выполнил работу полностью, но допустил в ней: а) не более одной негрубой ошибки и одного недочета б) или не более двух недочетов.

Оценка «зачтено (удовлетворительно)» выставляется, если студент:

- представил работу в установленный срок, при оформлении работы допустил незначительные отклонения от изложенных требований;
- показал достаточные знания по основным темам контрольной работы;
- использовал рекомендованную литературу;
- выполнил не менее половины работы или допустил в ней а) не более двух грубых ошибок, б) или не более одной грубой ошибки и одного недочета, в) или не более двух-трех негрубых ошибок, г) или одной негрубой ошибки и трех недочетов, д) или при отсутствии ошибок, но при наличии 4-5 недочетов.

Оценка «незачтено (неудовлетворительно)» выставляется:

- когда число ошибок и недочетов превосходит норму, при которой может быть выставлена оценка «зачтено (удовлетворительно)» или если правильно выполнено менее половины работы;
- если студент не приступал к выполнению работы или правильно выполнил не более 10 процентов всех заданий.

7. Порядок защиты работы

Написанная студентом расчетно-графическая работа сдается на кафедру в срок для рецензирования. Студент защищает расчетно-графическую работу до экзамена (зачета) перед преподавателем. Без защиты РГР студент к экзамену (зачету) не допускается.

Работа не допускается к защите, если она не носит самостоятельного характера, списана из литературных источников или у других авторов, если основные вопросы не раскрыты, изложены схематично, фрагментарно, в тексте содержатся ошибки, научный аппарат оформлен неправильно, текст написан небрежно.

В ходе защиты контрольной работы задача студента — показать углубленное понимание вопросов конкретной темы, хорошее владение материалом по теме.

Защита расчетно-графической работы может проходить в различных формах по усмотрению преподавателя:

- в форме индивидуальной беседы студента с руководителем по основным положениям работы;
- в форме индивидуальной защиты в присутствии всей группы студентов;
- в форме групповой защиты – одновременной защиты контрольной работы по одному направлению. В этом случае каждый следит за ходом рассуждений товарищей, дополняет, уточняет их, что, несомненно, усиливает работу мысли и способствует развитию экономического мышления.

Любая форма защиты контрольной работы учит отстаивать свою точку зрения, убедительно аргументировать ее, что способствует перерастанию знаний в убеждения.

8. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

8.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

8.1.2 Перечень основной литературы:

1. Теоретические основы электротехники : учебник / И. Я. Лизан, К. Н. Маренич, И. В. Ковалева [и др.]. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. — 628 с. — ISBN 978-5-9729-0663-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/114971.html>

2. Зонов, В. Н. Теоретические основы электротехники. Электрические и магнитные цепи постоянного тока : учебное пособие / В. Н. Зонов, П. В. Зонов, Ю. Б. Ефимова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 80 с. — ISBN 978-5-7782-4090-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98742.html>

3. Петренко, Ю. В. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи с распределенными параметрами : учебное пособие / Ю. В. Петренко. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2019. — 64 с. — ISBN 978-5-7782-3876-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99223.html>

8.1.3 Перечень дополнительной литературы:

1. Горбунова Л.Н. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] / Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева. — Электрон. текстовые данные. — Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2015. — 117 с. — 978-5-9642-0269-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55913.html>

2. Крутов А.В. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 376 с. — 978-985-503-580-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67742.html>

8.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

3. Методические указания по выполнению расчетно-графических работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

4. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

8.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

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

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по организации и проведению самостоятельной работы
по дисциплине «ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Содержание

Введение

- 1 Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники»
- 2 План-график выполнения самостоятельной работы
- 3 Контрольные точки и виды отчетности по ним
- 4 Методические рекомендации по изучению теоретического материала
- 5 Методические указания по подготовке к расчетно-графической работе
- 6 Методические указания по подготовке к экзамену
- 7 Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

Введение

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Теоретические основы электротехники»

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. В связи с этим, обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в практических занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой специалиста и бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. В соответствии с рабочей программой дисциплины предусмотрены следующие виды самостоятельной работы студента:

- самостоятельное изучение литературы;
- самостоятельное решение задач;
- выполнение курсового проекта.

Цель самостоятельного изучения литературы – самостоятельное овладение знаниями, опытом исследовательской деятельности.

Задачами самостоятельного изучения литературы являются:

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов.

Цель самостоятельного решения задач - овладение профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю будущей деятельности.

Задачами самостоятельного решения задач являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

Целью самостоятельного выполнения расчетно-графической работы по дисциплине является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

Задачами данного вида самостоятельной работы студента являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений;
- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании курсовой работы.

В результате освоения дисциплины формируются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы:

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-4 Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин	ИД-1 _{ОПК-4} Использует методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока	Знает основные законы электротехники, теорию электромагнитного поля и цепей с распределенными параметрами, методы анализа, моделирования и расчета линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока
	ИД-2 _{ОПК-4} Использует методы расчета переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока	Умеет использовать методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока.
	ИД-3 _{ОПК-4} Применяет знания теории электромагнитного поля и цепей с распределенными параметрами	Владеет навыками расчета переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.

План-график выполнения самостоятельной работы

Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)	Вид деятельности студентов	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
			СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
Очная форма обучения					
3 семестр					
ОПК-4 ИД-1 _{ОПК-4} ИД-2 _{ОПК-4} ИД-3 _{ОПК-4}	Самостоятельное изучение литературы по темам №1-18	Собеседование	32,22	3,58	35,8
	Подготовка к лекциям	Собеседование	3,24	0,36	3,6
	Подготовка к практическим занятиям	Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач	6,48	0,72	7,2
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	4,86	0,54	5,4
	Выполнение расчетно-графической работы	Собеседование	18	2	20
Итого за 3 семестр:			64,8	7,2	72
4 семестр					
ОПК-4 ИД-1 _{ОПК-4} ИД-2 _{ОПК-4} ИД-3 _{ОПК-4}	Самостоятельное изучение литературы по темам №19-36	Собеседование	1,62	0,18	1,8
	Подготовка к лекциям	Собеседование	3,24	0,36	3,6
	Подготовка к практическим занятиям	Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач	6,48	0,72	7,2
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	4,86	0,54	5,4
Итого за 4 семестр:			16,2	1,8	18
5 семестр					
ОПК-4 ИД-1 _{ОПК-4} ИД-2 _{ОПК-4} ИД-3 _{ОПК-4}	Самостоятельное изучение литературы по темам №37-54	Собеседование	3,06	0,34	3,4
	Подготовка к лекциям	Собеседование	3,24	0,36	3,6
	Подготовка к практическим занятиям	Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач	3,24	0,36	3,6

	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	4,86	0,54	5,4
	Выполнение расчетно-графической работы	Собеседование	18	2	20
Итого за 5 семестр:			32,4	3,6	36
Итого:			113,4	12,6	126
Заочная форма обучения					
3 семестр					
ОПК-4 ИД-1ОПК-4 ИД-2ОПК-4 ИД-3ОПК-4	Самостоятельное изучение литературы по темам №1-18	Собеседование	151,2	16,8	168
	Подготовка к лекциям	Собеседование	0,54	0,06	0,6
	Подготовка к практическим занятиям	Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач	1,08	0,12	1,2
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	1,08	0,12	1,2
	Выполнение расчетно-графической работы	Собеседование	18	2	20
Итого за 3 семестр:			171,9	19,1	191
4 семестр					
ОПК-4 ИД-1ОПК-4 ИД-2ОПК-4 ИД-3ОПК-4	Самостоятельное изучение литературы по темам №19-36	Собеседование	88,38	9,82	98,2
	Подготовка к лекциям	Собеседование	0,36	0,04	0,4
	Подготовка к практическим занятиям	Письменный отчет о решении типовых, разноуровневых задач	1,08	0,12	1,2
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	1,08	0,12	1,2
	Выполнение расчетно-графической работы	Собеседование	18	2	20
Итого за 4 семестр:			108,9	12,1	121
5 семестр					
ОПК-4 ИД-1ОПК-4 ИД-2ОПК-4 ИД-3ОПК-4	Самостоятельное изучение литературы по темам №37-54	Собеседование	88,56	9,84	98,4
	Подготовка к лекциям	Собеседование	0,54	0,06	0,6
	Подготовка к практическим занятиям	Письменный отчет о решении типовых,	0,72	0,08	0,8

