

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«КАЛИНИНГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**М. Э. Сивуха**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

Учебно-методическое пособие – локальный электронный методический  
материал по лабораторным работам для студентов бакалавриата  
по направлению подготовки 13.03.02 Электротехника и электроэнергетика

Калининград  
Издательство ФГБОУ ВО «КГТУ»  
2022

УДК 631.371

Рецензент

кандидат технических наук, доцент кафедры энергетики  
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет»  
И. Е. Кажекин

**Сивухо, М. Э.**

Теоретические основы электротехники: учебно-методическое пособие – локальный электронный методический материал по лабораторным работам для студентов бакалавриата по направлению подготовки 13.03.02 Электротехника и электроэнергетика / **М. Э. Сивухо**. – Калининград: ФГБОУ ВО «КГТУ», 2022. – 88 с.

В учебно-методическом пособии по лабораторным работам дисциплины приведены методические указания для проведения лабораторных работ, а также вопросы для самостоятельной работы. Список литературы – 5 наименований.

Локальный электронный методический материал. Учебно-методическое пособие. Рекомендовано к использованию в учебном процессе методической комиссией института морских технологий, энергетики и строительства 25.11.2022 г., протокол № 3

УДК 631.371

© Федеральное государственное  
бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный  
технический университет», 2022 г.  
© Сивухо М. Э., 2022 г.

## Содержание

	Введение.....	4
1	Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ. ТРАНСФИГУРАЦИЯ «ТРЕУГОЛЬНИКА» В «ЗВЕЗДУ»	7
2	Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПОМОЩИ ЗАКОНОВ КИРХГОФА И МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ	12
3	Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО МЕТОДУ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА. ПОСТРОЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ	18
4	Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА	24
5	Лабораторная работа № 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА	30
6	Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА	36
7	Лабораторная работа № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА В ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА	41
8	Лабораторная работа № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ С ВЗАИМОИНДУКЦИЕЙ	47
9	Лабораторная работа № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»	53
10	Лабораторная работа № 10. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК»	59
11	Лабораторная работа № 11. ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ...	64
12	Лабораторная работа № 12. ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШКИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ	71
13	Лабораторная работа № 13. ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ	76
14	Лабораторная работа № 14. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ	81
	Рекомендуемая литература	87

## **Введение**

Целью изучения дисциплины «Теоретические основы электротехники» является формирование знаний в области теории, расчета и анализа электрических и магнитных цепей, рассматриваемых как модели реальных электротехнических устройств.

Задачи дисциплины:

- изучение методов расчета электрических цепей постоянного и переменного токов;
- изучение многообразных физических явлений и процессов, происходящих в электротехнических устройствах;
- приобретение навыков правильного выбора измерительных устройств контроля электрических и неэлектрических параметров.

Лабораторные работы предназначены для углубления и закрепления теоретических знаний, полученных на лекциях, а также для обучения студентов навыкам работы с электрооборудованием, развития инициативы и самостоятельности в работе

Настоящие методические указания содержат описание лабораторных работ, поставленных в специализированной лаборатории «Общей электротехники» (ауд. 144) кафедры энергетики по дисциплине «Теоретические основы электротехники» для студентов по направлению подготовки 13.03.02 Электротехника и электроэнергетика.

В описании каждой лабораторной работы приводятся краткие теоретические сведения, исследуемые принципиальные электрические схемы, порядок выполнения работы, указания к содержанию отчета и контрольные вопросы.

Лабораторные работы выполняются на универсальном стенде ЭВ-4 в соответствии с требованиями по технике безопасности, изложенными в «Инструкции по технике безопасности в лабораториях кафедры энергетики». В начале каждого семестра преподаватель проводит инструктаж по технике безопасности, и каждый студент расписывается в журнале.

### **Основные правила техники безопасности при выполнении лабораторных работ**

1. К работе с электрооборудованием допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и получившие допуск к выполнению лабораторных работ.

2. Сборку электрических цепей разрешается производить только при выключенном напряжении, в чем надо убедиться по положению переключателей питания на щите и стенде.

3. Самостоятельно включать схемы под напряжение без проверки правильности ее сборки преподавателем категорически запрещается.

4. При включении схемы под напряжение необходимо убедиться в том, что никто из студентов группы не касается оголенных участков схемы, предупреждать их голосом: «Включайте».

5. Категорически запрещается касаться руками оголенных токоведущих частей и зажимов электрических цепей, находящихся под напряжением.

6. Всякие переключения в цепи, замену предохранителей, электроизмерительных приборов и лабораторного оборудования производить только при снятом напряжении в присутствии инженера или преподавателя.

7. Особую осторожность необходимо проявлять при работе с цепями, содержащими катушки индуктивности, конденсаторы и трансформаторы тока.

8. При возникновении каких-либо сбоев в работе с цепью, а также при исчезновении напряжения, немедленно отключать цепи от источника энергии и доложить преподавателю или инженеру.

9. Без разрешения преподавателя или инженера запрещается трогать, вскрывать или включать лабораторное оборудование, не относящееся к выполняемой работе.

10. Запрещается производить вскрытие лабораторного оборудования, если это не предусмотрено заданием.

11. На время перерыва занятий необходимо отключать исследуемое электрооборудование и электрические цепи от источников питания.

12. Категорически запрещается пользоваться неисправным электрооборудованием, электроизмерительными приборами и инструментами.

Студенты, нарушившиеся правила техники безопасности, к дальнейшему выполнению работ не допускаются до передачи ими правил техники безопасности.

Каждый студент должен заранее готовиться к лабораторным работам, порядок выполнения которых определяется в начале семестра ведущим преподавателем, с использованием настоящих методических указаний, конспекта лекций и рекомендованной литературы. Подготовка представляет собой составление отчета, который должен включать в себя: шифр группы, ФИО студента, название и цель работы, аналитическое исследование, принципиальные схемы и таблицы для записи результатов измерений и вычислений. После ознакомления с оборудованием и измерительными приборами и с разрешения преподавателя студент может приступать к сборке схемы. Перед подачей питания на собранную схему студенты должны получить

разрешение преподавателя. После проведения экспериментального исследования полученные результаты необходимо также показать преподавателю.

После проведения опытов студент оформляет отчет до конца, то есть производит необходимые вычисления по результатам эксперимента, строит графики и векторные диаграммы, делает выводы о проделанной работе, в которых указывает достигнута ли поставленная цель и объясняет причину расхождения между данными аналитического и экспериментального исследований.

Защита лабораторных работ разрешается после предоставления полностью оформленного отчета.

## Лабораторная работа №1

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ПРЕОБРАЗОВАНИЯ. ТРАНСФИГУРАЦИЯ «ТРЕУГОЛЬНИКА» В «ЗВЕЗДУ»

#### Цель работы:

Ознакомиться с применением метода эквивалентного преобразования (трансфигурации) в линейных цепях постоянного тока.

#### Сведения из теории:

Во многих случаях расчет электрической цепи можно упростить путем преобразования ее из сложного вида в другой, более простой. При этом уменьшается число ветвей или узлов, либо и то, и другое, а, следовательно, уменьшается и число уравнений, определяющих электрическое состояние электрической цепи. Преобразование электрической цепи или ее части должно быть эквивалентным, то есть таким, при котором напряжения и токи в частях схемы, не подвергшихся преобразованию, не изменяются.

Преобразованию могут подвергаться цепи, содержащие последовательное и параллельное соединение элементов, а также соединения «треугольником» и «звездой».

При последовательном соединении резисторов эквивалентное сопротивление равно:

$$R_{\text{экв}} = \sum_{k=1}^n R_k \quad (1.1)$$

где n- число последовательно соединенных резисторов.

При параллельном соединении резисторов эквивалентная проводимость:

$$G_{\text{экв}} = \sum_{k=1}^m G_k \quad (1.2)$$

где m- число параллельно соединенных резисторов.

При трансфигурации «треугольника» в «звезду» и обратно используют следующую связь между сопротивлениями и проводимостями звезды и треугольника, представленных на рис.1.1:

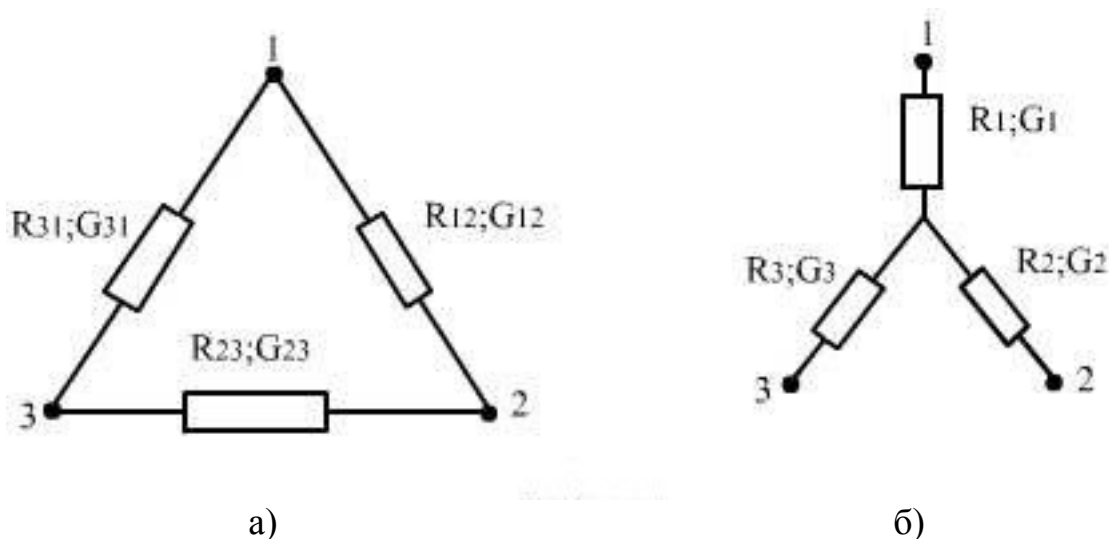


Рис. 1.1

$$R_1 = \frac{R_{12} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; R_2 = \frac{R_{12} \cdot R_{23}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}}; R_3 = \frac{R_{23} \cdot R_{31}}{R_{12} + R_{23} + R_{31}} \quad (1.3)$$

$$G_{12} = \frac{G_1 \cdot G_2}{G_1 + G_2 + G_3}; G_{23} = \frac{G_2 \cdot G_3}{G_1 + G_2 + G_3}; G_{31} = \frac{G_1 \cdot G_3}{G_1 + G_2 + G_3} \quad (1.4)$$

Формулы (1.4) можно записать через сопротивления:

$$R_{12} = R_1 + R_2 + \frac{R_1 \cdot R_2}{R_3}; R_{23} = R_2 + R_3 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_1}; R_{31} = R_3 + R_1 + \frac{R_3 \cdot R_1}{R_2} \quad (1.5)$$

Если сопротивления «треугольника» равны  $R_{12}=R_{23}=R_{31}=R_{mp}$ , то будут равным между собой и сопротивления «звезды»  $R_1=R_2=R_3=R_{зв}$ ,

$$R_{зв} = \frac{R_{mp}}{3} \quad (1.6)$$

### Порядок выполнения работы:

#### 1 Аналитическое исследование

1.1 Для заданных (преподавателем) значений напряжения и величин трех сопротивлений рассчитать ток и эквивалентное сопротивление:

- при последовательном соединении;
- при параллельном соединении;
- при смешанном соединении (два параллельно и одно последовательно с ними).

1.2 Для выбранных резисторов выполнить трансфигурацию «треугольника» в «звезду».



## 2 Экспериментальное исследование

2.1 Для выбранных ранее трех резисторов собрать электрическую цепь при последовательном их включении.

2.2 Измерить ток цепи и напряжения на отдельных участках. Рассчитать эквивалентное сопротивление  $R_{экв}$ , мощность цепи и отдельных участков, соотношение напряжений и сопротивлений. Результаты занести в таблицу 1.1 (напряжение на входе цепи должно соответствовать расчетному).

Таблица 1.1 – Последовательное соединение

Измерено					Вычислено						
U	I	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	U <sub>3</sub>	R <sub>экв</sub>	P <sub>цепи</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	U <sub>1</sub> :U <sub>2</sub> ; U <sub>2</sub> :U <sub>3</sub>	R <sub>1</sub> : R <sub>2</sub> ; R <sub>2</sub> : R <sub>3</sub>
В	А	В	В	В	Ом	Вт	Вт	Вт	Вт		

2.3 Собрать электрическую цепь из трех параллельно включенных резисторов (величина сопротивлений резисторов и напряжений остаются такими же, как и в первом опыте).

2.4 Измерить ток параллельных ветвей. Рассчитать общий ток  $I$ , эквивалентное сопротивление  $R_{экв}$ , проводимость  $G_{экв}$ , мощность цепи для всех участков. Результаты занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Параллельное соединение

Измерено				Вычислено						
U	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	I	R <sub>экв</sub>	G <sub>экв</sub>	P <sub>цепи</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
В	А	А	А	А	Ом	См	Вт	Вт	Вт	Вт

2.5 Собрать схему смешанного соединения сопротивлений. Измерить токи ветвей и напряжения на участках цепи. Результаты занести в таблицу 1.3. Также привести результаты расчета параметров, указанных в ней.

Таблица 1.3 – Смешанное соединение

Измерено						Вычислено								
U	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	U <sub>1</sub>	U <sub>2</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>	P <sub>цепи</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>
В	В	В	А	А	А	В	В	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт

2.6. Собрать мостовую электрическую схему (рис.1.2, а)

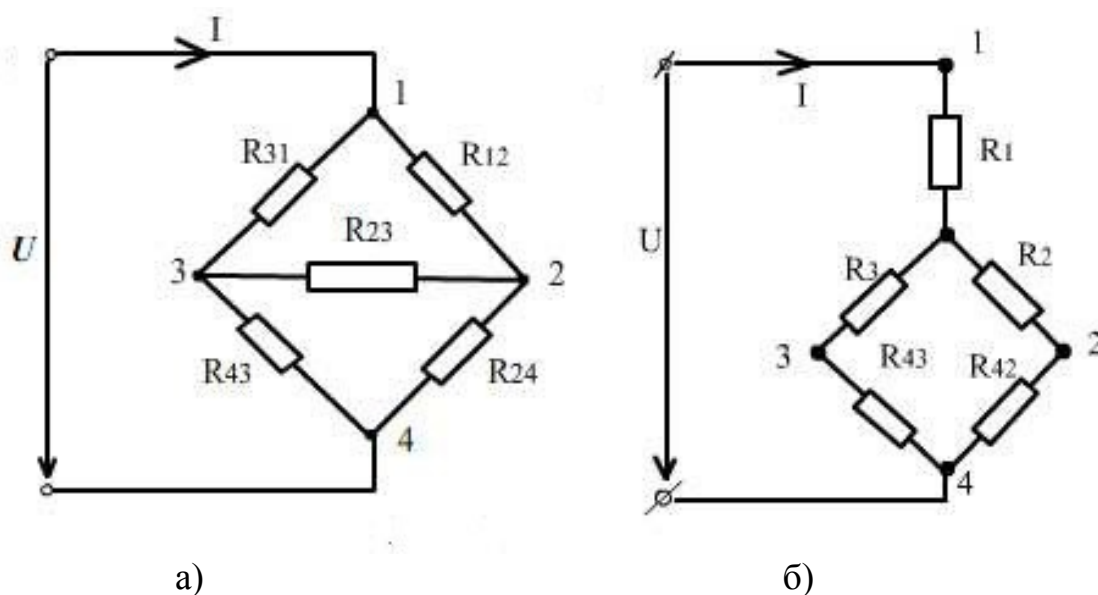


Рис.1.2

2.7 Установить на входе цепи напряжение по указанию преподавателя. Измерить ток  $I$ , потребляемый от источника, и напряжение  $U_{32}$  между узлами 2 и 3.

2.8 Согласно расчетным данным поменять резисторы «треугольника»  $R_{12}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_{31}$  на сопротивления эквивалентной «звезды»  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  (рис. 1.2, б). Измерить ток  $I$ , потребляемый от источника, и напряжение  $U_{32}$ .

2.9 Результаты измерений пунктов 2.7 и 2.8 и требуемых вычислений занести в таблицу 1.4.

Таблица 1.4 – Трансфигурация «треугольника» в «звезду»

Измерено				Вычислено							
	U	$U_{23}$	I	I	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	P	$\Sigma I^2 R$
	В	В	А	А	А	А	А	А	А	Вт	Вт
$\Delta$											
$\star$											

Дополнительные требования к содержанию отчета:

1. Привести рабочие схемы для всех опытов с указанием типа используемых приборов.

2. Проанализировать результаты опытов и написать выводы по каждому из них и в целом по работе.

### Контрольные вопросы:

- 1 Дать определение простой и сложной цепи. Привести примеры.
- 2 Каковы направления ЭДС, токов и напряжений на активных и пассивных участках электрической цепи?
- 3 Какова область применения последовательного, параллельного и смешанного соединения потребителей? Их достоинства и недостатки.
- 4 Каковы основные соотношения для цепи с последовательным соединением сопротивлений? С параллельным соединением?
- 5 Что такое ЭДС источника и чем она отличается от напряжения на зажимах источника?
- 6 Условия, при которых «треугольник» сопротивлений можно преобразовать в эквивалентную «звезду» и наоборот.
- 7 В схеме на рис. 1.2 все резисторы равны между собой. Чему будет равен ток, протекающий через сопротивление, включенное в диагональ моста?
- 8 Подобрать регулировочный реостат для регулирования напряжения приемника в пределах от 50 до 100 В, если сопротивление приемника 100 Ом, а напряжение сети 120 В.
- 9 Определить потребляемый ток и мощность, выделяемую на нагрузке, которая включена в сеть с напряжением 220 В, если нагрузка состоит из двух резисторов по 200 Ом, включенных параллельно друг другу, соединенных последовательно с резистором, имеющим сопротивление 120 Ом.
- 10 Какое преобразование называется эквивалентным?

## Лабораторная работа №2

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПРИ ПОМОЩИ ЗАКОНОВ КИРХГОФА И МЕТОДА НАЛОЖЕНИЯ

#### Цель работы:

Приобретение навыков расчета сложных электрических цепей при помощи законов Кирхгофа и метода наложения.

#### Сведения из теории:

Электрические цепи, которые путем преобразования не приводятся к эквивалентной одноконтурной цепи, называются сложными электрическими цепями. Как правило, сложная цепь содержит несколько источников энергии, действующих в различных ветвях.