		разноуровневых задач			
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	1,08	0,12	1,2
	Выполнение расчетно-графической работы	Собеседование	18	2	20
Итого за 5 семестр:			108,9	12,1	121
Итого:			389,7	43,3	433

Контрольные точки и виды отчетности по ним

№ п/п	Вид деятельности студентов	Сроки выполнения	Количество баллов
3 семестр			
1.	Практическое занятие № 2	6 неделя	25
2.	Лабораторное занятие № 4	10 неделя	15
3.	Практическое занятие № 8	16 неделя	15
	Итого за 3 семестр		55
4 семестр			
4.	Практическое занятие № 12	6 неделя	25
5.	Лабораторное занятие № 9	10 неделя	15
6.	Практическое занятие № 16	16 неделя	15
	Итого за 4 семестр		55
5 семестр			
7.	Практическое занятие № 20	6 неделя	25
8.	Лабораторное занятие № 16	10 неделя	15
9.	Лабораторное занятие № 22	16 неделя	15
	Итого за 5 семестр		55
	Итого		55

Максимально возможный балл за весь текущий контроль Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным 55. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставаемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

Рейтинговая система для заочной формы обучения не предусмотрена.

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Самостоятельная работа студента начинается с внимательного ознакомления с содержанием учебного курса.

Изучение каждой темы следует начинать с внимательного ознакомления с набором вопросов. Они ориентируют студента, показывают, что он должен знать по данной теме. Вопросы темы как бы накладываются на соответствующую главу избранного учебника или учебного пособия. В итоге должно быть ясным, какие вопросы темы учебного курса и с какой глубиной раскрыты в конкретном учебном материале, а какие вообще опущены. Требуется творческое отношение и к самому содержанию дисциплины.

Вопросы, составляющие ее содержание, обладают разной степенью важности. Есть вопросы, выполняющие функцию логической связки содержания темы и всего курса, имеются вопросы описательного или разъяснительного характера, а также исторического экскурса в область изучаемой дисциплины. Все эти вопросы не составляют сути понятийного, концептуального содержания темы, но необходимы для целостного восприятия изучаемых проблем.

Изучаемая дисциплина имеет свой категориально-понятийный аппарат. Научные понятия — это та база, на которой строится каждая наука. Понятия — узловые, опорные пункты как научного, так и учебного познания, логические ступени движения в учебе от простого к сложному, от явления к сущности. Без ясного понимания понятий учеба крайне затрудняется, а содержание приобретенных знаний становится тусклым, расплывчатым.

Студент должен понимать, что самостоятельное овладение знаниями является главным, определяющим. Высшая школа создает для этого необходимые условия, помогает будущему высококвалифицированному специалисту овладеть технологией самостоятельного производства знаний.

В самостоятельной работе студентам приходится использовать литературу различных видов: первоисточники, монографии, научные сборники, хрестоматии, учебники, учебные пособия, журналы и др. Изучение курса предполагает знакомство студентов с большим объемом научной и учебной литературы, что, в свою очередь, порождает необходимость выработки у них рационально-критического подхода к изучаемым источникам.

Чтобы не «утонуть» в огромном объеме рекомендованных ему для изучения источников, студент, прежде всего, должен научиться правильно их читать. Правильное чтение рекомендованных источников предполагает следование нескольким несложным, но весьма полезным правилам.

Предварительный просмотр книги включает ознакомление с титульным листом книги, аннотацией, предисловием, оглавлением. При ознакомлении с оглавлением необходимо выделить разделы, главы, параграфы, представляющие для вас интерес, бегло их просмотреть, найти места, относящиеся к теме (абзацы, страницы, параграфы), и познакомиться с ними в общих чертах.

Научные издания сопровождаются различными вспомогательными материалами — научным аппаратом, поэтому важно знать, из каких основных элементов он состоит, каковы его функции.

Знакомство с книгой лучше всего начинать с изучения аннотации — краткой характеристики книги, раскрывающей ее содержание, идейную, тематическую и жанровую направленность, сведения об авторе, назначение и другие особенности. Аннотация помогает составить предварительное мнение о книге.

Глубже понять содержание книги позволяют вступительная статья, в которой дается оценка содержания книги, затрагиваемой в ней проблематики, содержится информация о жизненной и творческой биографии автора, высказываются полемические замечания, разъясняются отдельные положения книги, даются комментарии и т.д. Вот почему знакомство с вступительной статьей представляется очень важным: оно помогает студенту сориентироваться в тексте работы, обратить внимание на ее наиболее ценные и важные разделы.

Той же цели содействует знакомство с оглавлением, предисловием, послесловием. Весьма полезными элементами научного аппарата являются сноски, комментарии, таблицы, графики, списки литературы. Они не только иллюстрируют отдельные положения книги или статьи, но и сами по себе являются дополнительным источником информации для читателя.

Если читателя заинтересовала какая-то высказанная автором мысль, не нашедшая подробного освещения в данном источнике, он может обратиться к тексту источника, упоминаемого в сноске, либо к источнику, который он может найти в списке литературы, рекомендованной автором для самостоятельного изучения.

Существует несколько форм ведения записей:

— план (простой и развернутый) — наиболее краткая форма записи прочитанного, представляющая собой перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. Развернутый план представляет собой более подробную запись прочитанного, с детализацией отдельных положений и выводов, с выпиской цитат, статистических данных и т.д. Развернутый план — неоценимый помощник при выступлении с докладом на конкретную тему на семинаре, конференции;

— тезисы — кратко сформулированные положения, основные положения книги, статьи. Как правило, тезисы составляются после предварительного знакомства с текстом источника, при его повторном прочтении. Они помогают запомнить и систематизировать информацию.

Составление конспектов

Большую роль в усвоении и повторении пройденного материала играет хороший конспект, содержащий основные идеи прочитанного в учебнике и услышанного в лекции. Конспект — это, по существу, набросок, развернутый план связного рассказа по основным вопросам темы.

В какой-то мере конспект рассчитан (в зависимости от индивидуальных особенностей студента) не только на интеллектуальную и эмоциональную, но и на зрительную память, причем текст конспекта нередко ассоциируется еще и с текстом учебника или записью лекции. Поэтому легче запоминается содержание конспектов, написанных разборчиво, с подчеркиванием или выделением разрядкой ключевых слов и фраз.

Самостоятельно изученные темы предоставляются преподавателю в форме конспекта, по которому происходит собеседование. Теоретические темы курса (отдельные вопросы), выносимые на самостоятельное изучение, представлены ниже.

Типовые контрольные задания и иные материалы, характеризующие этапы формирования компетенций

Вопросы для собеседования

1. Когда имеют место согласование по току, согласование по напряжению и согласование по мощности?
2. Сформулируйте закон Ома для участка электрической цепи, содержащего и не содержащего источник э.д.с..
3. Сформулируйте первый закон Кирхгофа.
4. Какие контуры схемы замещения являются независимыми?
5. Сформулируйте второй закон Кирхгофа.
6. От чего зависят знаки слагаемых при составлении уравнений по законам Кирхгофа?
7. Как по экспериментальным данным вычислить внутреннее сопротивление источника напряжения?
8. Как по полученным в лабораторной работе экспериментальным данным Вы проверяли справедливость законов Ома и Кирхгофа?
9. Какой метод Вы применили для расчёта электрической цепи? Поясните его сущность.