Наиболее часто расчет цепи сводится к определению токов по известным ЭДС и сопротивлениям. Основными законами, используемыми при расчете сложных цепей, являются закон Ома и законы Кирхгофа.

Закон Ома для участка цепи:

$$I = \frac{U}{R} = UG \quad (2.1)$$

где  $I$ - величина тока, А;

$U$ - падение напряжения на участке цепи, В;

$R$ - сопротивление участка цепи, Ом;

$G$ - проводимость участка цепи, См;

Первый закон Кирхгофа:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (2.2)$$

где  $n$ - число ветвей, сходящихся в данном узле.

Токи одного направления, например, входящие в узел, записываются со знаком плюс, а токи противоположного направления, например, выходящие из узла, со знаком минус.

Второй закон Кирхгофа:

$$\sum_{j=0}^m E_j = \sum_{k=1}^p U_k \quad (2.3)$$

где  $m$  - число ЭДС в контуре;

$p$  - число падений напряжения в контуре.

ЭДС и напряжения берутся со знаком плюс, если их направление совпадает с принятым направлением обхода контура, и со знаком минус, если не совпадает.

Расчет цепей при помощи законов Кирхгофа выполняется в следующей последовательности:

а) обозначают токи во всех ветвях ( $I_1, I_2, \dots, I_m$ ): произвольно выбирают и обозначают на схеме их положительные направления;

б) составляют уравнения по первому закону Кирхгофа для  $(n-1)$  узлов;

в) произвольно выбирают направление обхода контуров и недостающие  $m - (n-1)$  уравнений составляют по второму закону Кирхгофа. При этом контуры выбирают так, чтобы каждый из них содержал хотя бы одну не учтенную ранее ветвь;

г) решают полученную систему  $m$  уравнений.

Если значения некоторых токов получаются со знаком минус, то это означает, что действительные направления их будут противоположны первоначально выбранным.

Метод наложения позволяет свести расчет сложной цепи с несколькими источниками питания к нескольким расчетам этой же цепи с одним источником питания.

Для расчета цепей этим методом составляют столько частных схем, сколько независимых источников имеет исходная цепь, при этом в каждой частной схеме оставляют только один источник, все остальные исключают. При исключении идеальных источников напряжения вместо источника ставится короткозамкнутая перемычка, что соответствует ЭДС, равной нулю при нулевом внутреннем сопротивлении. Ветвь с источником тока, наоборот, размыкается, что соответствует нулевому току при нулевой проводимости. Результирующий ток в каждой ветви равен алгебраической сумме частичных токов, вызванных действием каждого источника в отдельности.

При расчете частных схем принято: токи, протекающие в ветвях, обозначать двумя индексами. Нижний индекс показывает номер ветви, в которой определяют ток, а верхний - номер источника, действием которого вызывается ток. Например,  $I_1^2$  - ток первой ветви, вызываемый действием второго источника.

Последовательность расчета цепи методом наложения:

а) поочередно рассматривают действие в цепи только одного источника

(ветви с источниками ЭДС замыкаются накоротко, но их внутреннее сопротивление учитывается; а ветви с источником тока разрываются, но их внутренняя проводимость учитывается в расчетах);

б) рассчитывают частичные токи в ветвях от действия каждого из источников в отдельности;

в) находят действительные токи ветвей, алгебраически суммируя все частичные токи.

Пример: Для схемы (рис.2.1) определить токи в ветвях при помощи законов Кирхгофа и методом наложения, если  $E_1=20\text{ В}$ ;  $E_2=15\text{ В}$ ;  $R_1=40\text{ Ом}$ ;  $R_2=35\text{ Ом}$ ;  $R_3=50\text{ Ом}$ . Внутренние сопротивления источников ЭДС равны 0.

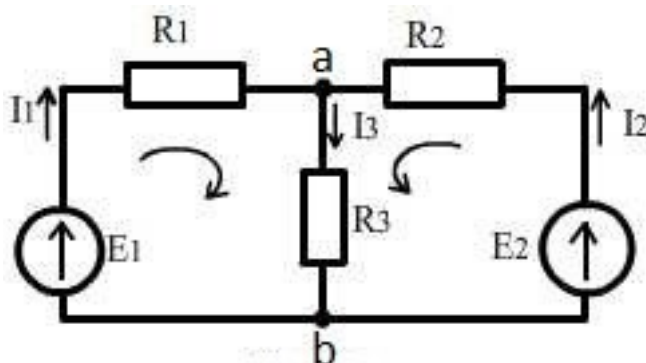


Рис. 2.1

а) при помощи законов Кирхгофа:

Анализ показывает, что схема содержит три ветви, два узла и два независимых контура. Обозначим направления токов в ветвях и направления обходов контуров на схеме. Тогда система уравнений будет иметь вид:

$$\begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ R_1 \cdot I_1 + R_3 \cdot I_3 = E_1 \\ R_2 \cdot I_2 + R_3 \cdot I_3 = E_2 \end{cases} \quad (2.4)$$

Решить эту систему можно с помощью пакета Matchcad:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ R_1 & 0 & R_3 \\ 0 & R_2 & R_3 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ E_1 \\ E_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.184 \\ 0.068 \\ 0.252 \end{bmatrix} \quad \begin{matrix} I_1 = 0.184\text{ A} \\ I_2 = 0.068\text{ A} \\ I_3 = 0.252\text{ A} \end{matrix}$$

б) метод наложения:

В сложной цепи, содержащей два источника, расчет распределения тока в ветвях по методу наложения сводится к наложению токов в двух простых (частных) схемах, содержащих по одному источнику (рис. 2.2 и 2.3). В первой

схеме действует только  $E_1$ , а во второй – только  $E_2$ .

Найдем частичные токи в схеме рис.2.2:

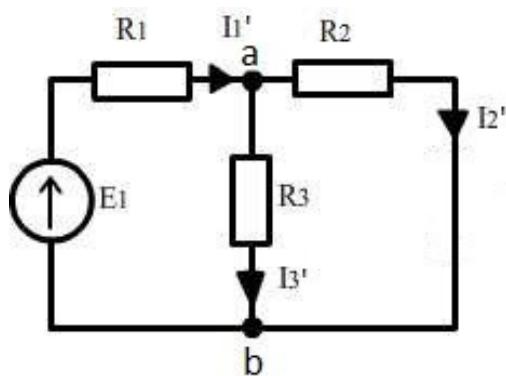


Рис.2.2

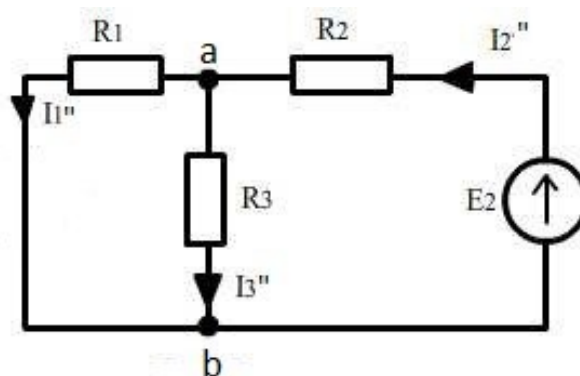


Рис.2.3

$$I_1^1 = \frac{E_1}{R_1 + \frac{R_2 \cdot R_3}{R_2 + R_3}} = \frac{20}{40 + \frac{35 \cdot 50}{35 + 50}} = 0.33 A$$

$$I_2^1 = I_1^1 \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} = 0.33 \cdot \frac{50}{35 + 50} = 0.194 A$$

$$I_3^1 = I_1^1 \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_3} = 0.33 \cdot \frac{35}{35 + 50} = 0.136 A$$

$$U_{ab}^1 = I_3^1 \cdot R_3 = 0.136 \cdot 50 = 6.79 B$$

Аналогично определяем частичные токи для схемы рис.2.3:

$$I_2^2 = \frac{E_2}{R_2 + \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3}} = \frac{15}{35 + \frac{40 \cdot 50}{40 + 50}} = 0.262 A$$

$$I_1^2 = I_2^2 \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} = 0.262 \cdot \frac{50}{40 + 50} = 0.146 A$$

$$I_3^2 = I_2^2 \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_3} = 0.262 \cdot \frac{40}{40 + 50} = 0.116 A$$

$$U_{ab}^2 = I_3^2 \cdot R_3 = 0.116 \cdot 50 = 5.82 B$$

Наложив частичные токи  $I_1^1; I_2^1; I_3^1$  и  $I_1^2; I_2^2; I_3^2$  в соответствующих ветвях друг на друга с учетом их направлений, получим действительные токи  $I_1, I_2, I_3$  заданной схемы (рис.2.1)

$$I_1 = I_1^1 - I_1^2 = 0.33 - 0.146 = 0.184 A$$

$$I_2 = I_2^2 - I_2^1 = 0.262 - 0.194 = 0.068 A$$

$$I_3 = I_3^1 + I_3^2 = 0.136 + 0.116 = 0.252 A$$

Полученный результат совпадает с результатом расчета с помощью законов Кирхгофа.

Точно также находятся напряжения на отдельных участках электрической цепи, например, напряжение на сопротивлении  $R_3$ :

$$U_{ab} = U_{ab}^1 + U_{ab}^2 = 6.79 + 5.82 = 12.61 \text{ В}$$

### Порядок выполнения работы

#### 1 Аналитическое исследование

1.1 Для схемы (рис.2.1) рассчитать токи в ветвях и напряжение  $U_{ab}$  при помощи законов Кирхгофа и методом наложения. Значения  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  задаются преподавателем. Внутренние сопротивления источников принять равными нулю.

1.2 Для измерения тока в ветвях и напряжения  $U_{ab}$  составить принципиальные электрические схемы и выбрать измерительные приборы.

#### 2. Экспериментальное исследование

2.1 По составленным по п. 1.2 принципиальным электрическим схемам собрать цепь:

- а) для измерения токов по законам Кирхгофа;
- б) для измерения токов по методу наложения;

2.2 Измерить токи и падения напряжения на резисторах по п.2.1, а) и результаты занести в таблицу 2.1

Таблица 2.1 – Законы Кирхгофа

	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$U_1$	$U_2$	$U_{ab}$
	А	А	А	В	В	В
Измерено						
Вычислено						

2.3 Измерить частичные токи и напряжение  $U_{ab}$  от каждого источника ЭДС в отдельности согласно п.2.1, б). Результаты занести в таблицу 2.2 и по измеренным частичным токам рассчитать действительные. При этом частичные токи, которые поменяли направление (указывает стрелка аналогового амперметра), должны быть отрицательными.



Таблица 2.2 – Метод наложения

	Параметры	E1	E2	U <sub>ab</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>
		В	В	В	А	А	А
Измерено	Частичные токи от E1						
	Частичные токи от E2						
	Действительные токи и U <sub>ab</sub>						
Вычислено	Частичные токи от E1						
	Частичные токи от E2						
	Действительные токи и U <sub>ab</sub>						

Контрольные вопросы:

- 1 Дать формулировку закона Ома и законов Кирхгофа.
- 2 Сущность расчета сложных цепей при помощи законов Кирхгофа. Последовательность расчета.
- 3 Сущность расчета сложных цепей методом наложения. Последовательность расчета.
- 4 Можно ли применить метод наложения при расчетах мощности?
- 5 Определить методом наложения токи в ветвях схемы (рис.2.1), если известно, что  $E_1 = K \text{ В}$ ;  $E_2 = L \text{ В}$ ;  $R_1 = R_2 = R_3 = 2 \text{ Ом}$ .
- 6 Определить методом наложения токи в ветвях схемы (рис.2.1), если дано:  $E_1 = 10 \text{ В}$ ;  $R_1 = R_2 = R_3 = 10 \text{ Ом}$ , а вместо  $E_2$  включен источник тока  $I \text{ А}$ .
- 7 Определить ЭДС источника тока  $J$  с внутренним сопротивлением  $R_{BH} = I \text{ Ом}$ , если он нагружен резистором с сопротивлением  $R_H = 20 \text{ Ом}$ , ток через который равен  $I_H = 5 \text{ А}$ .
- 8 Решить задачу пятого вопроса, поменяв полярности одного из источников на противоположную.
- 9 В чем преимущество метода наложения перед способом расчета цепей при помощи законов Кирхгофа?
- 10 Объяснить ход работы.

## Лабораторная работа №3

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПО МЕТОДУ ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА. ПОСТРОЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ДИАГРАММЫ

#### Цель работы:

Ознакомиться с методикой расчета электрических цепей по методу эквивалентного генератора и экспериментально убедиться в справедливости его применения. Получение навыков в построении потенциальной диаграммы.

#### Сведения из теории:

##### 1. Расчет цепи методом эквивалентного генератора

Одним из удобных расчетных приемов, когда необходимо определить ток в одной (выделенной) ветви, является метод эквивалентного генератора. Сущность метода заключается в следующем: выделяют расчетную ветвь, всю остальную часть схемы по отношению к зажимам расчетной ветви заменяют эквивалентным генератором с ЭДС, равной напряжению холостого хода на зажимах выделенной ветви, и внутренним сопротивлением, равным входному сопротивлению цепи со стороны зажимов расчетной ветви. Если расчетная ветвь содержит источники ЭДС, их целесообразно отнести к эквивалентному генератору.

Напряжение холостого хода  $U_x$  может быть измерено непосредственно вольтметром или соответствующим образом рассчитано. Входное сопротивление можно определить по данным измерения как

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_x}{I_{\text{кз}}} \quad (3.1)$$

где  $I_{\text{кз}}$  - ток исследуемой ветви в режиме короткого замыкания.

Поэтому метод эквивалентного генератора иногда называют методом проведения опытов холостого хода и короткого замыкания.

Для определения  $R_{\text{вх}}$  расчетным путем, необходимо выделенный активный двухполюсник превратить в пассивный, то есть все источники ЭДС закоротить, а источники тока удалить, но их внутренние сопротивления оставить в схеме. Далее, свернув схему по отношению к зажимам исследуемой ветви, определяют  $R_{\text{вх}}$ .

Ток исследуемой ветви определяют по закону Ома:

$$I = \frac{E_{\text{экв}}}{R_{\text{вх}} + R} = \frac{U_x}{R_{\text{вх}} + R} \quad (3.2)$$

Рассмотрим применение метода эквивалентного генератора в уже известной схеме (см. работу №2), представленной на рис.3.1, а)

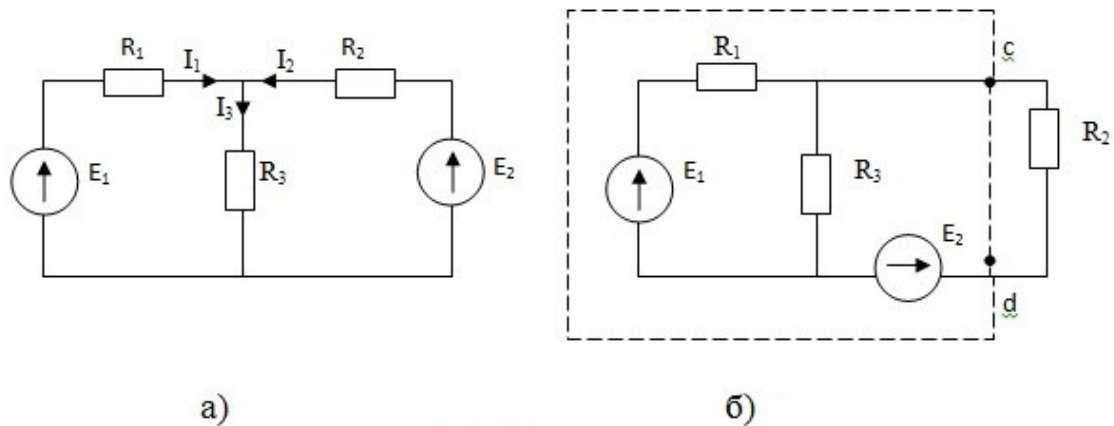


Рис.3.1

Пусть требуется, например, определить ток  $I_2$ . Выделим ветвь с сопротивлением  $R_2$ , остальную часть схемы, включая и ЭДС  $E_2$  исследуемой ветви представим в виде активного двухполюсника с полюсами (зажимами).

Заменим активный двухполюсник эквивалентным генератором с ЭДС  $E_{\text{э}2}$  и внутренним сопротивлением  $R_{\text{в}2}$  (рис. 3.2, а):

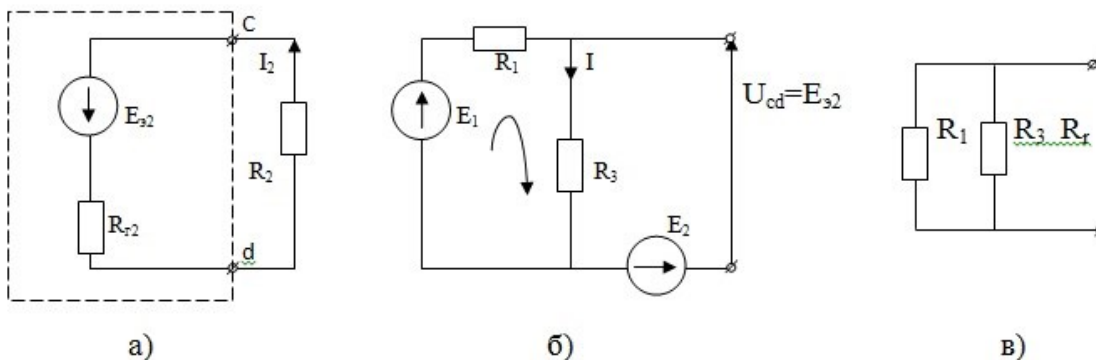


Рис.3.2

Для нахождения  $E_{\text{э}2}$  размыкаем исследуемую ветвь с  $R_2$  и находим напряжение холостого хода  $U_{\text{х}2} = U_{\text{cd}2} = E_{\text{э}2}$ , рис.3.2, б).

Тогда

$$I = \frac{E_1}{R_1 + R_3} \quad U_{\text{х}2} = E_{\text{э}2} = E_2 - I \cdot R_3 \quad (3.3)$$

Для нахождения  $R_{\text{ex}2}$ , закоротим источники ЭДС и найдем входное сопротивление пассивного двухполюсника  $R_{\text{ex}}$  относительно зажимов с и d, рис.3.2, в).

$$R_{\text{ex}2} = \frac{R_1 \cdot R_3}{R_1 + R_3} \quad (3.4)$$

Используя формулу (3.2) и подставляя найденные значения  $U_{x2}$  и  $R_{\text{ex}2}$ , находим ток исследуемой ветви:

$$I_2 = \frac{U_{x2}}{R_{\text{ex}2} + R_2} \quad (3.5)$$

Ток при коротком замыкании второй ветви определяется по формуле:

$$I_{\text{кз}2} = \frac{U_{x2}}{R_{\text{ex}2}} \quad (3.6)$$

## 2. Построение потенциальной диаграммы

Под потенциальной диаграммой понимают график распределения потенциала вдоль замкнутого контура в зависимости от сопротивлений этого контура (рис.3.3).

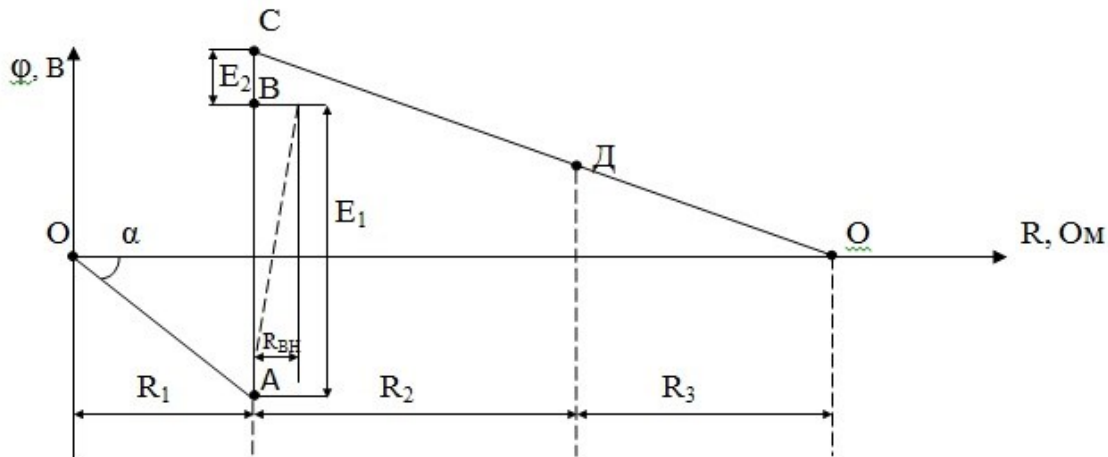


Рис. 3.3

При помощи потенциальной диаграммы можно определить ток в любом участке цепи, который пропорционален  $\text{tg}\alpha$ , а также напряжение между любыми точками электрической цепи как разницу потенциалов данных точек, например,

$$U_{AC} = \varphi_A - \varphi_C$$

Для построения потенциальной диаграммы какого-либо замкнутого контура, например, ОАВСДО на рис.3.4, необходимо:

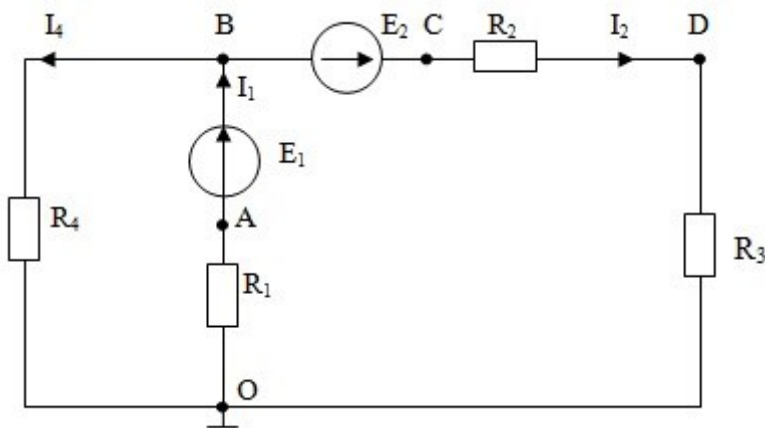


Рис. 3.4

а) рассчитать (или измерить) любым из известных методов токи в ветвях контура;

б) принять потенциал какой-либо точки равным нулю (заземлить) (на рис.3.4 это точка О);

в) рассчитать (или измерить) потенциалы всех точек;

г) отложить на оси абсцисс сопротивления элементов контура, а по оси ординат соответствующие им потенциалы. Соединив полученные точки ломаной линией, будем иметь потенциальную диаграмму контура. (Если в схеме использованы идеальные источники ЭДС, то падения на внутреннем сопротивлении источника не происходит и прямая, соединяющая, например, точки А и В для  $E_1$  будет параллельна оси ординат. При реальном источнике ЭДС происходит падение напряжения на внутреннем сопротивлении и линия уже не будет параллельна оси ординат, то есть будет иметь какой-то наклон, как это показано на рис.3.3 пунктирной линией.

### Порядок выполнения работы:

#### 1. Аналитическое исследование

1.1 Для схемы (рис.3.1, а) и заданных преподавателем величин  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  рассчитать токи в ветвях с  $R_1$  и  $R_2$  по методу эквивалентного генератора.

1.2 Для схемы (рис.3.4) и заданных преподавателем величин  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  и  $R_4$  рассчитать токи и потенциалы точек контура ОАВСДО и построить потенциальную диаграмму.

1.3 Для экспериментального подтверждения произведенных расчетов составить электрические схемы по п.1.1 и 1.2.

## 2. Экспериментальное исследование

2.1 Собрать схему для проверки метода эквивалентного генератора.

2.2 Провода, идущие к  $R_l$  переключить на вольтметр и измерить напряжение  $U_{xl}$  исследуемой ветви. Результат занести в таблицу 3.1.

2.3 Провода, идущие к  $R_l$  переключить на амперметр и измерить ток короткого замыкания  $I_{кзl}$  в исследуемой ветви. Результат занести в таблицу 3.1.

2.4 Рассчитать ток в ветви схемы на основании опытов холостого хода  $U_x$  и короткого замыкания  $I_{кз}$ . Результат занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Метод эквивалентного генератора

	Напряжение ХХ $U_x$	Ток КЗ $I_{кз}$	Ток ветви $I$
	В	А	А
Измерено			
Вычислено			

2.5 Собрать схему для проверки потенциальной диаграммы.

2.6 Измерить потенциалы всех точек относительно заземленной точки и токи в ветвях. Данные измерений внести в таблицу 3.2.

2.7 Рассчитать все сопротивления по результатам измерений и составить потенциальную диаграмму исследуемой цепи.

Таблица 3.2 – Потенциальная диаграмма

	$I_1$	$I_2$	$I_4$	$\varphi_A$	$\varphi_B$	$\varphi_C$	$\varphi_D$
	А	А	А	В	В	В	В
Измерено							
Вычислено							

### Дополнительные требования к содержанию отчета:

- 1 Занести данные аналитического расчета по п.1.1 в таблицу 3.1 и по п.1.2 в таблицу 3.2 и сравнить их с экспериментальными данными.
- 2 Сравнить расчетную и экспериментальную потенциальные диаграммы.

### Контрольные вопросы:

1. В чем сущность расчета цепей по методу эквивалентного генератора?

2. В диагональ электрического моста, состоящего из последовательно включенных резисторов  $R_1 \dots R_4$ , с сопротивлениями 10, 20, 30 и 40 Ом, включен резистор  $R_5$ , с сопротивлением 1 кОм. Определить ток через резистор  $R_5$ , если мост питается от источника ЭДС с напряжением 10 В.
3. Что такое потенциальная диаграмма?
4. Как по направлениям источника ЭДС и тока отличить источник от потребителя?
5. Как при помощи потенциальной диаграммы определить ток?
6. Как при помощи потенциальной диаграммы найти напряжение между двумя точками?
7. Как изменяется потенциал потребителя электрической энергии, обходя контур по направлению тока и встречно?
8. Как определить ЭДС и внутреннее сопротивление эквивалентного генератора?
9. Два генератора включены параллельно и работают на общую нагрузку. ЭДС генераторов и их внутреннее сопротивление соответственно равны  $E_1 = 10\text{ В}$ ;  $E_2 = 40\text{ В}$ ;  $R_{1BH} = 4\text{ Ом}$ ;  $R_{2BH} = 3\text{ Ом}$ . Найти: зависимость тока через нагрузку при изменении  $R_n$  от 0 до  $\infty$ ; ЭДС и внутреннее сопротивление эквивалентного генератора.
10. Построить потенциальную диаграмму для одноконтурной цепи (рис. 3.4), если  $E_1 = 10\text{ В}$ ,  $E_2 = 40\text{ В}$ ,  $R_1 = 4\text{ Ом}$ ,  $R_2 = 3\text{ Ом}$ ,  $R_3 = 7\text{ Ом}$ , а внутренние сопротивления источников  $R_{1BH} = R_{2BH} = 1\text{ Ом}$ .

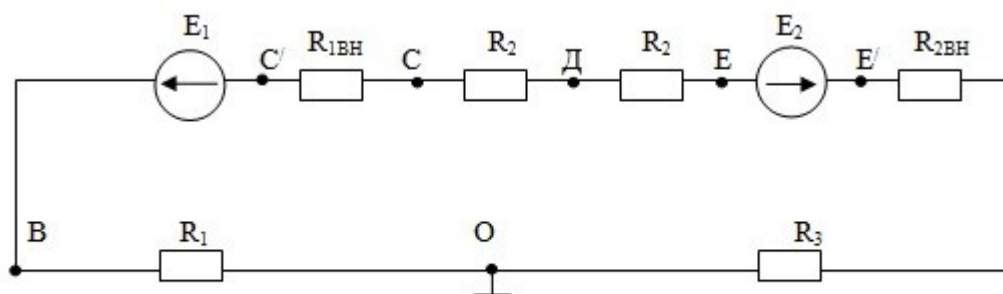


Рис.3.5

## Лабораторная работа №4

### ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

#### Цель работы:

Овладеть методом снятия вольтамперных характеристик нелинейных элементов. Определить опытным путем токораспределение в разветвленной нелинейной цепи с последующим графическим расчетом. Исследовать цепь с источником ЭДС и одним нелинейным сопротивлением методом эквивалентного генератора с последующим графическим расчетом.

#### Сведения из теории:

Электрическая цепь называется нелинейной, если в ней есть хотя один нелинейный элемент. Нелинейные элементы отличаются от линейных тем, что их сопротивление зависит от протекающего тока.

Примерами нелинейных элементов являются лампы накаливания, полупроводниковые диоды, тиристоры, транзисторы...

В расчетах с нелинейными элементами используется характеристика зависимости падения напряжения на элементе от тока в нем  $U(I)$ , которая называется вольтамперной характеристикой (ВАХ). ВАХ нелинейного элемента может быть построена по точкам, снятым экспериментально, или по аналитической зависимости.

Нелинейные резисторы характеризуются статистическим сопротивлением  $R_{cm} > 0$  и дифференциальным сопротивлением  $R_d$ , которое может быть отрицательным.

В режиме неизменного тока  $R_{cm}$  в какой-либо точке ВАХ нелинейного элемента определяется отношением напряжения к току в этой точке:

$$R_{cm} = \frac{U}{I} \quad (4.1)$$

Дифференциальное сопротивление в какой-либо точке ВАХ нелинейного элемента определяется как отношение бесконечно малого приращения напряжения  $dU$  в этой точке к соответствующему приращению тока  $dI$ .

$$R_d = \frac{dU}{dI} \quad (4.2)$$

Расчет нелинейных цепей производится или графическими, или аналитическими методами, основанными на решении уравнений Кирхгофа с



учетом ВАХ. Графический расчет может быть сделан при последовательном, параллельном и смешанном соединениях.

Примеры расчета цепей с нелинейными элементами:

1. Цепь состоит из двух последовательно соединенных нелинейных элементов. Требуется определить ток  $I$  в цепи, напряжения по участкам  $U_1$  и  $U_2$  при заданном входном напряжении  $U$ .

Известно, что последовательная цепь описывается вторым законом Кирхгофа:

$$U_1(I) + U_2(I) = U \quad (4.3)$$

В соответствии с этим уравнением складываются ВАХ двух нелинейных элементов (члены, стоящие слева знака равенства) и получаем ВАХ всей цепи. В точке пересечения ее с прямой  $U$  находим ток  $I$ , а затем напряжения  $U_1$  и  $U_2$ .

Если в цепи один нелинейный элемент, то всю линейную часть схемы можно заменить эквивалентным генератором ( $U_x, R_{ex}$ ) (рис.4.1).

$$U_{ab} = U_x - IR_{ex} = f(I) \quad (4.4)$$

Очевидно, что это напряжение на зажимах генератора является функцией тока нагрузки - прямая 3 на рис.4.2, и напряжение на зажимах нелинейного элемента - кривая 1 на рис.4.2. (ВАХ нелинейного элемента).

Абсцисса точки пересечения кривой 1 и прямой 3 представляет искомое напряжение  $U_{ab}$ , а ордината - искомый ток  $I$ .

Если эквивалентный генератор - идеальный источник напряжения ( $R_{ex}=0$ ), то искомый ток в цепи определяется ординатой точки  $n$ , которая найдется пересечением кривой 1 с прямой 2 (рис.4.2).

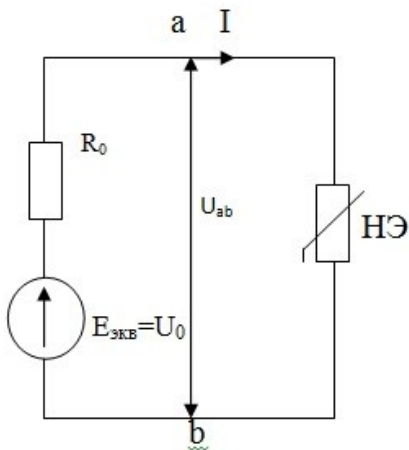


Рис. 4.1

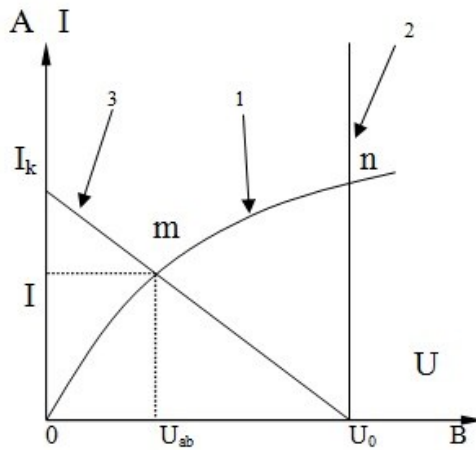


Рис. 4.2

## Порядок выполнения работы:

### 1. Аналитическое исследование

Нелинейные элементы, исследуемые в работе: лампа накаливания, диод.

1.1 Выбрать пределы приборов, используемых для снятия вольтамперных характеристик данных нелинейных элементов.

1.2 Зарисовать в отчете электрические схемы и таблицы необходимые для проведения эксперимента.

### 2. Экспериментальное исследование

2.1 Снять ВАХ лампы накаливания (Н), полупроводникового диода (VD) и линейного сопротивления (R). Для этого собрать схему по рис.4.3. Так как сопротивление диода мало при подаче на него прямого напряжения, то при снятии его ВАХ в схему нужно добавить последовательно с амперметром резистор.

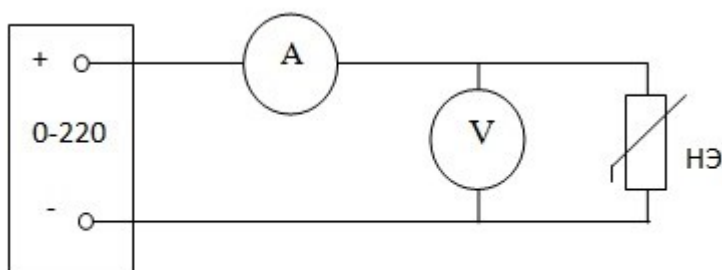


Рис.4.3

а) измерить ток  $I$  и напряжение  $U$  на нелинейном сопротивлении (6...8 точек). Данные измерений занести в таблицу 4.1;

Таблица 4.1 – Вольтамперные характеристики элементов

Лампа накаливания	Н	U, В	0	10	20	30	...	
		I, А	0					
Полупроводниковый диод	VD	U, В	0					
		I, А	0	0.1	0.2	0.3	...	
Линейное сопротивление	R	U, В	0	10	20	30	...	
		I, А	0					

б) пользуясь данными таблицы 4.1 построить ВАХ исследуемых элементов;

в) пользуясь ВАХ, найти для одной точки каждого нелинейного элемента статистическое и дифференциальное сопротивление.

2.2 Произвести опытное определение распределения токов в разветвленной цепи с тремя сопротивлениями. Для этого собрать схему по рис.4.4, в которую

включить элементы в соответствии с вариантом по таблице 4.2. Вариант задается преподавателем.

Таблица 4.2 – Варианты разветвленной цепи

Варианты	1 ветвь	2 ветвь	3 ветвь
1	VD	H	R
2	VD	R	H

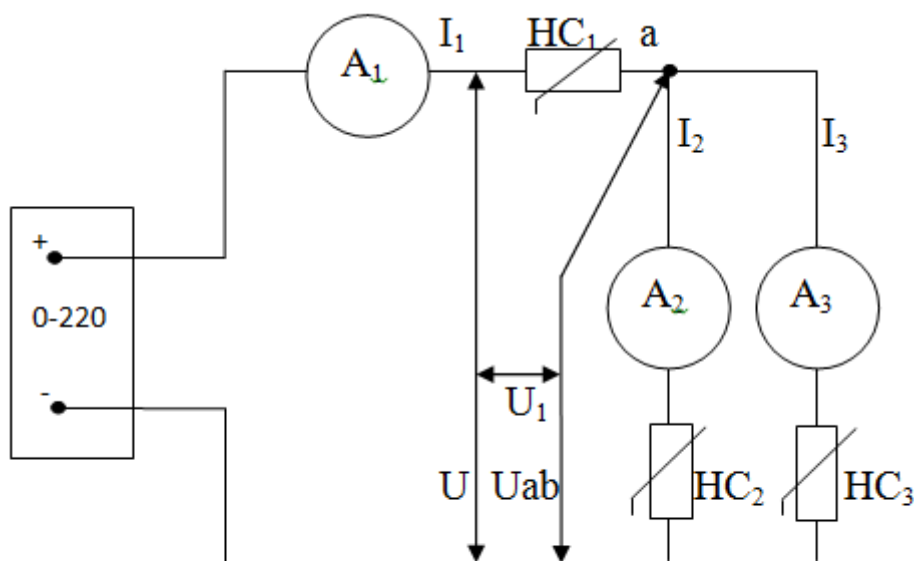


Рис.4.4

а) измерить все токи и напряжения, результат измерений запишите в таблицу 4.3

Таблица 4.3 – Разветвленная нелинейная цепь

	U	U <sub>1</sub>	U <sub>ав</sub>	I <sub>1</sub>	I <sub>2</sub>	I <sub>3</sub>
	В	В	В	А	А	А
Измерено						
Вычислено по ВАХ						
Погрешности $\Delta I\%$ , $\Delta U\%$						

б) пользуясь ВАХ нелинейных сопротивлений и значением  $U$ , произвести графическим методом расчет напряжений и токов в ветвях схемы (рис.4.4). Данные расчета занести в соответствующую строку таблицы 4.3.