10. Поясните порядок составления уравнения баланса мощности и поясните его физическую сущность.
11. Как зависит индуктивное сопротивление от частоты?
12. Чем объясняется различие значений X_L , вычисленных по формулам U_m/I_m и ωL ?
13. Как зависит емкостное сопротивление от частоты?
14. Что понимают под индуктивностью и как она определяется?
15. Как и почему изменяется индуктивность при введении в катушку стального сердечника?
16. Что понимают под емкостью и как она определяется?
17. Что называют угловой частотой ω ?
18. По каким формулам определяют r ; x_L ; x_C и z цепи переменного тока?
19. Каковы основные соотношения и векторные диаграммы в цепях с активной, индуктивной и емкостной нагрузкой?
20. При каких условиях возникает резонанс напряжений?
21. Чему равен коэффициент мощности $\cos \varphi$ при различных условиях и как он определяется?
22. Как определить активную и реактивную проводимости катушки, если известны её активное и индуктивное сопротивления?
23. Как зависят реактивные проводимости катушки индуктивности и конденсатора от частоты?
24. Как определить активную проводимость катушки индуктивности или конденсатора, пользуясь показаниями ваттметра, амперметра и вольтметра?
25. Как определить полную проводимость участка электрической цепи по показаниям электроизмерительных приборов?
26. Как отличаются по фазе приложенное напряжение и ток, протекающий по катушке индуктивности? через конденсатор?
27. Почему и как изменится ток через конденсатор (через катушку индуктивности) при увеличении частоты приложенного напряжения?
28. В какой электрической цепи может возникнуть режим резонанса токов? Каково условие его возникновения? Поясните физическую сущность режима резонанса токов.
29. Какое соединение называется соединением звездой?
30. Как строится векторная диаграмма токов и напряжений при симметричной нагрузке?
31. В каком случае отсутствует ток в нулевом проводе?
32. Почему на нулевой провод не ставят предохранитель?

33. Каковы особенности режима работы потребителей, соединенных звездой, при неравномерной нагрузке фаз систем с нулевым проводом?
34. Каковы особенности режима работы потребителей, соединенных звездой, при обрыве фазы систем с нулевым проводом или без него?
35. Как измеряют мощность трехфазного тока в четырехпроводной схеме?
36. Каким образом три однофазных потребителя соединяют в треугольник?
37. Куда следует подключать вольтметр, чтобы измерить фазное и линейное напряжения трехфазного потребителя?
38. В каком соотношении находятся фазные и линейные напряжения симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
39. Какое соотношение между фазными и линейными токами симметричного потребителя, соединенного в треугольник?
40. Всегда ли справедливы при соединении в треугольник соотношения
41. Всегда ли при соединении в треугольник справедливо
42. Как отразится отключение одной фазы потребителя на режим работы других фаз и на режим работы всей трехфазной цепи, соединенной в треугольник?
43. Как зависят от частоты сопротивления катушки индуктивности и конденсатора?
44. Каково условие возникновения резонанса напряжений в последовательном резонансном контуре?
45. Поясните физическую сущность резонанса напряжений.
46. Как вычислить резонансную частоту?
47. Что понимают под добротностью резонансного контура?
48. Как изменяется в последовательном резонансном контуре угол фазового сдвига между током и приложенным к контуру напряжением при изменении частоты?
49. Как вычислить значения индуктивности катушки и ёмкости конденсатора по измеренным значениям тока и напряжений и заданному значению частоты?
50. Как от частоты зависят проводимости катушки индуктивности и конденсатора?
51. Каково условие возникновения резонанса токов в параллельном резонансном контуре?
52. Поясните физическую сущность резонанса токов.
53. Как вычислить резонансную частоту, если известны параметры элементов резонансного контура?
54. Как вычислить добротность параллельного резонансного контура?
55. Как изменяется в параллельном резонансном контуре угол фазового сдвига между током в неразветвленной части цепи и напряжением при изменении частоты?

56. От чего и как зависит соотношение токов в реактивных элементах и в неразветвленной части цепи при резонансе токов?
57. Как с учётом активного сопротивления вычислить индуктивную проводимость и индуктивность катушки, если известны ток, протекающий по катушке, а также величина и частота приложенного напряжения?
58. Какие гармоники содержит сигнал, симметричный относительно оси абсцисс?
59. Как вычислить сопротивление активно-реактивной цепи для отдельных гармоник тока?
60. Как вычислить углы фазового сдвига между током и напряжением для отдельных гармоник?
61. Как вычислить действующее значение периодического несинусоидального тока?
62. Как вычислить активную мощность в цепи периодического несинусоидального тока?
63. Как можно выделить одну из гармоник периодического несинусоидального тока или напряжения?
64. Опишите конструкцию диода и биполярного транзистора.
65. В результате чего образуется потенциальный барьер р-п – перехода?
66. Почему диод обладает односторонней проводимостью?
67. Чем определяется величина обратного тока диода?
68. Какие различают виды пробоя диода? Опишите физические процессы при различных видах пробоя.
69. Зависимость между какими величинами отражают входные и выходные характеристики биполярных транзисторов?
70. Опишите схемы и способы экспериментального определения вольтамперных характеристик диодов и транзисторов.
71. По какой причине изменяется индуктивность катушки со стальным сердечником при изменении тока?
72. Вследствие чего возникает феррорезонанс напряжений?
73. Что такое триггерный эффект в последовательной феррорезонансной цепи?
74. Как изменяется угол фазового сдвига между током и напряжением в последовательной феррорезонансной цепи при триггерном эффекте?
75. Как влияет ёмкость конденсатора на величину тока и напряжения, при которых возникает феррорезонанс?
76. Как влияют сечение магнитопровода и число витков катушки на ток, при котором возникает феррорезонанс?

77. Как влияет форма кривой намагничивания материала сердечника на положение точки феррорезонанса на вольтамперной характеристике последовательной феррорезонансной цепи?
78. Почему на конденсаторе напряжение не может изменяться скачком?
79. Что понимают под коммутацией?
80. Чем определяется степень характеристического уравнения?
81. Как получить характеристическое уравнение цепи через её входное сопротивление?
82. Как вычисляют докоммутационные и послекоммутационные начальные условия?
83. Что такое постоянная времени переходного процесса?
84. Как изменится постоянная времени цепи с конденсатором при увеличении его ёмкости?
85. Как влияет активное сопротивление электрической цепи, содержащей ёмкость, на длительность переходного процесса?
86. Как рассчитывают зависимые начальные условия?
87. Почему ток в индуктивности не может изменяться скачком?
88. Что понимают под коммутацией?
89. Чем определяется степень характеристического уравнения?
90. Как получить характеристическое уравнение цепи через её входное сопротивление?
91. Как вычисляют докоммутационные и послекоммутационные начальные условия?
92. Что такое постоянная времени переходного процесса?
93. Как изменится постоянная времени цепи с катушкой при увеличении её индуктивности?
94. Как влияет активное сопротивление электрической цепи, содержащей индуктивность, на длительность переходного процесса?
95. Как рассчитывают зависимые начальные условия?
96. Какие линии относят к линиям с распределёнными параметрами?
97. Перечислите электрические параметры длинной линии. Их размерность?
98. Справедливо ли для параметров длинной линии соотношение $Z_0 = 1/G_0$?
99. Функциями каких переменных являются напряжение и ток в линии с распределёнными параметрами?
100. Чем определяются значения параметров длинной линии?

101. Как получить основные уравнения длинной линии?
102. Каким образом при решении уравнений длинной линии переходят от уравнений в частных производных к уравнениям в простых производных?
103. Как относительно комплексов напряжения и тока выглядит общий вид решения уравнений длинной линии?
104. Что представляют собой постоянная распространения, коэффициент затухания, коэффициент фазы? Что определяют эти коэффициенты?
105. Как определяют постоянные интегрирования в решении уравнений длинной линии?
106. Как перейти от комплексов напряжения и тока к функциям времени?
107. Объясните, почему в общем случае напряжение и ток в длинной линии можно представить, как сумму падающей и отражённой волн?
108. Что понимают под фазовой скоростью? Как она связана с частотой напряжения и длиной волны?
109. Какую линию называют линией без потерь?
110. Какие режимы могут существовать в длинной линии? Охарактеризуйте эти режимы. Чем они определяются?
111. Каким может быть и чем определяется входное сопротивление длинной линии? Что понимают под волновым сопротивлением линии?
112. Закон Ома. Определение. Формула.
113. Первый закон Кирхгофа. Формула, определение
114. Что называется, последовательным соединением?
115. Что называется, параллельным соединением?
116. Формула для определения эквивалентного сопротивления, если два резистора соединены: Параллельно? Последовательно?
117. В чем заключается метод узловых и контурных уравнений?
118. Сколько узловых уравнений составляют для цепи?
119. По какому закону составляются узловые уравнения и как этот закон читается?
120. Как выбирают направления токов в узловых уравнениях?
121. Сколько контурных уравнений составляют для цепи?
122. По какому закону составляют контурные уравнения и как он читается?
123. Как выбирают направления ЭДС в контурных уравнениях?
124. Чему равно общее количество уравнений, составленных по данному методу?
125. Как читается первый закон Кирхгофа?
126. Как читается второй закон Кирхгофа?

127. В каком случае ЭДС считается отрицательным?
128. Как выбираются направления токов в узловых уравнениях?
129. Что называют узлом?
130. Что называют контуром?
131. Что называют ветвью электрической цепи?
132. В чем заключается метод узлового напряжения?
133. Что называют узловым напряжением?
134. Чему равна проводимость ветви?
135. Как определяют токи ветвей по данному методу?
136. Как читается закон Ома для участка цепи?
137. Как читается первый закон Кирхгофа?
138. В каком случае ток ветви будет отрицательным?
139. Что называют ветвью?
140. В чем заключается метод наложения?
141. Какие преимущества данного метода?
142. Как определяются значения действительных токов?
143. Как выбирают направления частичных токов?
144. В чем состоит метод свертывания электрической цепи?
145. Расскажите о преобразовании треугольника сопротивлений в эквивалентную звезду сопротивлений.
146. Расскажите о преобразовании звезды сопротивлений в эквивалентный треугольник сопротивлений.
147. Что называется магнитной цепью?
148. Назовите элементы магнитной цепи.
149. Каковы основные параметры магнитной цепи?
150. Чем отличается переменный ток от постоянного?
151. Приведите основные характеристики синусоидального тока.
152. Как определяется действующее значения переменного тока?
153. Как изображается переменный ток на комплексной плоскости?
154. Приведите комплексные формы записи переменного тока.
155. Как аналитически и графически сложить (вычесть) два переменных тока?
156. Как аналитически умножить или разделить две комплексные величины?
157. Как определяется и что показывает мгновенная мощность?
158. Как определяется индуктивное сопротивление? Емкостное?
159. Если цепь разветвленная, то как соединятся параметры цепи?

160. Чему равны токи ветвей для такой цепи?
161. Как определяют общий ток цепи?
162. Чему равны активные и реактивные составляющие токов ветвей для такой цепи?
163. Что называют векторной диаграммой?
164. Объяснить построение векторной диаграммы для такой цепи
165. Как выбирается масштаб для данной векторной диаграммы?
166. Чему равны активная, реактивная и полная мощность для данной цепи?
167. Чему равен активный коэффициент мощности цепи?
168. Какой ток называют переменным?
169. Если цепь неразветвленная, то как соединяются параметры цепи?
170. Как ведет себя напряжение на участке с активным сопротивлением по отношению к току?
171. Чему равно мгновенное напряжение на участке с индуктивностью?
172. Чему равно мгновенное напряжение на участке с емкостью?
173. Что называют векторной диаграммой?
174. Чему равно полное сопротивление для такой цепи?
175. Как определяются реактивные сопротивления на индуктивности и на емкости?
176. Чему равны активный и реактивный коэффициенты мощности цепи?
177. Что означает симметричный трехфазный источник электрической энергии?
178. Что означает несимметричный трехфазный источник?
179. Перечислите способы соединения обмоток трехфазного источника.
180. Что такое нейтральный провод?
181. Какое напряжение называется фазным, линейным?
182. Что означает симметричная и несимметричная нагрузка?
183. Что такое напряжение смещения нейтрали?
184. Как определить ток в нейтральном проводе при симметричной нагрузке?
185. Чему равна мощность трехфазной системы в симметричном режиме?
186. Что такое одно-, двух- и трехфазное короткое замыкание?
187. К чему приводят повреждения и аварии в энергетических системах?
188. На какие две группы делят несимметрию?
189. К чему позволяет привести задачу метод симметричных составляющих?
190. Из чего состоит система нулевой последовательности?
191. Любую ли несимметричную систему трёхфазных напряжений, токов, ЭДС можно представить, как результат наложения систем прямой, обратной и нулевой последовательностей?

192. Если каким-либо образом найдены симметричные составляющие прямой, обратной и нулевой последовательностей, можно ли определить исходные несимметричные напряжения и токи в трёхфазной цепи?
193. В чем состоит первоначальная задача метода наложения?
194. Какая последовательность токов статора создает магнитное поле в электрических машинах?
195. Что такое схема замещения?
196. Что называют симметричной системой нулевой, прямой и обратной последовательности (токов)?
197. Почему в схеме замещения обратной последовательности отсутствует ЭДС генератора?
198. Что является причиной появления несинусоидальных токов и напряжений в электрических цепях?
199. Изложите алгоритм разложения в ряд Фурье периодических несинусоидальных напряжений и токов.
200. Какие гармонические отсутствуют в спектрах кривых, симметричных относительно: 1) оси абсцисс; 2) оси ординат; 3) начала системы координат?
201. Какие величины и коэффициенты характеризуют периодические несинусоидальные переменные?
202. Как определяются действующие значения периодических несинусоидальных величин?
203. Изложите порядок расчета линейных электрических цепей при несинусоидальных напряжениях и токах.
204. Приведите формулы для определения всех видов мощностей для несинусоидальных напряжений и токов.
205. В чем разница результатов расчетов тока цепи, выполненных для мгновенных и действующих значений?
206. Достаточно ли для определения величины полной мощности в цепи несинусоидального тока наличие информации об активной и реактивной мощностях?
207. Для каких цепей справедлива методика расчета цепей несинусоидального тока, основанная на разложении ЭДС и токов источников в ряды Фурье?
208. Системы напряжений (ЭДС, токов) какой последовательности в трехфазных цепях образуют гармоники порядка $k = (3n+1)$, $(3n-1)$, $3n$? Каким свойством обладают эти симметричные системы?

209. Почему в линейных напряжениях генератора при соединении его обмоток звездой отсутствуют гармоники, кратные трем?
210. Какие гармоники содержатся в фазных и линейных токах при соединении обмоток генератора и приемников треугольником?
211. Какие гармоники содержатся в фазных и линейных токах при соединении обмоток генератора и нагрузки звездой с нулевым проводом?
212. Почему при соединении нагрузки звездой с нулевым проводом ток нулевого провода содержит только гармоники, кратные трем?
213. Почему при соединении нагрузки звездой без нулевого провода линейные токи не содержат гармоник, кратных трем?
214. Что такое переходной процесс?
215. Что называется коммутацией?
216. В чем заключаются причины возникновения переходных процессов?
217. Как читаются законы коммутации?
218. Что понимают под начальными значениями?
219. Чем обусловлены свободный и принужденный режимы?
220. Какие начальные условия называются зависимыми и независимыми?
221. Что называется коэффициентом затухания и постоянной времени переходного процесса?
222. Как определяются независимые и зависимые начальные условия?
223. Чем опасны переходные процессы?
224. В чем заключается сущность классического метода расчета переходных процессов?
225. Какие виды корней может иметь характеристическое уравнение второй степени?
226. Какой характер переходного процесса соответствует каждой паре корней характеристического уравнения второй степени?
227. Какие вы знаете способы составления характеристического уравнения?
228. Чем определяется число корней характеристического уравнения?
229. Что такое переходной процесс?
230. Что называется коммутацией?
231. В чем заключаются причины возникновения переходных процессов?
232. Как читаются законы коммутации?
233. Чем опасны переходные процессы?
234. Сущность операторного метода расчета переходных процессов.

235. Как определить операторное сопротивление цепи?
236. Записать закон Ома в операторной форме.
237. Записать второй закон Кирхгофа в операторной форме.
238. Что характеризует с физической точки зрения внутренний источник катушки индуктивности в операторной схеме замещения?
239. Что характеризует с физической точки зрения внутренний источник конденсатора в операторной схеме замещения?
240. Как определить оригинал с помощью таблицы соответствия?
241. Как определить оригинал с помощью теоремы разложения?
242. Зарисовать операторную схему замещения для катушки индуктивности.
243. Зарисовать операторную схему замещения для конденсатора.
244. Как составить операторную схему замещения для свободного процесса?
245. Как составить операторную схему замещения для переходного процесса?
246. В чем заключаются особенности расчета переходных процессов в нелинейных цепях?
247. В чем состоит сущность метода условной линеаризации? С чем связана его невысокая точность?
248. В чем заключается основное преимущество метода аналитической аппроксимации?
249. Следует ли применять метод кусочно-линейной аппроксимации для расчета переходных процессов в цепях с питанием от источника переменного напряжения?
250. В чем заключается разница между цепями с сосредоточенными и распределенными параметрами?
251. По какому критерию цепь относят к классу цепей с распределенными или сосредоточенными параметрами?
252. Нарисуйте схему замещения длинной линии.
253. Объясните понятия прямой и обратной бегущих волн.
254. Что такое согласованный режим работы цепи с распределенными параметрами, чем он характеризуется?
255. Какие цепи называют цепями с распределенными параметрами? В чем состоят их особенности? Почему длинные линии относят к цепям с распределенными параметрами?
256. Как составляют дифференциальные уравнения длинных линий? Как осуществляется переход от уравнений в частных производных к обыкновенным дифференциальным уравнениям?