в) произвести сравнение результатов, полученных опытным и расчетным путями, приняв за точные значения данные эксперимента:

$$\Delta I\% = \frac{I_{расч} - I_{экс}}{I_{экс}} \cdot 100\% \quad (4.5)$$

2.3 Для экспериментального изучения цепи по методу эквивалентного генератора с одним нелинейным сопротивлением собрать цепь по схеме рис.4.5.

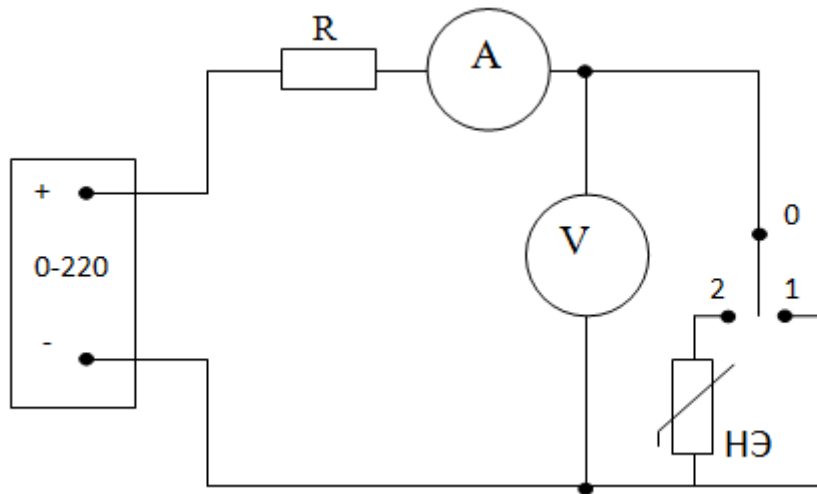


Рис. 4.5

а) при разомкнутой ветви с нелинейным сопротивлением (переключатель в положении 0) измерить  $U_x$  - напряжение холостого хода на нелинейном сопротивлении и записать в таблицу 4.4.

б) не изменяя положения рукоятки лабораторного автотрансформатора (ЛАТР), то есть при постоянстве входного напряжения, переключатель поставить в положение 1, измерить значение тока короткого замыкания  $I_K$  и записать в таблицу 4.4.

в) не изменяя положения рукоятки ЛАТРа, включить нелинейное сопротивление (переключить в положение 2), измерить и записать в таблицу 4.4 значения тока и напряжения на нелинейном элементе в рабочем режиме.

Таблица 4.4 – Метод эквивалентного генератора в нелинейных цепях

	$U_x$	$I_k$	$U_{нс}$	$I_{нс}$
	В	А	В	А
Измерено				
Вычислено по ВАХ				
Погрешности $\Delta I\%$ , $\Delta U\%$				

г) используя ВАХ нелинейного сопротивления и внешнюю характеристику источника, построенную по режимам ХХ и КЗ, определить графическим путем величины тока и напряжения в цепи и занести в таблицу 4.4.

д) произвести сравнение результатов, полученных опытным путем и расчетным, то есть определить погрешности тока и напряжения.

#### Контрольные вопросы:

1. Дать определение нелинейной электрической цепи постоянного тока.
2. Приведите примеры управляемых и неуправляемых нелинейных элементов.
3. Нарисуйте вольтамперные характеристики тиристора, транзистора, термистора, стабилизатора.
4. Области применения графических и аналитических методов расчета нелинейных цепей постоянного тока.
5. Объясните порядок анализа нелинейных цепей постоянного методом пересечения характеристик, применением метода эквивалентного генератора.
6. Дайте определение статистического и дифференциального сопротивления нелинейного элемента.
7. При каких условиях может быть применен аналитический метод анализа простейших нелинейных цепей и его основные положения?
8. Приведите примеры нелинейных элементов с симметричными и несимметричными ВАХ.
9. Приведите примеры нелинейных элементов с положительным и отрицательным сопротивлениями.
10. Почему нельзя применять метод наложения для расчета электрических цепей, содержащих нелинейные сопротивления?

## Лабораторная работа № 5

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЦЕПЕЙ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

#### Цель работы:

Экспериментально определить параметры линейных резисторов, катушки индуктивности и конденсаторов в цепи синусоидального тока. Проверить выполнение законов Ома и Кирхгофа в условиях последовательной и разветвленной цепей.

#### Сведения из теории:

Активное сопротивление  $R$  – параметр схемы замещения реального элемента электрической цепи, характеризующей процессы преобразования электрической энергии в тепловую. Резистор, преобразующий электрическую энергию в тепловую, имеет активное сопротивление:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{P}{I^2} \quad (5.1)$$

где  $U$  - действующее значение напряжения, В;  
 $I$  - действующее значение тока, А;  
 $P$  – активная мощность, Вт.

Индуктивность  $L$  - параметр схемы замещения реального элемента электрической цепи, характеризующий способность его накапливать энергию в магнитном поле. Сопротивление индуктивного элемента синусоидальному току пропорционально частоте:

$$X_L = \omega L \quad (5.2)$$

где  $\omega$  – угловая частота синусоидального тока, рад/с.

$$\omega = 2\pi f \quad (5.3)$$

Для постоянного тока  $\omega=0$  сопротивление  $X_L=0$

Катушка индуктивности обладает индуктивным и активным сопротивлением, которые на схеме замещения могут быть соединены последовательно. Комплексное сопротивление катушки индуктивности:

$$\underline{Z} = R_L + jX_L = Ze^{j\varphi}$$

$$; Z = \sqrt{R_L^2 + X_L^2} \quad \varphi = \frac{\arctg(X_L)}{R_L} \quad (5.4)$$

Активная мощность катушки связана с потерями энергии на нагрев провода.

Измерить параметры катушки можно с помощью измерительного моста переменного тока, а также косвенным методом (как это делается в лабораторной работе) по показаниям вольтметра  $U$ , амперметра  $I$  и ваттметра  $P$ , измеряющего активную мощность:

$$Z = \frac{U}{I} \quad R_L = \frac{P}{I^2} \quad X_L = \sqrt{Z^2 - R_L^2} \quad L = \frac{X_L}{\omega} \quad (5.5)$$

Емкость  $C$  – параметр схемы замещения реального элемента электрической цепи, характеризующий способность накапливать энергию в электростатическом поле. Сопротивление емкостного элемента синусоидальному току обратно пропорционально частоте

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (5.6)$$

Для постоянного тока:  $X_C = \infty$ .

Конденсатор обладает емкостным и активным сопротивлением, поскольку потери активной энергии в конденсаторе малы, то его схема замещения часто содержит лишь один элемент  $C$ . Комплексное сопротивление конденсатора:

$$\underline{Z} = R_C - jX_C = Ze^{-j\varphi} \quad Z = \sqrt{R_C^2 + X_C^2} \quad \varphi = \arctg \frac{X_C}{R_C} \quad (5.7)$$

Измерить параметры  $RC$ -цепи можно, используя метод амперметра-вольтметра-ваттметра, описанный выше.

Индуктивность и емкость называют реактивными элементами.

Векторные диаграммы последовательных активно-индуктивной и активно-емкостной цепей изображены на рис.1.6.1 а), б).

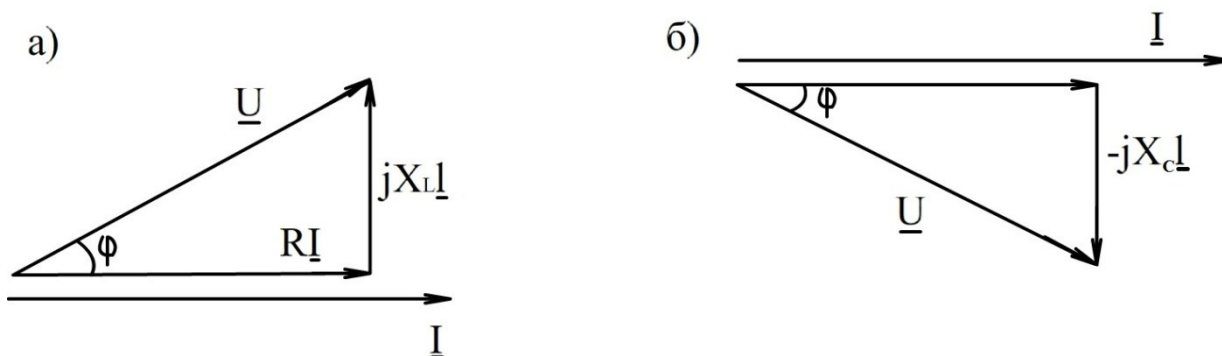


Рис. 5.1

Последовательное соединение элементов характеризуется тем, что через все элементы проходит один и тот же ток, параллельное - тем, что все элементы имеют одно и то же напряжение.

В случае последовательного соединения сопротивлений общее сопротивление цепи может быть получено с помощью второго закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{U}_0 &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 = \underline{I}(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2) = \underline{I}\underline{Z}_0 \\ \underline{Z}_0 &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 = R_1 \pm jX_1 + R_2 \pm jX_2 = R_0 \pm jX_0 \end{aligned} \quad (5.8)$$

где знак (+) относится к индуктивному, а знак (-) - к емкостному сопротивлению.

При параллельном соединении проводимостей  $\underline{Y}_1$  и  $\underline{Y}_2$  общая проводимость  $\underline{Y}_0$  находится с помощью первого закона Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \underline{I}_0 &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \underline{U}(\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2) = \underline{U}\underline{Y}_0 \\ \underline{Y}_0 &= \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = g_1 \pm jb_1 + g_2 \pm jb_2 = g_0 \pm jb_0 \end{aligned} \quad (5.9)$$

где знак (+) относится к емкостной, а знак (-) - к индуктивной проводимости.

Активная и реактивная мощности в последовательной цепи определяются формулами:

$$\begin{aligned} P_0 &= I^2 R \\ Q_0 &= I^2 (\pm X_0) \end{aligned} \quad (5.10)$$

а в параллельной цепи -

$$\begin{aligned} P_0 &= U^2 g_0 \\ Q_0 &= U^2 (\pm b_0) \end{aligned} \quad (5.11)$$

Комплекс полной мощности равен:

$$\begin{aligned} \underline{S}_0 &= \underline{U}\underline{I}^* = P_0 + jQ_0 \\ S_0 &= \sqrt{P_0^2 + Q_0^2} \end{aligned} \quad (5.12)$$



где  $I^*$  - сопряженный комплекс тока.

Знак (+) присваивается реактивной мощности  $Q_L$ , выделяющейся в результате образования магнитного поля индуктивности, а для  $Q_C$ , выделяющийся в результате образования электростатического поля конденсатора знак (-).

### Порядок выполнения работы:

#### 1. Определить параметры активных и реактивных элементов цепи

1.1 Собрать цепь, изображенную на рис.5.2.

1.2 Поочередно подключая резистор, емкость и индуктивность, снять показания приборов, рассчитать параметры элементов, занести их в таблицу 5.1 и сопоставить со значениями, отмеченными на стенде.

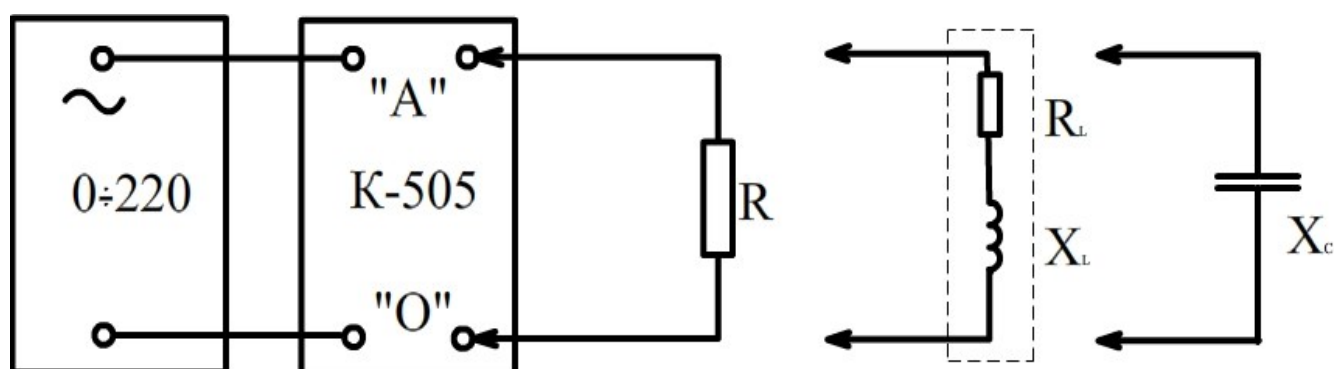


Рис. 5.2

Таблица 5.1 – Измерение параметров реактивных элементов

	Измерено			Вычислено						
	U	I	P	R	$R_L$	$X_L$	L	$R_C$	$X_C$	C
	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	Ом	Ом	мкФ
Резистор					-	-	-	-	-	-
Емкость				-	-	-	-			
Индуктивность				-				-	-	-

#### 2. Исследовать последовательное соединение активного и реактивных элементов цепи

2.1. Собрать цепь, изображенную на рис.5.2. Для измерений использовать комплект К-505 и 3 вольтметра электромагнитной системы, имеющих на стенде.

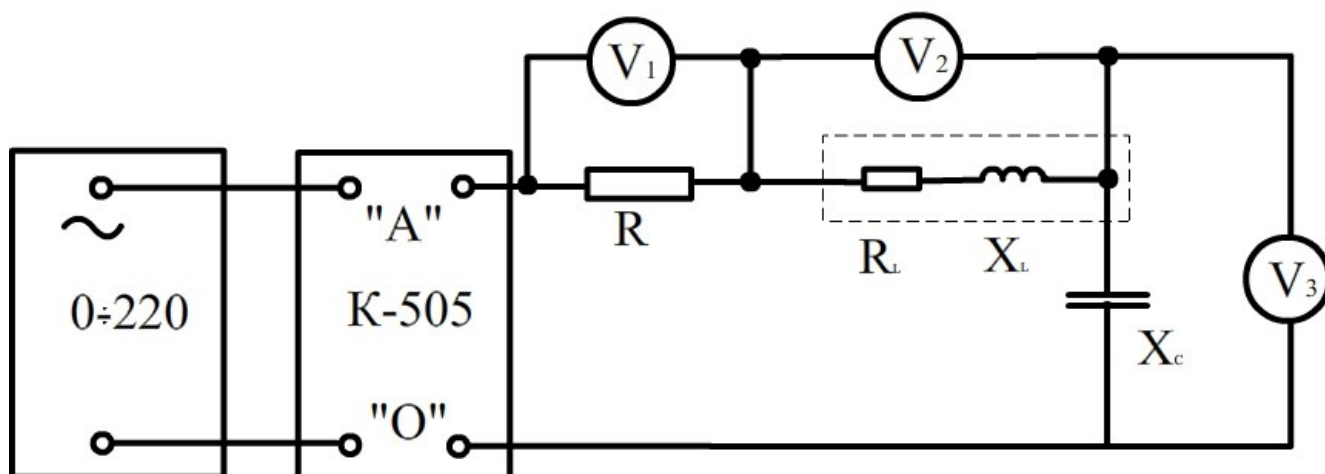


Рис. 5.3

2.2 Снять показания приборов, рассчитать сопротивления последовательно соединенных элементов. Данные измерения и расчета внести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Последовательное соединение

Измерено						Вычислено							
U	$I_0$	P	$U_R$	$U_L$	$U_C$	R	$R_L$	$X_L$	$X_C$	$R_0$	$X_0$	$Z_0$	$\varphi_0$
В	А	Вт	В	В	В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	град.

2.3 На основании замеренных величин составить векторную диаграмму для последовательно соединенных элементов и убедиться в правильности второго закона Кирхгофа.

### 3. Исследовать параллельное соединение элементов

3.1 Собрать цепь, изображенную на рис.5.4. Для измерений использовать комплект К-505 и 3 амперметра электромагнитной системы, имеющих на стенде.

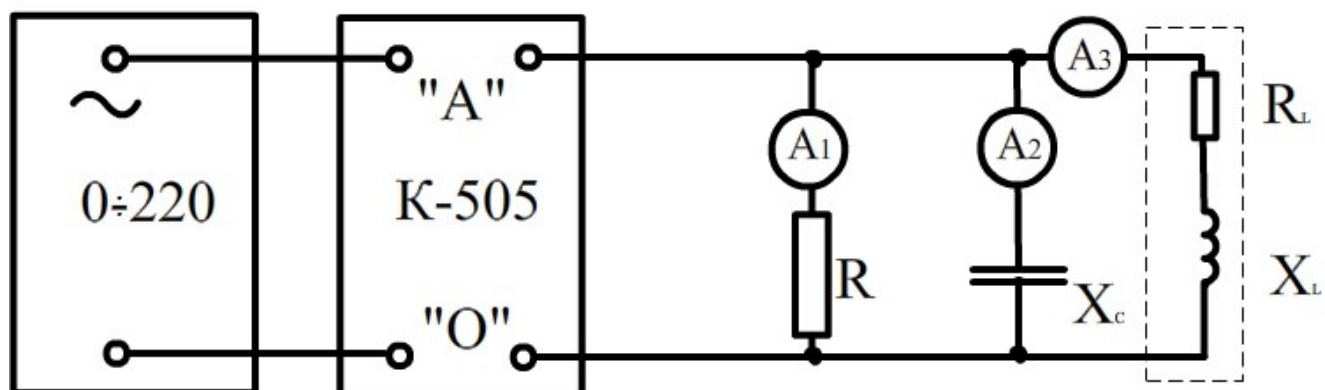


Рис. 5.4

3.2 Снять показания приборов. Рассчитать проводимости параллельно соединенных элементов. Данные измерения и расчета внести в таблицу 5.3.

Таблица 5.3 – Параллельное соединение

Измерено						Вычислено							
U	I <sub>0</sub>	P	I <sub>R</sub>	I <sub>C</sub>	I <sub>L</sub>	g <sub>R</sub>	g <sub>L</sub>	b <sub>L</sub>	b <sub>C</sub>	Y <sub>0</sub>	b <sub>0</sub>	g <sub>0</sub>	φ <sub>0</sub>
В	А	Вт	А	А	А	См	См	См	См	См	См	См	град

3.3 На основании замеренных величин составить векторную диаграмму для параллельно соединенных элементов и убедиться в правильности первого закона Кирхгофа.

Дополнительные требования к содержанию отчета:

1. В выводах указать особенности реальных элементов цепей и их схем замещения.
2. Построить для последовательной схемы треугольники сопротивлений и мощностей, для параллельной – треугольники проводимостей и мощностей.

Контрольные вопросы:

1. Что такое активное сопротивление, индуктивность и емкость?
2. Какими параметрами обладают резистор, катушка индуктивности и конденсатор?
3. Методы измерения параметров реактивных элементов.
4. Определение сопротивлений переменному току катушки индуктивности и конденсатора.
5. Чему равно сопротивление индуктивности и емкости в режиме постоянного тока и в режиме  $\omega \rightarrow \infty$ ?
6. Ток задан в комплексной форме  $I = Ie^{j\varphi}$ . Написать зависимость и построить график мгновенного значения тока.
7. Какова схема замещения потребителя, если ток и напряжение заданы выражениями?  
 $u = U \sin(314t - 30^\circ); \quad i = I \sin(314t + 60^\circ)$
8. Какие величины (ток, напряжение) одинаковы при последовательном и параллельном соединениях элементов.
9. Законы Кирхгофа для последовательного и параллельного соединений элементов.
10. Полное сопротивление последовательной цепи и полная проводимость параллельной цепи.
11. Активная, реактивная и полная мощности цепи.
12. Измерение сдвига по фазе между током и напряжением потребителя.
13. Связь напряжений  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  последовательно соединенных элементов с входным напряжением.

14. Связь токов  $I_R$ ,  $I_L$ ,  $I_C$  в параллельно соединенных элементах с током в неразветвленной части цепи.
15. Эквивалентное преобразование параллельной цепи в последовательную.

## Лабораторная работа № 6

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ В ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

#### Цель работы:

Изучение и экспериментальное исследование явления резонанса напряжений.

#### Сведения из теории:

Резонансом называется такой режим работы цепи, при котором входной ток совпадает по фазе с входным напряжением, несмотря на наличие в цепи реактивных сопротивлений.

Резонанс, возникающий в цепи с последовательным соединением приемников, объясняется взаимной компенсацией индуктивного и емкостного напряжений и называется резонансом напряжения.

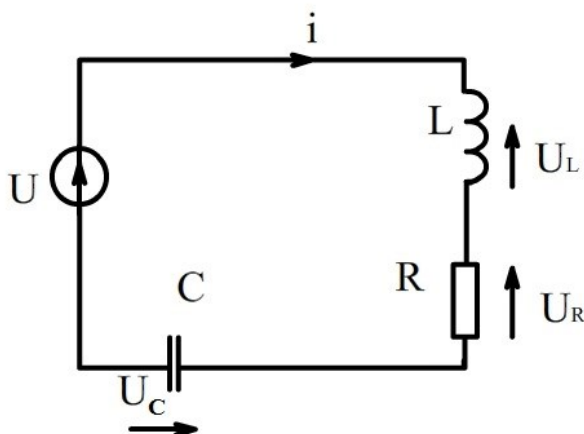


Рис. 6.1

Если к цепи, изображенной на рис.6.1, приложено синусоидальное напряжение  $u = U_m \sin(\omega t)$ , то мгновенное значение тока равно:

$$i = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + \left(\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}\right)^2}} \cdot \sin \omega \cdot t = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (6.1)$$

где

$$\varphi = \arctg \frac{X}{R} \quad (6.2)$$

$$X = \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C}$$

Очевидно, что ток будет совпадать по фазе с приложенным напряжением при условии

$$\omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} = 0 \quad (6.3)$$

Таким образом, при резонансе напряжений сопротивление цепи носит чисто активный характер и достигает своего минимального значения.

Амплитуда тока достигает при этом наибольшего значения.

Из формулы (6.3) следует, что резонанса напряжений можно достигнуть, изменяя или частоту, или индуктивность, или емкость.

При резонансе падения напряжения на индуктивности и емкости равны между собой и могут превышать напряжение, приложенное к цепи, если волновое сопротивление контура  $\rho$  больше его активного сопротивления.

$$\rho = \sqrt{L/C} > R \quad (6.4)$$

#### Порядок выполнения работы:

##### 1. Аналитическое исследование

Параметры катушки, используемой в работе:

$$L=0.1 \text{ Гн} \quad R_K=5 \text{ Ом}, \quad U=15 \text{ В}$$

1.1 Рассчитать: полное сопротивление; величину емкости конденсатора при резонансе; падения напряжения на конденсаторе, катушке индуктивности и активном сопротивлении при резонансе; ток при резонансе.

1.2 Выбрать измерительные приборы для исследования резонанса напряжений, начертить в отчете схемы и таблицы для эксперимента.

Данные аналитического исследования занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Аналитическое исследование резонанса напряжений

$R_K$	$L_K$	$X_L$	$Z_K$	$X_{\text{Срез}}$	$C_{\text{рез}}$	$I_{\text{рез}}$	$U_{R_{\text{рез}}}$	$U_{C_{\text{рез}}}$	$U_{L_{\text{рез}}}$
Ом	Гн	Ом	Ом	Ом	мкФ	А	В	В	В

## 2. Экспериментальное исследование

2.1 Измерение параметров индуктивной катушки при помощи амперметра, вольтметра, ваттметра.

а) для измерения параметров катушки собрать схему рис.6.2

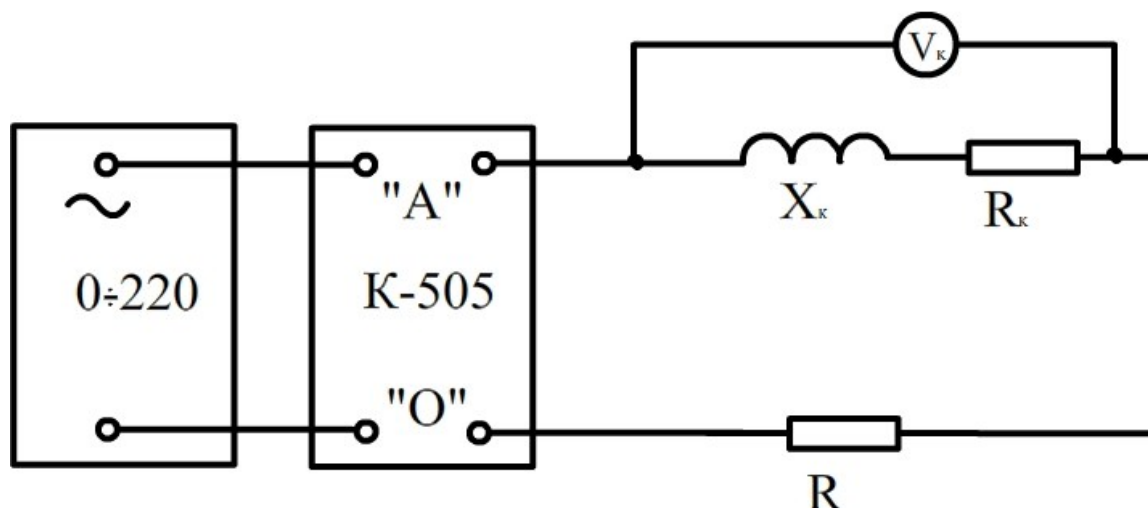


Рис. 6.2

б) данные опыта и расчета занести в таблицу 6.2

Таблица 6.2 - Параметры катушки

Измерено				Вычислено					
U	U <sub>к</sub>	I	P	Z	R <sub>к</sub>	X <sub>к</sub>	L	Z <sub>к</sub>	C <sub>рез</sub>
В	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн	Ом	мкФ

в) данные расчета таблицы 6.2 сравнить с данными аналитического расчета таблицы 6.1.

## 2.2 Исследование цепи рис.6.3 при изменении емкости

а) напряжение сети поддерживать 15 В;

б) снять показания при 7...9 различных значениях емкости, причем 3...4 из них при  $C < C_{рез}$  и столько же при  $C > C_{рез}$ ;

в) результаты измерений внести в таблицу 6.3.

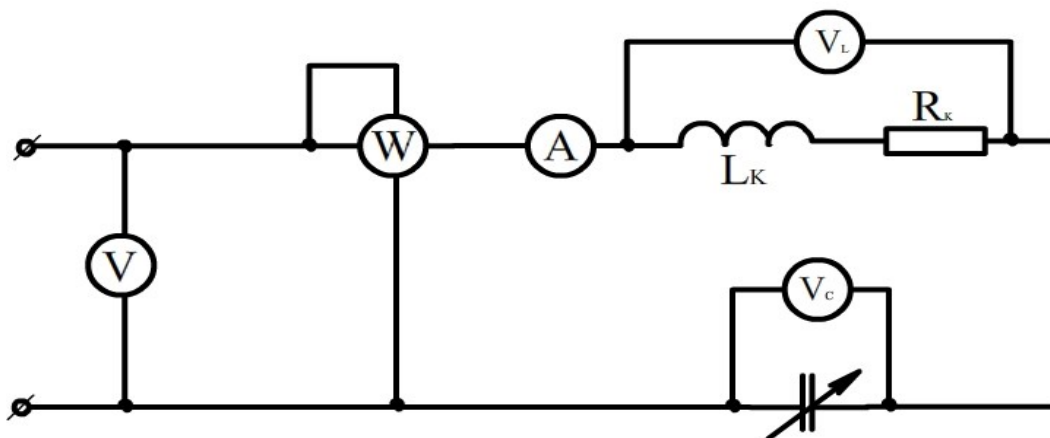


Рис. 6.3

Таблица 6.3 – Исследование резонанса напряжений

Измерено					Вычислено									
$U_0$	$I$	$P$	$U_K$	$U_C$	$Z$	$X_C$	$C$	$Z_K$	$R_K$	$X_K$	$L$	$\cos\varphi_K$	$\cos\varphi$	$\varphi$
В	А	Вт	В	В	Ом	Ом	мкФ	Ом	Ом	Ом	Гн	-	-	град.

Дополнительные требования к содержанию отчета:

1. Построить кривые  $I$ ,  $U_C$ ,  $U_K$ ,  $P$ ,  $\varphi$  по данным опыта и расчета в функции емкости.
2. Построить по опытным данным векторные диаграммы для трех значений емкости, соответствующих  $\varphi > 0$ ,  $\varphi = 0$  и  $\varphi < 0$ .

Контрольные вопросы:

1. Сформулируйте понятия мгновенного, амплитудного, среднего и действующего значений синусоидального тока.
2. Что называется, периодом, частотой, угловой частотой, начальной фазой, сдвигом фаз?
3. Напишите выражение для мгновенного значения тока в цепи, состоящей из соединенных последовательно элементов  $R$  и  $L$ , если к зажимам цепи приложено напряжение  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$ .
4. Условия возникновения резонанса напряжений и способы его достижения. Векторная диаграмма.
5. Комплексный (символический) метод расчета электрических цепей синусоидального тока.

6. От чего зависит коэффициент мощности ( $\cos\varphi$ ) и для чего стремятся его повысить?
7. Какова связь напряжений  $U_R$ ,  $U_L$ ,  $U_C$  последовательно соединенных элементов с напряжением на зажимах цепи?
8. Как измерить сдвиг по фазе между током и напряжением потребителя?
9. Каким образом экспериментально определить резонансный режим в последовательной цепи?
10. В чем заключается польза и вред резонанса напряжений?



## Лабораторная работа №7

### ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА В ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

#### Цель работы:

Изучение и экспериментальное исследование явления резонанса токов, а также вопроса улучшения коэффициента мощности.

#### Сведения из теории:

Явление резонанса в двухполюснике (рис. 7.1), содержащем параллельные ветви, называется резонансом токов. Резонанс токов характеризуется тем, что токи в ветвях, имеющих разноименные реактивные элементы, могут значительно превысить ток питания двухполюсника.

Резонансная цепь называется резонансным контуром.

Резонанс токов возникает при условии  $\varphi = 0$ , что равносильно

$$b = b_L + b_C = 0 \quad (7.1)$$

где

$\varphi$  - угол сдвига фазы между током и напряжением двухполюсника, град.:

$b$  - реактивная проводимость двухполюсника, См;

$b_L, b_C$  - реактивные проводимости ветвей, содержащих разноименные реактивные элементы соответственно,

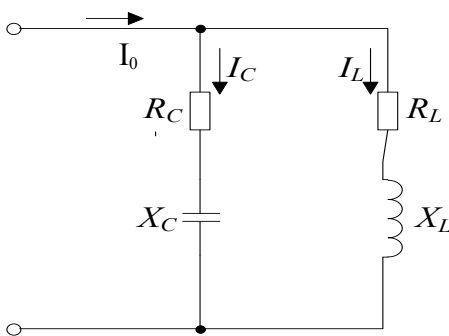


Рис. 7.1

Подставляя в уравнение (7.1) значения проводимости ветвей, получаем:

$$\frac{\omega L}{R_L^2 + (\omega L)^2} = \frac{-\frac{1}{\omega C}}{R_C^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (7.2)$$

откуда определяем резонансную угловую частоту:

$$\omega_p = \frac{\sqrt{(\rho^2 - R_L^2)/(\rho^2 - R_C^2)}}{\sqrt{LC}} = \omega_p \cdot \sqrt{\frac{(\rho^2 - R_L^2)}{(\rho^2 - R_C^2)}} \quad (7.3)$$

где  $\rho = \sqrt{L/C}$  - волновое сопротивление контура, Ом;

$\omega_p' = 1/\sqrt{LC}$  - угловая частота идеального резонансного контура, рад/с.

Как следует из уравнения (7.3), резонанс в параллельном контуре получим путем изменения или емкости  $C$ , или индуктивности  $L$ , или частоты  $\omega$ . Существенную роль в данном случае играют активные сопротивления ветвей  $R_L$  и  $R_C$ .

Резонанс возможен если оба сопротивления  $R_C$  и  $R_L$  больше, или оба меньше волнового сопротивления. При  $R_C = R_L = \rho$  резонанс возможен при любой частоте, так как в этом случае эквивалентное сопротивление контура становится активным для любой частоты и равным:

$$\underline{Z} = (\underline{Z}_L \underline{Z}_C) / (\underline{Z}_L + \underline{Z}_C) = \sqrt{L/C} = \rho \quad (7.4)$$

Сопротивление идеального параллельного контура, когда  $R_C = R_L = 0$  равно бесконечности, то есть  $Z = \infty$

На рис.7.2, а) показаны амплитудно-частотные характеристики идеального параллельного контура, а на рис.7.2, б) представлена реальная характеристика.

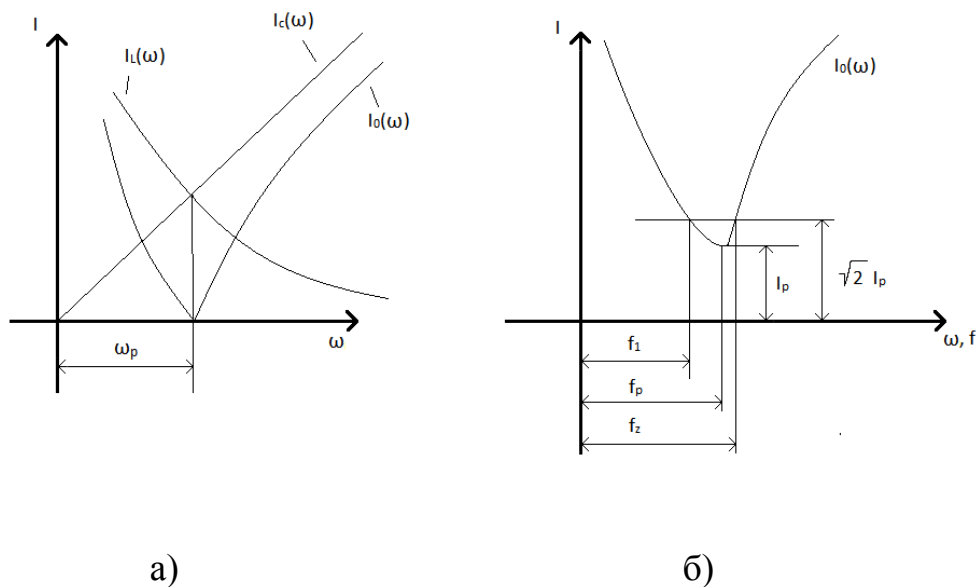


Рис. 7.2

Интервал частот  $\Delta f = f_2 - f_1$  называется полосой задерживания. Чем меньше активные потери контура, тем выше его добротность  $q$ , тем меньше полоса задерживания. Добротность можно определить по формуле:

$$q = f_p / (f_2 - f_1) \quad (7.5)$$

где  $f_p$  - резонансная частота, Гц.

Главное применение резонансных явлений - радиосвязь. Применение резонансного контура, настроенного на частоту радиостанции, позволяет выделить слабый ее сигнал из множества других.

Параллельное подсоединение конденсаторов применяется и для улучшения  $\cos\varphi$  энергетических установок, обладающих индуктивным характером нагрузки.

Коэффициент мощности потребителя показывает, какая часть полной мощности связана с преобразованием электрической энергии в другие виды энергии (тепловую, механическую, химическую...).

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} \quad (7.6)$$

Повышение  $\cos\varphi$  позволяет уменьшить реактивную мощность, вызывающую дополнительные потери в линиях передач и источниках. Если  $\cos\varphi_L$  - коэффициент мощности потребителя с активной мощностью  $P$ , то величина емкости конденсатора, который необходимо подключить для достижения требуемого  $\cos\varphi$  при напряжении  $U$ , равна:

$$C = P(\operatorname{tg}\varphi_L - \operatorname{tg}\varphi) / \omega U^2 \quad (7.7)$$

#### Порядок выполнения работы:

##### 1. Исследовать резонанс токов при изменении емкости

1.1 Собрать цепь, изображенную на рис.7.3. В качестве элементов использовать магазин емкостей, катушку индуктивности, а также два амперметра с пределами до 1А, клеммы которых размещены на панели стенда.