257. Опишите волновые процессы в длинной линии при гармоническом воздействии и их особенности.
258. Дайте общую характеристику режима бегущих волн. Каковы законы изменения амплитуд и фазовых углов в этом режиме?
259. В чем состоят особенности режимов стоячих и смешанных волн?
260. Какие особенности нестационарных процессов наблюдаются в линии с согласованной нагрузкой, в несогласованной линии, в разомкнутой и короткозамкнутой линиях?
261. Что называется, емкостью?
262. Какова емкость плоского конденсатора?
263. Какова емкость цилиндрического конденсатора?
264. Какова емкость двухпроводной линии?
265. Чему равна емкость при последовательном соединении конденсаторов?
266. Чему равна емкость при параллельном соединении конденсаторов?
267. Каково значение величины $\operatorname{rot} \mathbf{H}$ в однородном магнитном поле?
268. Является ли функция $\operatorname{div} \mathbf{D}$ векторной?
269. Свободные заряды в некотором объеме отсутствуют, так что $\operatorname{div} \mathbf{D} = 0$. Справедливо ли равенство $\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$ в точках объема, если среда а) однородна б) неоднородна?
270. При каком характере распределения в пространстве электрического тока и заряда величины $\operatorname{rot} \mathbf{H}$, $\operatorname{div} \mathbf{D}$ теряют смысл?
271. Чему равна функция $\operatorname{grad} \varphi$ внутри проводящего тела?
272. Что понимается под магнитным полем? Когда и кем было открыто магнитное поле проводника с током?
273. Как графически изображаются магнитные поля? Что такое силовая линия? Изобразите графически простейшие магнитные поля.
274. Какими силовыми величинами характеризуется магнитное поле? Почему их две? Как они связаны между собой?
275. Запишите закон Био – Саварра – Лапласа в дифференциальной форме и рассмотрите его частные случаи. В каких единицах измеряется напряженность магнитного поля в СИ?
276. Как определить величину и направление силы Ампера?
277. Как установить единицу измерения индукции магнитного поля в СИ? Найдите силу взаимодействия двух параллельных токов.
278. Чему равна индукция магнитного поля движущегося заряда?
279. Сформулируйте и поясните закон полного тока.

280. Что такое магнитный поток? В каких единицах он измеряется в СИ? Чему равна работа перемещения проводника и контура с током в магнитном поле?
281. Что понимается под силой Лоренца? Как определить ее величину и направление?
282. Рассмотрите некоторые частные случаи движения заряженных частиц в однородном магнитном поле.
283. В чем состоит эффект Холла и где он используется?
284. Что называют магнитным полем?
285. Составной частью какого поля является магнитное поле?
286. Как определяют направление магнитного поля?
287. Как определяют направление магнитного поля в зависимости от направления электрического тока?
288. Как применить правило левой руки для определения направления поля катушки?
289. Что называют магнитной индукцией и в чем ее измеряют?
290. От чего зависит магнитная индукция в точке?
291. От чего зависит сила электромагнитного воздействия на проводник?
292. Как определить направление силы по правилу левой руки?
293. От чего зависит электромагнитная сила двух проводников с током?
294. Что называют магнитным потоком и в чем его измеряют?
295. Что характеризует абсолютная магнитная проницаемость среды и в каких единицах она измеряется? Чему равна магнитная постоянная?
296. Что характеризует относительная магнитная проницаемость?
297. Что такое напряженность магнитного поля и какова ее единица измерения?
298. Какие зависимости показаны в законе полного тока?
299. Какая зависимость магнитного поля в электрическом проводе и вне его?
300. На основании какого закона определяют магнитное поле кольцевой и цилиндрической катушек?

Методические указания по подготовке к расчетно-графической работе

Расчетно-графическая работа – это самостоятельная письменная работа студента, которая должна показать не только его владение теоретическим материалом, но и продемонстрировать практические умения проводить расчеты.

Цели выполнения к расчетно-графической работы заключаются:

- закрепить и систематизировать теоретические знания и практические навыки студента;
- научить работать с литературой – изучать, анализировать информацию из научных источников;

При выполнении контрольной работы реализуются следующие компетенции:

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-4 Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин	ИД-1 _{ОПК-4} Использует методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока.	Знает основные законы электротехники, теорию электромагнитного поля и цепей с распределенными параметрами, методы анализа, моделирования и расчета линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока
	ИД-2 _{ОПК-4} Использует методы расчета переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.	Умеет использовать методы анализа и моделирования линейных и нелинейных цепей постоянного и переменного тока.
	ИД-3 _{ОПК-4} Применяет знания теории электромагнитного поля и цепей с распределенными параметрами.	Владеет навыками расчета переходных процессов в электрических цепях постоянного и переменного тока.

Методические указания по подготовке к экзамену

Изучение дисциплины «Теоретические основы электротехники» завершается экзаменом. Подготовка к экзамену способствует закреплению, углублению и обобщению знаний, получаемых, в процессе обучения, а также применению их к решению практических задач. Готовясь к экзамену, студент ликвидирует имеющиеся пробелы в знаниях, углубляет, систематизирует и упорядочивает свои знания. На экзамене студент демонстрирует то, что он приобрел в процессе обучения по конкретной учебной дисциплине.

На консультации перед экзаменом студентов знакомят с основными требованиями, ответят на возникшие у них вопросы. Поэтому посещение консультаций обязательно.

При подготовке к экзамену необходимо использовать конспекты лекций по дисциплине, учебники и учебные пособия (из списка основной и дополнительной литературы) или конспект литературы, прочитанной по указанию преподавателя в течение семестра.

Вначале следует просмотреть весь материал по сдаваемой дисциплине, отметить для себя трудные вопросы. Обязательно в них разобраться. В заключение еще раз целесообразно повторить основные положения.

Систематическая подготовка к занятиям в течение семестра позволит использовать время экзаменационной сессии для систематизации знаний.

Вопросы к экзамену

1. Электрическая цепь. Принципиальные электрические схемы и схемы замещения. Топологические понятия, используемые в схемах замещения.
2. Линейные и нелинейные элементы схем замещения. Вольтамперные и вейбер-амперные характеристики.
3. Источники ЭДС и источники тока.
4. Закон Ома для участков цепи, содержащих и не содержащих источники ЭДС.
5. Законы Кирхгофа.
6. Расчет электрической цепи методом непосредственного применения законов Кирхгофа.
7. Расчет электрической цепи методом преобразования схемы.
8. Расчет электрической цепи методом контурных токов.
9. Расчет электрической цепи методом узловых потенциалов.
10. Метод узлового напряжения.
11. Расчет электрической цепи методом наложения.
12. Активный и пассивный двухполюсники.

13. Использование метода холостого хода и короткого замыкания для расчета электрической цепи.
14. Передача электроэнергии по линии электропередач. Условие передачи максимальной мощности. Влияние величины напряжения на КПД передачи.
15. Нелинейные цепи постоянного тока. Вольтамперные характеристики нелинейных элементов.
16. Вольтамперные характеристики при последовательном включении нелинейных элементов.
17. Вольтамперные характеристики при параллельном включении нелинейных элементов.
18. Два метода расчета нелинейных цепей при последовательном соединении элементов.
19. Статические и дифференциальные сопротивления нелинейных элементов. Замена нелинейного сопротивления эквивалентным линейным и источником ЭДС.
20. Магнитные цепи, их разновидности.
21. Ферромагнитные материалы, их параметры и характеристики.
22. Физические величины, характеризующие магнитные поля.
23. Закон полного тока. Магнитодвижущая сила.
24. Вебер-амперные характеристики. Законы Ома и Кирхгофа для магнитных цепей.
25. Методы расчета магнитных цепей.
26. Определение М.Д.С. неразветвленной магнитной цепи по заданному потоку.
27. Определение потока в неразветвленной магнитной цепи по заданной М.Д.С.
28. Электромагнитная индукция. Самоиндукция и ЭДС самоиндукции.
29. Индуктивность. Взаимоиндуктивность.
30. Энергия магнитного поля катушки с током.
31. Магнитная энергия двух магнитосвязанных контуров.
32. Механические силы в магнитном поле. Закон электромагнитной инерции.
33. Синусоидальный ток. Получение энергии синусоидального тока. Параметры синусоидально изменяющихся величин.
34. Среднее и действующее значения синусоидальных тока и напряжения.
35. Способы представления синусоидально изменяющихся величин.
36. Элементы цепей синусоидального тока.
37. Резистивный элемент цепи синусоидального тока: соотношение между током и напряжением, мгновенная и средняя мощности.