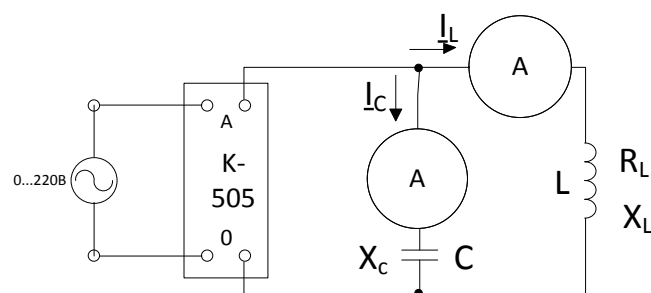


Рис. 7.3

1.2 Подать питание. Напряжение питания установить 25 В.

1.3 Путем изменения емкости  $C$  установить режим резонанса токов. Резонанс определить по минимуму тока питания.

1.4 Выполнить измерения, указанные в таблице 7.1, по четыре точки в обе стороны от резонанса.

2. Исследовать возможности улучшения коэффициента мощности цепи, обладающей индуктивным характером

2.1 Замерить и рассчитать параметры  $L$ ,  $R_L$  и  $\cos\varphi_L$  катушки индуктивности (рис.7.3).

2.2 Рассчитать емкость  $C$ , необходимую для доведения коэффициента мощности, до величины  $\cos\varphi = 0,8$ .

2.3 Проверить результаты расчета экспериментально. Для опыта использовать цепь, изображенную на рис.7.3 и снять показания приборов при расчетном значении емкости. Убедиться в правильности расчета. Результаты измерений и расчетов свести в таблицу 7.1

Таблица 7.1 – Исследование резонанса токов изменением емкости

Измерено					Вычислено			
$U_0$	$I_0$	$P_0$	$I_L$	$I_C$	$g_0$	$b_0$	$Y_0$	$\cos\varphi$
В	А	Вт	А	А	См	См	См	-

3. Исследовать резонанс при изменении частоты

3.1 Собрать цепь, изображенную на рис.7.4. При этом применить ту же катушку индуктивности  $L$ , что и в предыдущем опыте, а емкость конденсатора установить, равную  $2\text{ мкФ}$ . В качестве  $R_D$  применить переменный резистор на  $68\text{ Ом}$ .

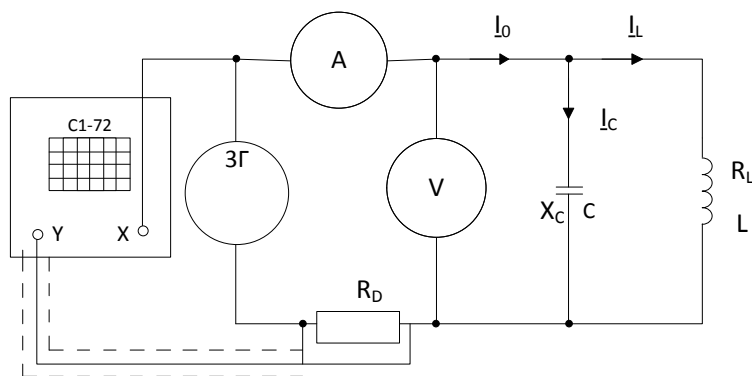


Рис.7.4

3.2 Снять частотную характеристику резонансного контура. Для этого меняя частоту звукового генератора (ЗГ) в пределах от 100 до 1000 Гц, поддерживая неизменным напряжение питания контура 2 В, снять показания приборов и занести их в таблицу 7.2.

Резонанс токов фиксировать по минимуму тока  $I_0$  и по осциллографу (эллипс переходит в наклонную прямую линию). Снять показания амперметра для четырех значений частоты до и четырех – после резонанса.

Найти два значения частоты  $f_1 < f_p$  и  $f_2 > f_p$ , при которых ток:  $I_0 = \sqrt{2} I_p$

где  $f_p$  - резонансная частота;

$I_p$  - ток питания во время резонанса.

Полученные значения занести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 – Исследование резонанса токов изменением частоты

Измерено					Вычислено	
$f$	$U_0$	$I_0$	$f_1$	$f_2$	$\Delta f$	q
Гц	В	мА	Гц	Гц	Гц	-

Дополнительные требования к содержанию отчета:

1. Построить зависимости  $I_0(\omega C)$ ,  $I_L(\omega C)$ ,  $I_C(\omega C)$ ,  $\phi(\omega C)$  для опытов п. 1.
2. Построить амплитудно-частотную характеристику контура для опытов п.3.
3. Построить векторные диаграммы для резонансного режима и двух других значений параметров до и после резонанса, взятых из таблицы 7.1.

### Контрольные вопросы:

1. В чем заключается явление резонанса токов?
2. Изменением каких величин можно добиться резонанса токов?
3. Какое значение тока в параллельном контуре при резонансе?
4. Что называется волновой проводимостью и добротностью цепи?
5. Как можно изменить добротность контура?
6. Как по частотной характеристике определить полосу задерживания контура?
7. От каких величин зависит величина задерживания контура?
8. Использование резонансных режимов в фильтрах.
9. Как влияет активное сопротивление ветви на резонанс токов?
10. При каких условиях контур резонирует при всех частотах?
11. Чем отличается коэффициент полезного действия от коэффициента мощности?
12. Как улучшить  $\cos\varphi$ ?

## Лабораторная работа № 8

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ С ВЗАИМОИНДУКЦИЕЙ

#### Цель работы:

Экспериментально изучить влияние взаимной индукции на работу цепей синусоидального тока; определить взаимную индуктивность двух катушек, эквивалентные параметры различных способов соединения индуктивно-связанных катушек, а также характеристики трансформатора.

#### Сведения из теории:

Если изменение тока в индуктивном элементе одного контура вызывает появление ЭДС в индуктивном элементе другого контура, то такие элементы называются магнитно-связанными, а наведенная ЭДС называется ЭДС взаимной индукции.

Степень индуктивной связи двух элементов характеризуется коэффициентом связи  $K$ :

$$K = M / \sqrt{L_1 L_2} \quad (8.1)$$

где  $M$  – взаимная индуктивность элементов цепи, Гн;

$L_1$  и  $L_2$  – индуктивность этих элементов, Гн.

Взаимная индуктивность – параметр элементов схемы замещения. Она характеризует свойство первого элемента с током  $i_1$  создавать магнитное поле, частично пронизывающее витки  $\omega_2$  второго элемента. Потокосцепление второго элемента, обусловленного током первого элемента, принято обозначать  $\Psi_{21}$ ; аналогично обозначают потокосцепление первого элемента, обусловленного током второго  $\Psi_{12}$ .

Взаимная индуктивность является скалярной величиной, которая равна отношению потокосцепления взаимной индукции одного элемента к току в другом элементе, обуславливающему это потокосцепление.

$$M = M_{21} = \Psi_{21} / i_1 \quad (8.2)$$

Аналогично:

$$M = \Psi_{12} / i_2 \quad (8.3)$$

Так как энергия магнитного поля системы не зависит от последовательности включения двух катушек, то:

$$M = M_{21} = M_{12} \quad (8.4)$$

При анализе таких цепей для составления уровней электрического состояния схем замещения необходимо знать, как направлены по отношению друг к другу магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции. Для этого прибегают к разметке зажимов элементов цепи с магнитной связью.

В качестве примера на рис.8.1 приведена схема двух последовательно соединенных катушек с магнитной связью при согласном (а) и встречном (б) включении.

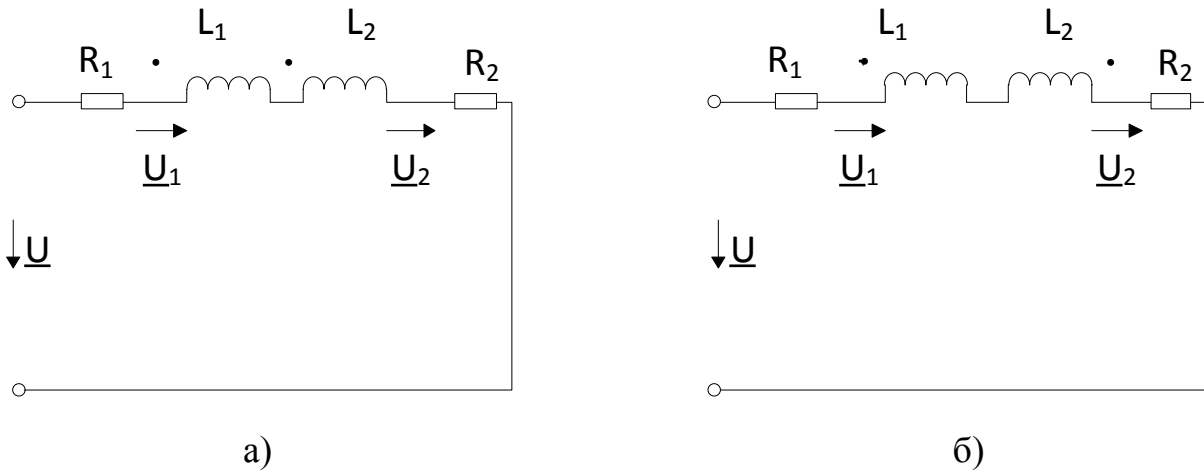


Рис. 8.1

Уравнения электрического состояния таких цепей различаются только знаком перед напряжением, компенсирующим ЭДС взаимной индукции.

$$\begin{aligned} \underline{U} &= \underline{U}_1 + \underline{U}_2 = (R_1 + j\omega L_1 \pm j\omega M)I + (R_2 + j\omega L_2 \pm j\omega M)I \\ \underline{U} &= R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 \pm 2M)I \end{aligned} \quad (8.5)$$

Следовательно, эквивалентная индуктивность схемы изменяется от при согласном включении катушек

$$L_{I\text{ЭКВ}} = L_1 + L_2 + 2M \quad (8.6)$$

до при встречном включении катушек,

$$L_{II\text{ЭКВ}} = L_1 + L_2 - 2M \quad (8.7)$$

то есть на величину  $4M$ .

Следовательно, можно записать

$$M = (L_{I\text{ЭКВ}} - L_{II\text{ЭКВ}})/4 \quad (8.8)$$



Эквивалентное комплексное сопротивление двух параллельно включенных катушек индуктивности определяется формулой:

$$\underline{Z} = \frac{(R_1 + j\omega L_1)(R_2 + j\omega L_2) - \omega^2 M^2}{R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 \pm 2M)} = R_{\text{экв}} + j\omega L_{\text{экв}} \quad (8.9)$$

где знак (-) относится к согласному, а знак (+) к встречному включению. Обычно  $\omega L \gg R$ , поэтому

$$\underline{Z} = j\omega \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \pm 2M} = j\omega L_{\text{экв}} \quad (8.10)$$

Характерным примером индуктивно связанных цепей служит трансформатор. Трансформатор имеет две обмотки, находящиеся на общем сердечнике. Магнитную проницаемость сердечника будем считать постоянной. Если к зажимам второй катушки подключить нагрузку с сопротивлением  $Z_H$ , то получится цепь рис.8.2, образующая трансформатор – аппарат, при помощи которого электрическая энергия одного напряжения  $U_1$  преобразуется в электрическую энергию другого напряжения  $U_2$ .

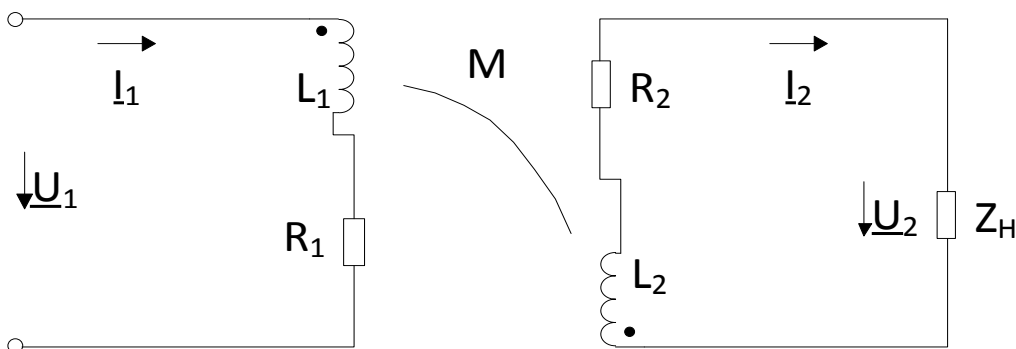


Рис. 8.2

В соответствии с указанными условно-положительными направлениями ЭДС, напряжений и токов для цепей обмоток трансформатора можно записать уравнения электрического состояния:

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= R_1 \underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2 \\ \underline{E}_2 &= R_2 \underline{I}_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 + \underline{U}_2 \end{aligned} \quad (8.11)$$

Для анализа работы трансформатора обычно пользуются векторной диаграммой. Для ее построения воспользуемся уравнениями электрического состояния (8.11), где  $\underline{E}_2 = -j\omega M \underline{I}_1$ .

На диаграмме вектор  $j\omega M \underline{I}_1$  опережает вектор тока на  $90^\circ$ .

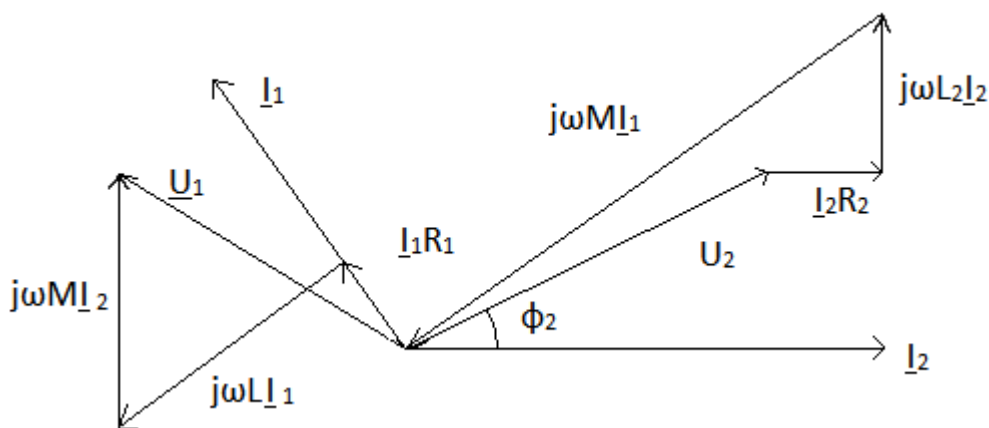


Рис. 8.3

Кроме того, для исследования трансформатора и определения его параметров используют два опыта:

- опыт холостого хода;
- опыт короткого замыкания.

Входное сопротивление трансформатора в режиме холостого хода

$$\underline{Z}_{BX} = R_1 + j\omega L_1 \quad (8.11)$$

а выходное напряжение  $U_2$  и взаимная индуктивность

$$\begin{aligned} U_2 &= j\omega M I_1 \\ M &= U_2 / \omega I_1 \end{aligned} \quad (8.13)$$

При коротком замыкании вторичной обмотки

$$\underline{Z}_{BX} = \underline{Z}_{\Sigma KB} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{BH} \quad (8.14)$$

где  $\underline{Z}_{BH}$  – вносимое сопротивление, которое характеризует влияние вторичной обмотки трансформатора на первичную

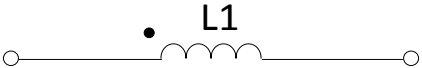


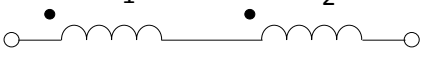
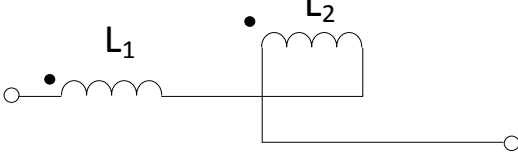
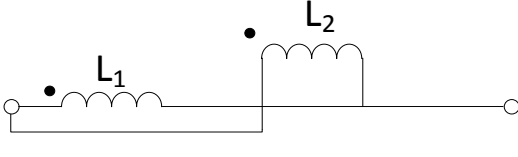
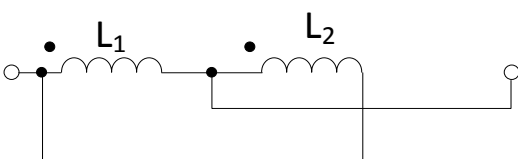
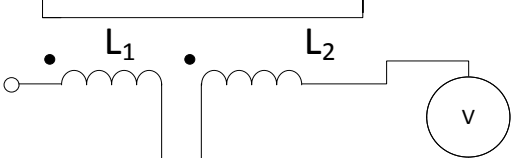
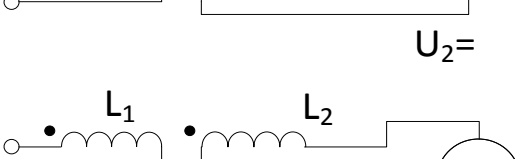
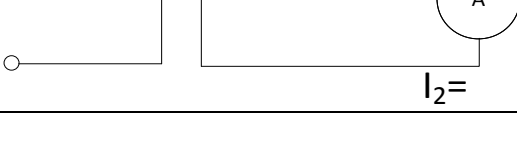
$$\underline{Z}_{BH} = R_{BH} + jX_{BH} = \frac{M^2 \omega^2}{Z_2^2} (R_2 + jX_2) \quad (8.15)$$

Порядок выполнения работы:

### 1. Экспериментальное исследование

Согласно таблице 8.1 провести измерения для различных способов включения магнитно-связанных катушек с индуктивностями  $L_1$  и  $L_2$ .

Таблица 8.1 – Магнитно-связанные катушки

	Схема цепи, подключаемой к выходу измерительного комплекта К-505	Данные опыта		
		I	U	P
		A	B	Вт
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7.				
8.	  $U_2 =$  $I_2 =$			

Дополнительные требования к содержанию отчета:

1. По данным опытов п. 1 и 2 определить параметры катушек  $Z, R, X$ .
2. По результатам измерений п.3 и п.4 определить взаимную индуктивность  $M$ .

3. По результатам опыта п.5 и п.6 найти эквивалентные индуктивности при параллельном согласном и параллельном встречном включениях и сравнить с расчетными значениями, полученными по известным  $L_1$ ,  $L_2$  и  $M$  (считая, что  $\omega L \gg R$ ).
4. По данным опыта п. 7 определить  $M$  и сравнить её со значением, полученным раньше.
5. По пункту, заданному преподавателем, построить в масштабе векторную диаграмму.

Контрольные вопросы:

1. Какие цепи называются магнитно-связанными?
2. Причина возникновения взаимной индуктивности катушек?
3. Что понимают под согласным и встречным включением катушек?
4. Как опытным путем определить величину взаимной индукции?
5. Как увеличить или уменьшить индуктивную связь катушек?
6. Эквивалентные параметры при последовательном соединении магнитно-связанных катушек.
7. Эквивалентные параметры параллельно включенных магнитно-связанных катушек.
8. Опытное определение одноименных зажимов магнитно-связанных катушек.
9. Принцип действия трансформатора, его векторная диаграмма.
10. Определение вносимого сопротивления трансформатора.

## Лабораторная работа № 9

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ПО СХЕМЕ «ЗВЕЗДА»

#### Цель работы:

- получить практические навыки по расчёту, сборке и измерениям в трёхфазных цепях при соединении приёмников «звездой»;
- экспериментально исследовать режимы работы потребителей, соединённых «звездой» по трёхпроводной и четырёхпроводной схемам при симметричной и несимметричной нагрузке фаз.

#### Сведения из теории:

Трёхфазной системой называют совокупность трёхфазной системы ЭДС, трёхфазных нагрузок и соединительных проводов. Трёхфазную ЭДС получают с помощью трёхфазного синхронного генератора, на неподвижной части которого располагаются три обмотки. Эти обмотки смещены в пространстве на угол 120 градусов, что обеспечивает сдвиг во времени на этот же угол фазных ЭДС.

Трёхфазная система ЭДС, как правило, симметрична. Векторная диаграмма трёхфазной системы ЭДС приведена на рис.9.1, действующие значения ЭДС при этом записываются в следующем виде:

$$E_A = E_\phi \cdot e^{j \cdot 0^\circ}$$

$$E_B = E_\phi \cdot e^{-j \cdot 120^\circ}$$

$$E_C = E_\phi \cdot e^{j \cdot 120^\circ}$$

Следует различать прямое чередование фаз генератора и обратное. Оно определяется направлением вращения ротора генератора. Векторная диаграмма ЭДС при обратном порядке чередования фаз изображена на рис. 9.2. В электроэнергетических системах обмотки генераторы обычно соединяются «звездой», при этом их концы  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  соединяют в одну общую точку  $O$ , называемую нейтральной точкой генератора (рис. 9.3.).

Генератор с нагрузкой может соединяться по трёх- и четырёхпроводной схемам (рис. 9.4, а) и б)). Провода, соединяющие точки  $A$ ,  $B$ ,  $C$  генератора и нагрузки, называют линейными, а напряжения между ними линейными напряжениями  $U_L$ , которые обозначают  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$ .

Точку  $O'$ , в которой объединены три конца трёхфазной нагрузки, называют нейтральной точкой нагрузки. Фазой трёхфазной нагрузки называют участок цепи от линейного провода, до точки  $O'$ . Напряжение между этой точкой и соответствующими линейными проводами называют фазными напряжениями  $U_\phi$  и обозначают  $U_A$ ,  $U_B$  и  $U_C$ .

Напряжение между нейтральными точками генератора и нагрузки называют напряжением смещения нейтрали и обозначают  $U_{00}$ .

Если комплексные сопротивления фаз нагрузки равны между собой, то такую нагрузку называют симметричной.

В четырёхпроводной схеме нейтральную точку генератора соединяется проводом с нейтральной точкой нагрузки. Этот провод называют нейтральным или нулевым, а протекающий через него ток обозначают  $I_0$ .

Токи  $I_A, I_B, I_C$ , текущие по линейным проводам, называются линейными.

Условно положительные напряжения токов и напряжений указаны на рис. 9.4.

Прямая последовательность фаз

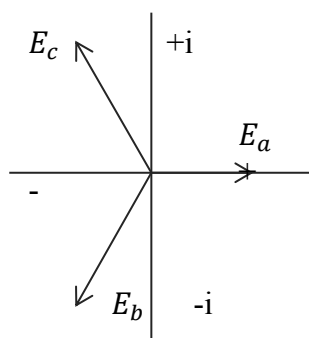


Рис. 9.1

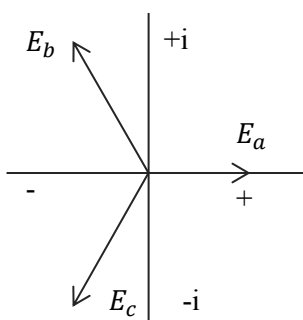


Рис. 9.2

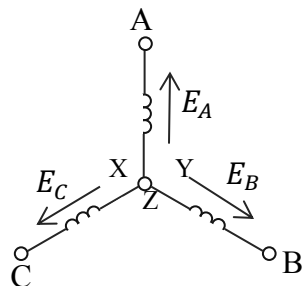


Рис. 9.3

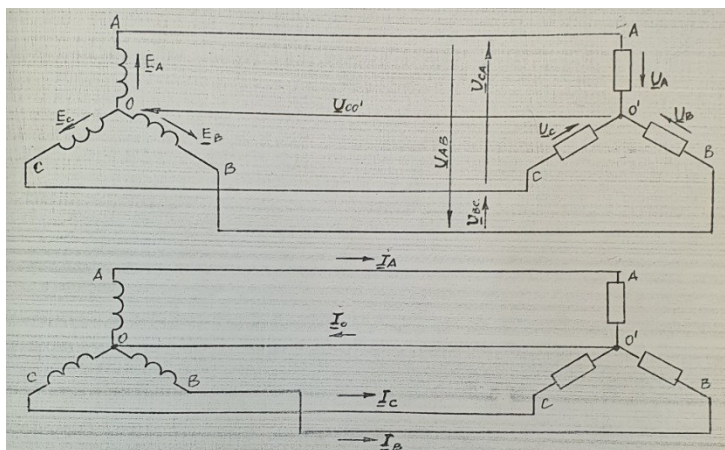


Рис. 9.4

Линейные и фазные напряжения трёхфазной симметричной системы ЭДС связаны соотношением:

$$U_L = \sqrt{3}E_\phi \quad (9.1)$$

Независимо от симметрии генератора и нагрузки линейный ток  $I_L$  всегда равен току фазному, то есть

$$I_L = I_\phi \quad (9.2)$$

Соотношения между напряжениями в нагрузке зависят от характера нагрузки соединения её с генератором.

При симметричной нагрузке в трех- и четырехпроводной схемах

$$\begin{aligned} U_L &= \sqrt{3}U_\phi \\ U_{00} &= 0; \\ I_0 &= 0 \end{aligned} \quad (9.3)$$

При несимметричной нагрузке в трёхпроводной схеме напряжение  $U_{00} \neq 0$ , поэтому определённого численного соотношения между линейными и фазными напряжениями не существует

Расчёт трёхфазных цепей заключается в определении фазных напряжений и токов в нагрузке, при заданных напряжений генератора и сопротивлениях нагрузки.

В четырехпроводной схеме, если нейтральный и линейные провода обладают весьма малым сопротивлением, напряжения, токи и активную мощность в нагрузке можно определить по формулам:

$$\begin{aligned} U_A &= E_A, U_B = E_B, U_C = E_C \\ I_A &= \frac{U_A}{Z_A}, I_B = \frac{U_B}{Z_B}, I_C = \frac{U_C}{Z_C}, I_0 = I_A + I_B + I_C \\ P &= \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi \end{aligned} \quad (9.4)$$

Эти формулы справедливы и для симметричной системы без нейтрального провода.

При несимметричной системе без нейтрального провода порядок расчёта следующий:

- определяют напряжение смещения нейтрали:

$$U_{00} = \frac{E_A Y_A + E_B Y_B + E_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C} \quad (9.5)$$

где проводимость фаз рассчитывают по формулам:

$$Y_A = \frac{1}{Z_A} \quad Y_B = \frac{1}{Z_B} \quad Y_C = \frac{1}{Z_C} \quad (9.6)$$

•рассчитывают напряжения на фазах нагрузки:

$$U_A = E_A - U_{00}, \quad U_B = E_B - U_{00}, \quad U_C = E_C - U_{00}, \quad (9.7)$$

- по формулам (9.4) определяют фазные токи.
- мощность трёхфазной Р рассчитывают по формуле:

$$P = P_A + P_B + P_C \quad (9.8)$$

где  $P_A, P_B, P_C$  - мощность отдельных фаз:

$$P_A = U_A I_A \cos \varphi_A \quad P_B = U_B I_B \cos \varphi_B \quad P_C = U_C I_C \cos \varphi_C \quad (9.9)$$

#### Порядок выполнения работы:

### 1. Аналитическое исследование

1.1 Для заданных преподавателем из таблицы 9.1 значений сопротивлений фаз нагрузки рассчитать напряжения  $U_A, U_B, U_C$ , токи  $I_A, I_B, I_C, I_0$  и активную мощность трёхфазной системы при следующих режимах:

- а) симметричная нагрузка без нейтрального провода;
- б) обрыв фазы в трёхпроводной схеме;
- в) короткое замыкание в трёхпроводной схеме;
- г) включение в одну из фаз конденсатора в трёхпроводной схеме;
- д) включение в одну из фаз конденсатора в четырёхпроводной схеме

Перед выполнением расчётов необходимо каждой бригаде на своём стенде измерить линейные напряжения источника.



Таблица 9.1 – Данные для аналитического исследования

Номер бригады	Режим работы			
	Симметричная нагрузка сопротивления фаз, Ом	Обрыв фазы	КЗ фазы	Значение ёмкости в мкФ и фаза, в которую она включена
1	300	А	А	10 - А
2	300	В	В	14 - В
3	300	С	С	20 - С
4	350	А	А	24 - А
5	350	В	В	30 - В
6	350	С	С	24 - С

1.2 Начертить схемы трёх- и четырёхпроводного соединений нагрузки с источником с включением в неё необходимых измерительных приборов. При этом нужно учесть особенность подключения измерительного комплекта К-505: для измерения фазных напряжений внутри прибора создается искусственная нейтраль и, чтобы обеспечить правильное показание вольтметра, следует входную клемму 0 соединить с нейтральной точкой нагрузки.

## 2. Экспериментальное исследование

В лабораторной работе используются панели № 2, 3, 4 стенда ЭВ-4. Активная нагрузка в каждой фазе создается двумя постоянными резисторами по 100 Ом каждый и одним переменным с сопротивлением 0...150 Ом. В качестве реактивной нагрузки в одну из фаз вместо резисторов включают конденсатор.

Фазные напряжения, токи и мощности измеряют комплектом К-505. Этот прибор имеет четыре входные клеммы А, В, С, 0, подключаемые к генератору, и столько же выходных, подключаемых к нагрузке. Линейные напряжения и напряжения смещения нейтрали следует измерять цифровым вольтметром.

Собрать схему и провести измерения линейных, фазных напряжений, токов и активных мощностей, напряжения смещения нейтрали  $U_{00}$ , и тока в нейтральном проводе. Нагрузка фаз должна соответствовать заданию. Экспериментальные данные занести в таблицу 9.2.

Таблица 9.2 - Экспериментальные данные

Схема соединения	Нагрузка фаз			Данные измерения														Расчёт	
	$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{AC}$	$I_A$	$U_A$	$P_A$	$U_B$	$I_B$	$P_B$	$U_C$	$I_C$	$P_C$	$U_{00}$	$I_{00}$	$P$	$U_L/U_\Phi$
	Ом	Ом	Ом	В	В	В	А	В	Вт	В	А	Вт	В	А	Вт	В	А	Вт	
3-х проводная система																			
4-х проводная система																			

Дополнительные требования к содержанию отчёта:

1. Проверить совпадение расчётных и экспериментальных данных. Оценить полученную погрешность.
2. Для каждого опыта по результатам эксперимента построить векторные диаграммы напряжений и токов.
3. По указанию преподавателя для одного из несимметричных режимов без нейтрального провода по данным расчёта построить векторную диаграмму всех напряжений и токов.
4. Используя расчётные и экспериментальные данные в выводах, указать особенности исследования режимов работы трёхфазной цепи и отметить роль нейтрального провода.

Контрольные вопросы:

1. Какие существуют схемы соединений нагрузки звездой?
2. Назначение нейтрального провода.
3. Области применения трёхпроводной и четырёхпроводной схемы.
4. Какая нагрузка называется симметричной и несимметричной?
5. Порядок расчёта трёхфазной цепи при симметричной и несимметричной нагрузках.
6. Как подключить вольтметр для измерения  $U_L$ ,  $U_\Phi$ ,  $U_{00}$ ?
7. Почему в нейтральном проводе никогда не ставят предохранители или другую защитную аппаратуру?
8. Чем отличается прямой и обратный порядок чередования фаз?
9. Достоинства и недостатки трёх- и четырёхпроводных систем.
10. Соотношения между фазными и линейными напряжениями и токами.

## Лабораторная работа № 10

### ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЁХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ПО СХЕМЕ «ТРЕУГОЛЬНИК»

#### Цель работы:

- изучить влияние изменения сопротивления одного из трёх однофазных приёмников, соединённых по схеме «треугольник», на токи и напряжения других фаз;
- ознакомиться с практическими приёмами измерения фазных и линейных напряжений и токов, а также мощности трёхфазной цепи;
- проверить экспериментально соотношения между линейными и фазными электрическими величинами в нормальном и аварийном режимах.

#### Сведения из теории:

Соединение однофазных приемников таких, как нагревательные элементы, лампы, резисторы, конденсаторы ... по схеме «треугольник» осуществляется следующим образом. Необходимо один приемник  $Z_{AB}$  подключить к линейным проводам А и В, другой  $Z_{BC}$  — к В и С, третий  $Z_{CA}$  — к С и А. Схема их подключения изображена на рис.10.2. Если в качестве нагрузки используются трехфазные асинхронные двигатели, трехфазные трансформаторы, то соединение приёмников  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$ ,  $Z_{CA}$  по схеме «треугольник» осуществляется следующим образом. Необходимо конец предыдущей фазы соединить с началом последующей и образовать замкнутый контур: конец Х соединить с началом В, конец Y соединить с началом С, конец Zс началом А (рис.10.1). Подключив трёхфазный приёмник к линейным проводам генератора, соединённого «звездой», получим трехфазную систему «звезда – треугольник» (рис.10.3).

Из рис.10.3 следует, что если пренебречь сопротивлениями линейных проводов, то напряжения на фазах приёмников  $Z_{AB}$ ,  $Z_{BC}$ ,  $Z_{CA}$  равны линейным напряжениям генератора, то есть

$$U_{л} = U_{ф} \quad (10.1)$$

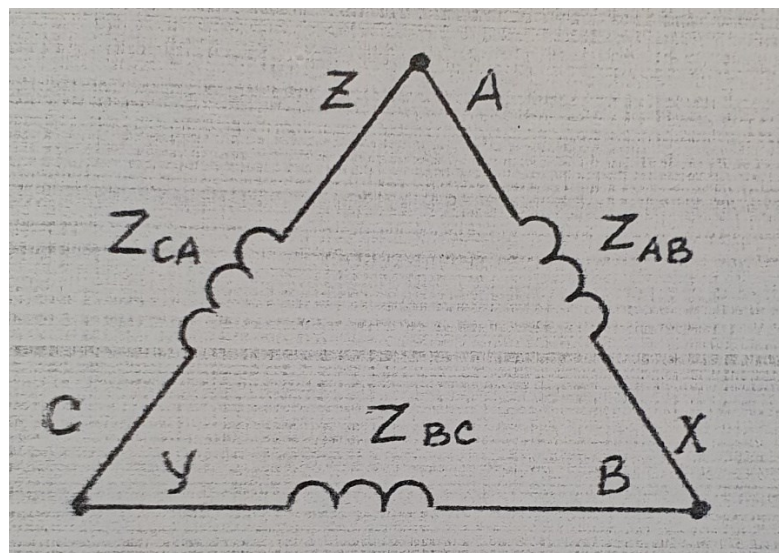


Рис. 10.1

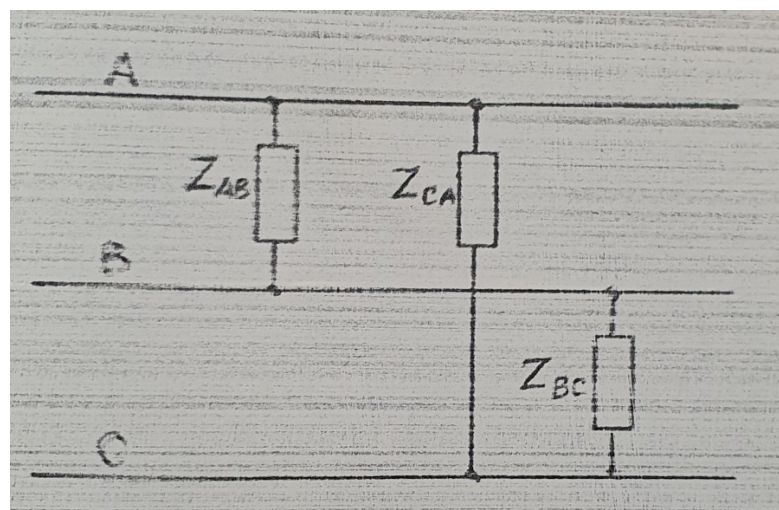


Рис. 10.2

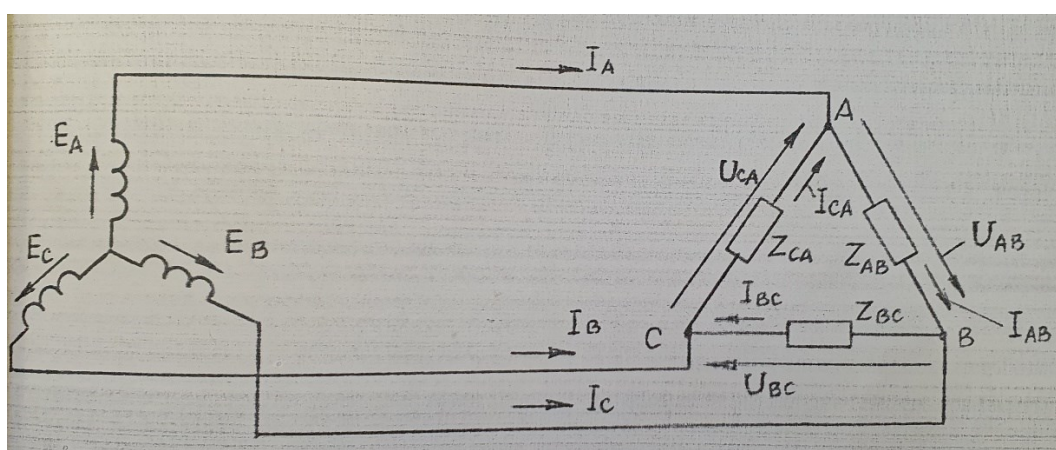


Рис. 10.3

Так как генератор выдаёт систему симметричных линейных напряжений, то из (10.1) следует, что фазные напряжения в нагрузке равны между собой, то есть  $U_{AB}=U_{BC}=U_{CA}$  и не зависят от сопротивления нагрузки (за исключением

таких аварийных режимов, как короткое замыкание или обрыв линейного провода).