38. Индуктивный элемент цепи синусоидального тока. Индуктивное сопротивление и проводимость, соотношение между током и напряжением, мгновенная и средняя мощности.
39. Емкостный элемент в цепи синусоидального тока. Емкостные сопротивления и проводимость, соотношение между током и напряжением, мгновенная и средняя мощности.
40. Последовательное соединение активного и индуктивного элементов в цепи синусоидального тока. Полное и комплексное сопротивление, треугольник сопротивлений. Мгновенная и средняя мощности.
41. Последовательное соединение активного и емкостного элементов в цепи синусоидального тока. Полное и комплексное сопротивления, треугольник сопротивлений. Мгновенная, активная и реактивная мощности.
42. Последовательное соединения активного, емкостного и индуктивного элементов в цепи синусоидального тока. Полное и комплексное сопротивления.
43. Резонанс напряжений.
44. Полная, активная и реактивная мощности в цепи синусоидального тока. Коэффициент мощности.
45. Параллельное соединение активного и индуктивного элементов в цепи синусоидального тока. Полная и комплексная проводимости. Треугольник проводимостей. Мгновенная, активная и реактивная мощности. Коэффициент мощности.
46. Параллельные соединения активного емкостного и индуктивного элементов в цепи синусоидального тока. Полная и комплексная проводимости.
47. Резонанс токов.
48. Связь между сопротивлениями и проводимостями цепи синусоидального тока.
49. Использование законов Ома и Кирхгофа для расчета цепей синусоидального тока.
50. Символический метод расчёта цепей синусоидального тока.
51. Изображение синусоидально изменяющихся величин векторами на комплексной плоскости. Векторные диаграммы.
52. Двухполюсники в цепи переменного тока. Частотная характеристика двухполюсника.
53. Падение и потеря напряжения в линии передачи энергии переменного тока.
54. Расчет электрических цепей при наличии в них магнитосвязанных катушек.
55. Теория четырехполюсников. Основные уравнения четырехполюсника.

56. Определение коэффициентов четырехполюсника.
57. Т - образная схема замещения пассивного четырехполюсника.
58. П – образная схема замещения пассивного четырёхполюсника.
59. Формы коэффициентов четырёхполюсников.
60. Круговые диаграммы. Круговая диаграмма тока для последовательно соединенных двух сопротивлений Z_1 и Z_2 , одно из которых постоянно, а второе имеет постоянный аргумент и переменный модуль.
61. Вывести закон Ома для участков цепи, содержащих Э.Д.С.
62. Рассчитать разветвленную электрическую цепь методом непосредственного применения законов Кирхгофа.
63. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом преобразования схемы.
64. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом контурных токов.
65. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом узловых потенциалов.
66. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом узлового напряжения.
67. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом наложения.
68. Рассчитать токи во всех ветвях электрической цепи методом холостого хода и короткого замыкания.
69. Определить мощность, потребляемую электрической цепью постоянного тока.
70. Составить и рассчитать баланс мощности разветвленной цепи постоянного тока.
71. Построить потенциальную диаграмму замкнутого контура электрической цепи постоянного тока.
72. Определить КПД линии при заданных: напряжении в начале линии, сопротивлении линии сопротивлении нагрузки.
73. Определить токи в разветвленной цепи постоянного тока, содержащей нелинейные сопротивления.
74. Определить М.Д.С. неразветвленной магнитной цепи по заданному потоку.
75. Определить поток в неразветвленной магнитной цепи по заданной М.Д.С.

76. Преобразовать параметры величин переменного тока, представленных в комплексной форме, в параметры величин, представленных в показательной форме. Преобразовать параметры величин переменного тока, представленных в показательной форме, в параметры величин, представленных в комплексной форме.
77. Рассчитать разветвлённую цепь переменного тока методом сопротивлений и проводимостей.
78. Рассчитать разветвлённую цепь переменного тока комплексным методом.
79. Построить векторную диаграмму токов и напряжений разветвлённой цепи переменного тока.
80. Определить полную, активную и реактивную мощность, потребляемую последовательной цепью R , L и C элементов.
81. Определить полную, активную и реактивную мощность, потребляемую параллельной цепью R , L и C элементов.
82. Составить и рассчитать баланс мощности разветвлённой цепи переменного тока.
83. Определить коэффициент мощности последовательной цепи переменного тока, содержащей R , L и C элементы.
84. Определить частоту возникновения резонанса напряжений последовательно соединённых R , L и C элементов.
85. Определить частоту возникновения резонанса токов параллельно соединённых R , L и C элементов.
86. Рассчитать электрическую цепь при наличии в ней магнитосвязанных катушек.
87. Построить векторную диаграмму токов и напряжений электрической цепи при наличии в ней магнитосвязанных катушек.
88. Определить коэффициенты четырёхполюсника на основании полученных экспериментальных данных.
89. Пересчитать коэффициенты четырёхполюсника из Z формы в H форму.
90. Построить круговую диаграмму тока для последовательно соединённых двух сопротивлений Z_1 и Z_2 , одно из которых постоянно, а второе имеет постоянный аргумент и переменный модуль.
91. Определить внутреннее сопротивление источника ЭДС.
92. Определить падение напряжения на указанных элементах электрической цепи.
93. Определить ток в указанных ветвях электрической цепи.

94. Определить омическое сопротивление указанных элементов электрической цепи.
95. Определить ЭДС и напряжение на зажимах источника напряжения.
96. Снять вольт-амперную характеристику линейного сопротивления.
97. Снять вольт-амперную характеристику нелинейного сопротивления.
98. Определить сопротивление проводника из нихрома постоянному току на основании закона Ома.
99. Произвести экспериментальную проверку расчёта разветвлённой электрической цепи постоянного тока методом непосредственного применения законов Кирхгофа.
100. Произвести экспериментальную проверку расчёта электрической цепи постоянного тока методом преобразования схемы.
101. Произвести экспериментальную проверку расчёта электрической цепи постоянного тока методом контурных токов.
102. Произвести экспериментальную проверку расчёта электрической цепи постоянного тока методом узлового напряжения.
103. Определить входное сопротивление двухполюсника методом холостого хода и короткого замыкания.
104. Экспериментально определить статическое сопротивление нелинейного сопротивления в указанной точке.
105. Экспериментально определить динамическое сопротивление нелинейного сопротивления в указанной точке.
106. Экспериментально определить индуктивность катушки, включённой в цепь переменного тока.
107. Экспериментально определить ёмкость конденсатора, включённого в цепь переменного тока.
108. Экспериментально определить мощность, потребляемую активным сопротивлением, включённым в цепь переменного тока.
109. Экспериментально определить полную, активную, и реактивную мощность, потребляемую катушкой, включённой в цепь переменного тока.
110. Экспериментально определить полную, активную, и реактивную мощность, потребляемую R-L-C цепью, включённой в цепь переменного тока.
111. Экспериментально определить комплексное сопротивление R-L цепи, включённой в цепь переменного тока.
112. Экспериментально определить комплексное сопротивление R- C цепи, включённой в цепь переменного тока.