При обрыве линейного провода, например, провода А, нормальный режим работы приёмника нарушается. Приёмники  $Z_{AB}$  и  $Z_{CA}$ , находившиеся соответственно в фазах АВ и СА, окажутся соединёнными последовательно и включёнными на линейное напряжение  $U_{BC}$ . Это напряжение распределяется на фазах АВ и СА прямо пропорционально величине сопротивлений  $Z_{AB}$  и  $Z_{CA}$ .

При обрыве одной из фаз, например, АВ, напряжение в других фазах не изменится. Поэтому, в отличие от соединения по схеме «звезда» при соединении нагрузки по схеме «треугольник», изменение сопротивления одной из фаз не вызывает изменение напряжения и тока в других фазах.

Симметричной нагрузкой является такая, когда комплексные сопротивления фаз АВ, ВС, СА равны, то есть

$$Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA} \quad (10.2)$$

При симметричной нагрузке точки в фазах приёмника равны и смещены относительно друг друга на угол  $120^\circ$ . Согласно первому закону Кирхгофа (для условно положительных направлений токов в соответствии с рис. 10.3) линейные токи:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA} \quad I_B = I_{BC} - I_{AB} \quad I_C = I_{CA} - I_{BC} \quad (10.3)$$

Поэтому при симметричной системе линейные токи равны по величине и смещены между собой на угол, равный  $120^\circ$ . По величине линейные токи больше фазных в  $\sqrt{3}$ :

$$I_L = \sqrt{3} I_\phi \quad (10.4)$$

При несимметричной нагрузке фазные токи в общем случае не равны друг другу и угол сдвига по фазе между ними не равен  $120^\circ$ . Сказанное относится и к линейным токам.

Расчёт трёхфазной цепи при заданных линейных напряжениях генератора и сопротивлениях нагрузки выполняется в такой последовательности:

- из (10.1) (за исключением случая обрыва линейного провода) определяют фазные напряжения в нагрузке;
- рассчитывают фазные токи

$$I_{AB} = \frac{U_{AB}}{Z_{AB}} \quad I_{BC} = \frac{U_{BC}}{Z_{BC}} \quad I_{CA} = \frac{U_{CA}}{Z_{CA}} \quad (10.5)$$

- по формулам (10.3) определяют линейные токи.

### Порядок выполнения работы:

#### 1. Аналитическое исследование

1.1 Для заданных преподавателем из таблицы 10.1 значений сопротивлений фаз нагрузки рассчитать линейные фазные токи и активную мощность трёхфазной системы при следующих режимах:

- симметричная нагрузка;
- обрыв линии;
- обрыв фазы;
- в одной из фаз включена активно-ёмкостная нагрузка.

1.2 Начертить схему для проведения экспериментальных исследований, включив в неё необходимые измерительные приборы.

Таблица 10.1 – Данные аналитического исследования

	Режим работы					
	Сопротивления симметричной нагрузки, Ом	Обрыв фазы	Обрыв линии	Активно-реактивная нагрузка		
				Включена в фазе	Резистор, Ом	Ёмкость, мкФ
1	300	AB	A	AB	100	10
2	300	BC	B	BC	100	20
3	300	CA	C	CA	100	10
4	350	AB	A	AB	150	20
5	350	BC	B	BC	150	10
6	350	CA	C	CA	150	20

#### 2. Экспериментальное исследование

В лабораторной работе используются панели № 1, 2, 3, 4 стенда ЭВ-4. Активная нагрузка создаётся постоянными резисторами по 100 Ом каждый и одним переменным резистором с сопротивлением 0...150 Ом. В качестве активно-реактивной нагрузки используются резисторы и конденсаторы.

Фазные и линейные напряжения измеряются цифровым вольтметром. Линейные токи измеряют комплектом К-505. Для измерения фазных токов следует использовать амперметры, расположенные на панелях № 2 и 3.

Собрать схему, предъявить её для проверки и провести измерение линейных и фазных напряжений и токов. Нагрузка должна соответствовать заданию, приведённому в таблице 10.1. Экспериментальные данные занести в таблицу 10.2.

Таблица 10.2 - Экспериментальные данные

Нагрузка			Данные измерений									Расчёт
$Z_{AB}$	$Z_{BC}$	$Z_{CA}$	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$I_{AB}$	$I_{BC}$	$I_{CA}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	P
Ом	Ом	Ом	В	В	В	А	А	А	А	А	А	Вт

Дополнительные требования к содержанию отчёта:

1. Проверить совпадение расчётных и экспериментальных данных, оценить полученную погрешность.
2. Для каждого опыта по результатам эксперимента построить векторные диаграммы напряжений  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  и токов  $I_{AB}$ ,  $I_{BC}$ ,  $I_{AC}$ ,  $I_A$ ,  $I_B$ ,  $I_C$ .
3. По указанию преподавателя для одного из несимметричных режимов по данным расчёта построить на комплексной плоскости векторную диаграмму всех токов и напряжений.

Контрольные вопросы:

1. В чём заключается достоинства и недостатки схемы соединения нагрузки «треугольником»?
2. Оказывают ли взаимное влияние фазы друг на друга? Привести примеры.
3. Каково соотношение между фазными и линейными токами и напряжениями?
4. Какая нагрузка является симметричной и несимметричной. Привести примеры?
5. В каких случаях линейные и фазные токи не связаны соотношением  $I_L = \sqrt{3}I_\phi$ ?
6. Допустимо ли короткое замыкание фазы, соединённой по схеме «треугольник». Сравнить с аналогичным режимом при соединении по схеме звезда?
7. Способы измерения активной мощности при симметричной и несимметричной нагрузке.
8. Как рассчитать фазные и линейные токи при обрыве линейного провода.
9. Как изменится активная мощность при переключении нагрузки со схемы звезда на треугольник? Привести вывод формулы.
10. Какая важная особенность соединения фаз нагрузки по схеме «треугольник»?

## Лабораторная работа № 11

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ

#### Цель работы:

Экспериментальное определение амплитудно-частотных характеристик пассивных  $RC$ -фильтров, сравнение полученных зависимостей с расчетными.

#### Сведения из теории:

Под электрическими фильтрами понимают четырехполюсники, обладающими избирательными свойствами. Электрические фильтры включаются между источником питания и нагрузкой (приемником). Фильтры пропускают: без затухания или с небольшим затуханием токи в определенной полосе частот которая называется полосой пропускания или прозрачности, а токи с частотами, лежащими вне этой полосы, не пропускают или пропускают с большим затуханием (полоса затухания или задерживания). По виду полосы пропускания различают фильтры нижних частот, верхних частот, полосовые фильтры и заграждающие фильтры. В зависимости от вида элементов фильтры разделяются на  $LC$  -,  $LRC$  -,  $RC$  - фильтры.

Исследование сложных многосвязных фильтров можно свести при характеристическом согласовании к исследованию простейших Т-, Г-, П-образных звеньев (рис. 12.1).

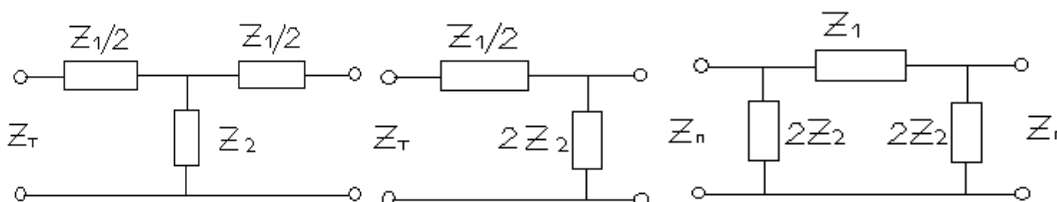


Рис. 11.1

Т- и П-образные фильтры могут быть образованы каскадным соединением соответствующих звеньев Г-образной формы так, чтобы при этом выполнялись условия согласования по характеристическим сопротивлениям. Это связано с тем, что для всех схем рис.11.1 характеристические сопротивления со стороны Т- и П-входов соответственно определяются по формулам:

$$Z_T = \sqrt{Z_1 \cdot Z_2 \cdot \left(1 + \frac{Z_1}{4 \cdot Z_2}\right)} \quad (11.1)$$
$$Z_{II} = \sqrt{\frac{Z_1 \cdot Z_2}{1 + \frac{Z_1}{4 \cdot Z_2}}}$$



Эти формулы легко получить через параметры холостого хода и короткого замыкания четырехполюсника. При наличии характеристического согласования передаточные функции по напряжению определяются следующим образом:

$$K = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \sqrt{\frac{Z_{2C}}{Z_{1C}}} \cdot e^{-g} \quad (11.2)$$

где  $\dot{U}_2$  – комплексное напряжение на выходе фильтра, В;

$\dot{U}_1$  – комплексное напряжение на входе фильтра, В;

$Z_{2C}$  – характеристическое сопротивление на выходе фильтра, Ом;

$Z_{1C}$  – характеристическое сопротивление на входе фильтра, Ом;

$g$  – характеристическая постоянная передачи фильтра.

Широкое распространение для низких частот получили  $RC$ -фильтры, так как для  $LC$ - фильтров в этом случае нужны большие индуктивности, которые сложны в изготовлении и обладают большими габаритами и массой. Для высоких частот (десятки кГц и выше) получение необходимых индуктивностей не представляет затруднений.

Простейший  $RC$ - фильтр нижних частот представлен на рис. 11.2.

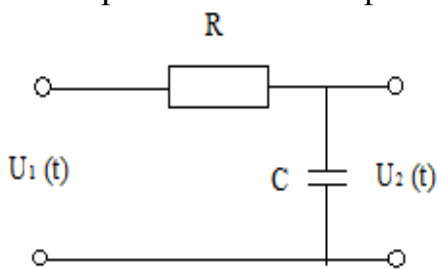


Рис. 11.2

Представив напряжение в комплексной форме, можно определить частотные характеристики с помощью формул (11.1) и (11.2) или законов Кирхгофа:

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{\frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}}{R + \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C}} = \frac{1}{1 + j \cdot \omega \cdot RC} \quad (11.3)$$

Так как  $K = |K|e^{j\varphi}$ , то

$$|K| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2}} \quad \varphi = -\arctg \omega RC \quad (11.4)$$

где  $\varphi$  – сдвиг по фазе между входным и выходным сигналами.

Полагая  $|K| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ , (тогда  $20 \lg|K| = -3$  дБ), получим:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega_c^2 \cdot R^2 \cdot C^2}} \quad (11.5)$$

Тогда частота среза:

$$f_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (11.6)$$

а фазовый сдвиг на этой частоте согласно формуле (11.4):

$$\varphi_{fc} = -45^\circ.$$

Амплитудно- и фазо-частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) фильтра нижних частот представлены на рис. 11.3.

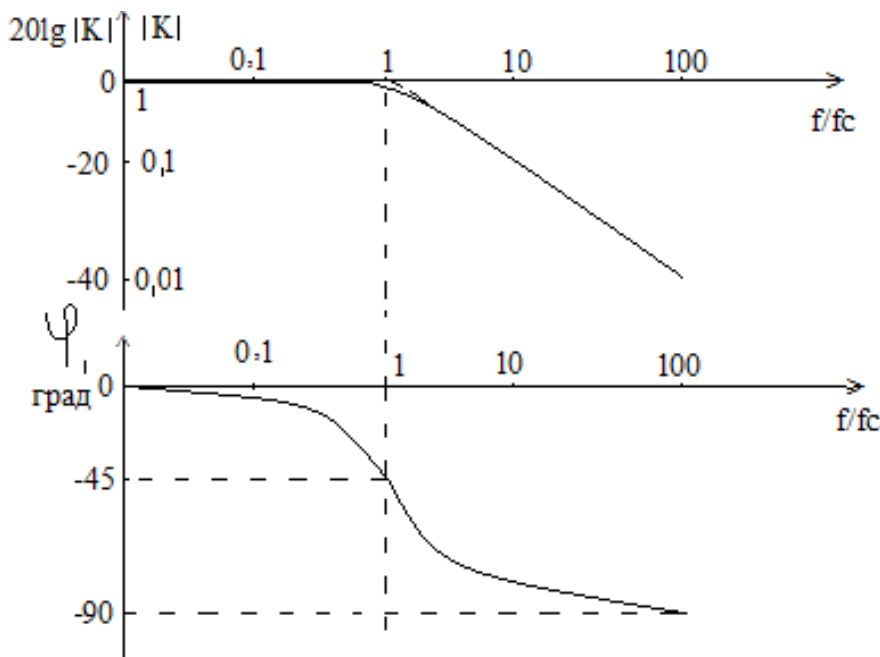


Рис.11.3

Из рис. 11.3 видно, что АЧХ можно представить в виде двух асимптот:

1.  $|K| = 1$  при  $f \ll f_c$ , то есть  $20 \lg|K| = 0$  дБ
2.  $|K| \approx 1/\omega RC$  при  $f \gg f_c$ , то есть коэффициент передачи обратно пропорционален частоте и, следовательно, он уменьшается на 20 дБ на декаду (6 дБ на октаву).
3.  $|K| = 1/\sqrt{2}$ , при  $f = f_c$ , то есть  $20 \lg|K| = -3$  дБ.

Таким образом, фильтр нижних частот передает без изменения сигналы нижних частот, на высоких частотах обеспечивает затухание сигналов и запаздывания их по фазе относительно входных сигналов.

Простейший  $RC$ - фильтр верхних частот представлен на рис.11.4.

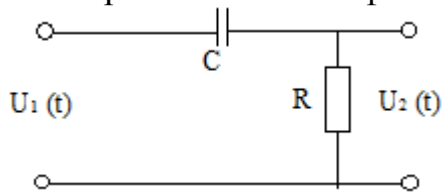


Рис. 11.4

Частотные характеристики схемы определяются из формул:

$$|K| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2}}} \quad \varphi = \arctg \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \quad (11.7)$$

На рис.11.5 представлены графики АЧХ и ФЧХ фильтра верхних частот.

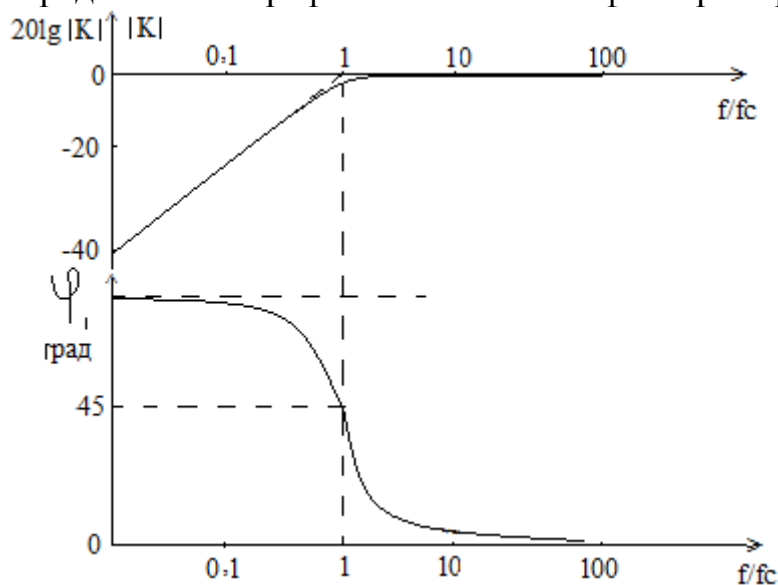


Рис.11.5

Полосовой фильтр получают каскадным соединением фильтров верхних и нижних частот. Один из возможных вариантов фильтра предоставлен на рис. 11.6.

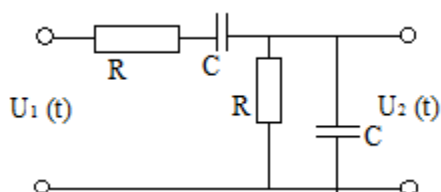


Рис. 11.6

Частотные характеристики схемы определяются из формул:

$$|K| = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} - \omega \cdot R \cdot C\right)^2 + 9}} \quad \varphi = \arctg \frac{1 - \omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2}{3 \cdot \omega \cdot R \cdot C} \quad (11.8)$$

Выходное напряжение максимально при  $\omega \cdot R \cdot C = 1$ , следовательно резонансная частота:

$$f_p = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C} \quad (11.9)$$

АЧХ и ФЧХ полосового фильтра представлены на рис.11.7.

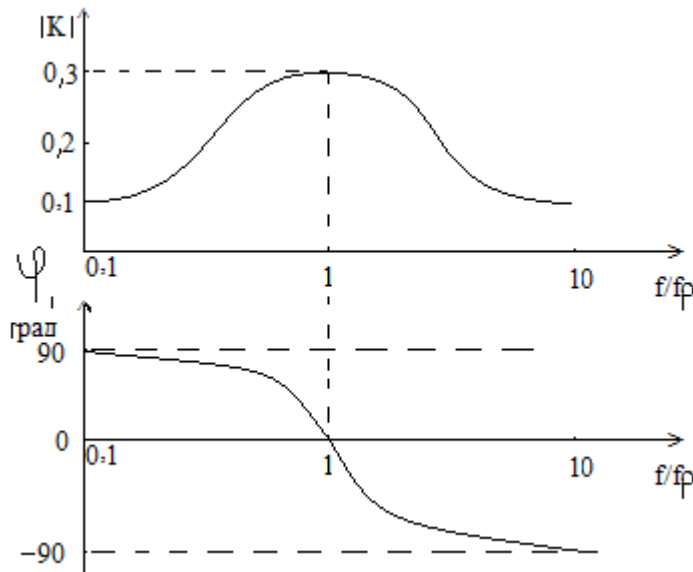


Рис. 11.7

При параллельном соединении фильтров верхних и нижних частот получают заградительный фильтр. Один из возможных вариантов фильтра (двойной Т-образный фильтр) представлен на рис. 11.8.