113. Экспериментально определить комплексное сопротивление R-L-C цепи, включённой в цепь переменного тока.
114. Экспериментально определить комплексную проводимость R-L-C цепи, включённой в цепь переменного тока.
115. Экспериментально определить резонансную частоту последовательной R-L-C цепи, включённой в цепь переменного тока.
116. Экспериментально определить резонансную частоту параллельной R-L-C цепи, включённой в цепь переменного тока.
117. Экспериментально определить h- параметры транзистора, включённого по схеме четырёхполюсника.
118. Определить индуктивность катушки измерителем иммитанса.
119. Определить ёмкость конденсатора измерителем иммитанса.
120. Сделать вывод относительно магнитных свойств материала сердечника по изменению индуктивности катушки с соответствующим сердечником.
121. Трёхфазная система ЭДС. Связанные и не связанные системы ЭДС.
122. Соединение трёхфазной цепи звездой, соотношение между линейными и фазными токами и напряжениями.
123. Определение напряжения смещения нейтрали при отсутствии нулевого провода.
124. Роль нулевого провода.
125. Соединение трёхфазной цепи треугольником. Соотношение между линейными и фазными токами и напряжениями.
126. Активная, реактивная и полная мощности трёхфазной системы.
127. Измерение активной мощности в трёхфазной системе.
128. Измерение реактивной мощности в трёхфазной системе.
129. Оператор трёхфазной системы.
130. Разложение несимметричной трёхфазной системы на системы нулевой, прямой и обратной последовательностей фаз.
131. Периодические несинусоидальные токи в линейных электрических цепях, причины их возникновения.
132. Разложение периодических несинусоидальных токов и напряжений на гармонические составляющие.
133. Свойства периодических несинусоидальных кривых, обладающих симметрией.

134. Графический (графо – аналитический) метод определения гармоник ряда Фурье.
135. Расчёт токов и напряжений в линейных электрических цепях при действии несинусоидальных Э.Д.С.
136. Действующие значения несинусоидальных токов и напряжений.
137. Активная и полная мощности периодического несинусоидального тока.
138. Особенности работы трёхфазных систем, вызванные наличием гармоник, кратных трём.
139. Биения. Модулированные колебания.
140. Нелинейные цепи переменного тока. Подразделение нелинейных сопротивлений на три основные группы, их общая характеристика.
141. Основные преобразования, осуществляемые с помощью нелинейных электрических цепей.
142. Последовательная феррорезонансная цепь.
143. Параллельная феррорезонансная цепь.
144. Переходные процессы в линейных электрических цепях, причины их возникновения.
145. Дифференциальные уравнения, описывающие переходные процессы.
146. Принуждённые и свободные составляющие переходных процессов.
147. Законы коммутации, их физическое и математическое обоснование.
148. Докоммутационные и послекоммутационные начальные значения, их нахождение. Независимые и зависимые послекоммутационные значения. Нулевые и ненулевые начальные условия.
149. Составление дифференциальных уравнений для свободных токов и напряжений.
150. Алгебраизация систем уравнений для свободных токов.
151. Составление характеристических уравнений при исследовании переходных процессов в линейных электрических цепях.
152. Степень характеристического уравнения. Зависимость характера переходного процесса от вида корней характеристического уравнения.
153. Определение постоянных интегрирования в классическом методе. Цепь описывается дифференциальным уравнением второго порядка, корни характеристического уравнения вещественные разные.

154. Определение постоянных интегрирования в классическом методе. Цепь описывается дифференциальным уравнением второго порядка, корни характеристического уравнения комплексные.
155. Переходный процесс при подключении на постоянное напряжение катушки индуктивности.
156. Переходный процесс при подключении к источнику постоянной э.д.с. активно-емкостной цепи.
157. Переходный процесс при подключении цепи, состоящей из последовательно включенных катушки индуктивности и конденсатора, к источнику постоянной э.д.с (случай вещественных корней характеристического уравнения).
158. Переходный процесс при подключении цепи, состоящей из последовательно включенных катушки индуктивности и конденсатора, к источнику постоянной э.д.с. (случай комплексных корней характеристического уравнения).
159. Операторный метод. Преобразование Лапласа. Изображение постоянной.
160. Изображение первой производной. Изображение напряжения на индуктивности.
161. Изображение интеграла. Изображение напряжения на конденсаторе.
162. Переходный процесс при включении катушки индуктивности на синусоидальное напряжение.
163. Закон Ома в операторной форме. Внутренние Э.Д.С.
164. Законы Кирхгофа в операторной форме.
165. Составление систем уравнений для изображений при анализе переходных процессов в электрических цепях.
166. Переход от изображений к оригиналам. Формула теоремы разложения.
167. Последовательность расчёта переходных процессов в операторной форме.
168. Понятие переходной проводимости. Нахождение переходной проводимости.
169. Интеграл Дюамеля.
170. Последовательность расчёта переходного процесса с использованием интеграла Дюамеля.
171. Представить связанную и несвязанную системы трёхфазных ЭДС.
172. Представить трёхфазную систему ЭДС, соединённую звездой и вывести соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями.
173. Определить напряжение смещения нейтрали несимметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой с активными сопротивлениями.

174. Определить напряжение смещения нейтрали несимметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой с реактивными сопротивлениями.
175. Построить векторную диаграмму несимметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой с активными сопротивлениями.
176. Построить векторную диаграмму несимметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой с реактивными сопротивлениями.
177. Построить векторную диаграмму симметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой при обрыве одного из фазных проводов.
178. Построить векторную диаграмму симметричной трёхфазной ЭДС, соединённой звездой при КЗ в одной из фаз.
179. Представить трёхфазную систему ЭДС, соединённую треугольником и вывести соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями.
180. Построить векторную диаграмму симметричной трёхфазной ЭДС, соединённой треугольником с активными сопротивлениями.
181. Построить векторную диаграмму симметричной трёхфазной ЭДС, соединённой треугольником с реактивными сопротивлениями.
182. Построить векторную диаграмму симметричной трёхфазной ЭДС, соединённой треугольником при обрыве одного из фазных проводов.
183. Определить полную, активную и реактивную мощность симметричной трёхфазной системы.
184. Определить полную, активную и реактивную мощность несимметричной трёхфазной системы.
185. Разложить несимметричную трёхфазную систему на системы нулевой, прямой и обратной последовательностей фаз.
186. Рассчитать токи и напряжения в линейной электрической цепи при действии несинусоидальной Э.Д.С.
187. Определить действующие значения несинусоидальных токов и напряжений, а также активную и полную мощности периодического несинусоидального тока.
188. Составить систему дифференциальных уравнений для определения свободных токов и напряжений последовательно-параллельной R-L-C цепи.
189. Графически представить характер свободного процесса при двух действительных неравных корнях.
190. Графически представить характер свободного процесса при двух действительных равных корнях.

191. Графически представить характер свободного процесса при двух комплексно сопряжённых корнях.
192. Рассчитать классическим методом переходной процесс при подключении последовательно-параллельной R-C цепи к постоянной ЭДС.
193. Рассчитать классическим методом переходной процесс в последовательной L-C цепи с синусоидальной ЭДС при закорачивании одного из активных сопротивлений.
194. Рассчитать операторным методом переходной процесс в последовательно-параллельной цепи с постоянной ЭДС.
195. Рассчитать операторным методом переходной процесс в последовательно-параллельной цепи с синусоидальной ЭДС.
196. Реализовать трёхфазную симметричную систему ЭДС, соединённую звездой, измерить фазные и линейные токи и напряжения.
197. Реализовать трёхфазную несимметричную систему ЭДС, соединённую звездой, измерить фазные и линейные токи и напряжения.
198. Реализовать трёхфазную несимметричную систему ЭДС, соединённую звездой, измерить напряжение смещения нейтрали и ток нулевого провода.
199. Реализовать трёхфазную систему ЭДС, соединённую треугольником, измерить фазные и линейные токи и напряжения.
200. Экспериментально определить фазные и линейные токи и напряжения трёхфазной симметричной системы ЭДС, соединённой звездой, при обрыве одного из фазных проводов.
201. Экспериментально определить фазные и линейные токи и напряжения трёхфазной симметричной системы ЭДС, соединённой звездой, при КЗ одной из фаз.
202. Экспериментально определить фазные и линейные токи и напряжения трёхфазной симметричной системы ЭДС, соединённой треугольником, при обрыве одного из фазных проводов.
203. Экспериментально определить активную мощность симметричной трёхфазной системы методом трёх ваттметров.
204. Экспериментально определить активную мощность симметричной трёхфазной системы с помощью одного ваттметра.
205. Экспериментально определить реактивную мощность симметричной трёхфазной системы с помощью двух ваттметров.
206. Экспериментально определить активную мощность несимметричной трёхфазной системы с помощью трёх ваттметров.

207. Экспериментально определить активную мощность несимметричной трёхфазной системы с помощью двух ваттметров.
208. Обосновать возможность применения двух ваттметров для измерения мощности трёхфазной системы вне зависимости от схемы соединения нагрузки (звезда или треугольник).
209. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения модулированных колебаний.
210. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения фигур Лиссажу.
211. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения перемagnичивания ферромагнитного сердечника.
212. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения переходного процесса в последовательной R-C цепи.
213. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения переходного процесса в последовательной R-C цепи.
214. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения переходного процесса в последовательной L-C цепи.
215. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения переходного процесса в последовательной R-L-C цепи (корни характеристического уравнения действительные неравные).
216. Реализовать схему электрическую принципиальную для наблюдения переходного процесса в последовательной R-L-C цепи (корни характеристического уравнения комплексно сопряжённые).
217. Исследовать линейную электрическую цепь при периодическом несинусоидальном (прямоугольном) напряжении с целью наблюдения форм напряжений на активном сопротивлении и L-C фильтре.
218. Исследовать линейную электрическую цепь при периодическом несинусоидальном (прямоугольном) напряжении с целью вычисления 3-й, 5-й и 7-й гармоник.
219. Исследовать линейную электрическую цепь при периодическом несинусоидальном (прямоугольном) напряжении с целью вычисления углов фазовых сдвигов гармоник.
220. Реализовать схему электрическую принципиальную с целью получения феррорезонанса в последовательной электрической цепи.
221. Линии с распределёнными параметрами. Основные понятия и определения. Основные уравнения линии с распределёнными параметрами.

222. Решение уравнений линии с распределёнными параметрами при установившемся синусоидальном процессе.
223. Определение комплексов тока и напряжения в любой точке линии через комплексы напряжения и тока в начале линии.
224. Определение комплексов тока и напряжения в любой точке линии через комплексы напряжения и тока в конце линии.
225. Падающая и отраженная волны в линии с распределёнными параметрами. Фазовая скорость. Длина волны.
226. Линия без искажений. Согласованная нагрузка. Определение тока и напряжения в линии при согласованной нагрузке. К.п.д. передачи при согласованной нагрузке. Единица измерения затухания.
227. Входное сопротивление нагруженной линии. Определение тока и напряжения в линии без потерь.
228. Входное сопротивление в линии без потерь при её холостом ходе. Входное сопротивление в линии без потерь при коротком замыкании в конце линии.
229. Стоячие электромагнитные волны в линии без потерь. Стоячие волны в линии без потерь при её холостом ходе.
230. Стоячие электромагнитные волны в линии без потерь. Стоячие волны в линии без потерь при коротком замыкании на конце линии.
231. Электростатическое поле. Закон Кулона.
232. Потенциал и напряженность в электростатическом поле. Разность потенциалов. Потенциальный характер электростатического поля.
233. Силовые и эквипотенциальные линии электростатического поля. Выражение напряженности в виде градиента от потенциала.
234. Дифференциальный оператор Гамильтона, его использование для записи градиента потенциала.
235. Поток вектора напряженности через элемент поверхности и через поверхность.
236. Свободные и связанные заряды. Поляризация вещества.
237. Вектор поляризации. Вектор электрической индукции.
238. Теорема Гаусса в интегральной форме. Применение теоремы Гаусса для определения напряженности и потенциала в поле точечного заряда.

239. Теорема Гаусса в дифференциальной форме. Дивергенция вектора электрической индукции и вектора напряжённости электрического поля. Вывод дивергенции напряжённости электрического поля в декартовой системе координат. Использование оператора набла для записи операции взятия дивергенции.
240. Уравнение Пуассона и уравнение Лапласа для электростатического поля.
241. Граничные условия. Условия на границе раздела проводящего тела и диэлектрика.
242. Граничные условия. Условия на границе раздела двух диэлектриков.
243. Общая характеристика задач электростатики и методы их решения. Теорема единственности решения.
244. Метод зеркальных изображений. Поле заряженной оси. Поле двухпроводной линии.
245. Ёмкость.
246. Потенциальные коэффициенты. Первая группа формул Максвелла.
247. Ёмкостные коэффициенты. Вторая группа формул Максвелла.
248. Частичные ёмкости. Третья группа формул Максвелла.
249. Плотность тока и ток. Закон Ома и второй закон Кирхгофа в дифференциальной форме.
250. Первый закон Кирхгофа в дифференциальной форме. Дифференциальная форма закона Джоуля – Ленца.
251. Уравнение Лапласа для электрического поля в проводящей среде.
252. Переход тока через среды с различной проводимостью. Соотношение между проводимостью и ёмкостью.
253. Связь основных величин, характеризующих магнитное поле. Механические силы в магнитном поле.
254. Интегральная и дифференциальная формы закона полного тока.
255. Раскрытие ротора напряжённости магнитного поля в различных формах и выражение его проекций в различных системах координат.
256. Принцип непрерывности магнитного потока. Скалярный потенциал магнитного поля.
257. Граничные условия в магнитном поле. Векторный потенциал магнитного поля. Выражение магнитного потока через циркуляцию вектора-потенциала.
258. Общая характеристика методов расчёта и исследования магнитных полей.
259. Магнитное экранирование.
260. Применение метода зеркальных изображений для расчёта магнитных полей.

- 261. Закон Био – Савара – Лапласа.
- 262. Определение переменного электромагнитного поля. Первое уравнение Максвелла.
- 263. Определение переменного электромагнитного поля. Второе уравнение Максвелла.
- 264. Определение переменного электромагнитного поля. Уравнение непрерывности.
- 265. Уравнение Максвелла в комплексной форме записи.
- 266. Теорема Умова – Пойнтинга для мгновенных значений.
- 267. Теорема Умова – Пойнтинга в комплексной форме.
- 268. Уравнения Максвелла для проводящей среды.
- 269. Распространение плоской электромагнитной волны в однородном проводящем полупространстве.
- 270. Плоская электромагнитная волна.
- 271. Глубина проникновения и длина волны.
- 272. Магнитный поверхностный эффект.
- 273. Электрический поверхностный эффект в плоской шине.
- 274. Применение теоремы Умова – Пойнтинга для определения активного внутреннего индуктивного сопротивлений проводников при переменном токе.
- 275. Распространение электромагнитных волн в одноотропном и изотропном диэлектриках.
- 276. Плоские волны в однородных и изотропных полупроводящих средах.
- 277. Вывод уравнений для векторного и скалярного потенциалов в переменном электромагнитном поле и их решение.
- 278. Запаздывающие потенциалы переменного электромагнитного поля.
- 279. Комплексная форма записи запаздывающего векторного потенциала.
- 280. Излучение электромагнитной энергии.

Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Перечень основной литературы:

1. Теоретические основы электротехники : учебник / И. Я. Лизан, К. Н. Маренич, И. В. Ковалева [и др.]. — Москва, Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. — 628 с. — ISBN 978-5-9729-0663-5. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/114971.html>
2. Зонов, В. Н. Теоретические основы электротехники. Электрические и магнитные цепи постоянного тока : учебное пособие / В. Н. Зонов, П. В. Зонов, Ю. Б. Ефимова. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2020. — 80 с. — ISBN 978-5-7782-4090-2. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/98742.html>
3. Петренко, Ю. В. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи с распределенными параметрами : учебное пособие / Ю. В. Петренко. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2019. — 64 с. — ISBN 978-5-7782-3876-3. — Текст : электронный // Цифровой образовательный ресурс IPR SMART : [сайт]. — URL: <https://www.iprbookshop.ru/99223.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Горбунова Л.Н. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] / Л.Н. Горбунова, С.А. Гусева. — Электрон. текстовые данные. — Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет, 2015. — 117 с. — 978-5-9642-0269-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/55913.html>
2. Крутов А.В. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Крутов, Э.Л. Кочетова, Т.Ф. Гузанова. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2016. — 376 с. — 978-985-503-580-1. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67742.html>

Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические указания по выполнению практических работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

2. Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

3. Методические указания по выполнению расчетно-графических работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

4. Методические указания по организации и проведению самостоятельной работы по дисциплине «Теоретические основы электротехники».

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks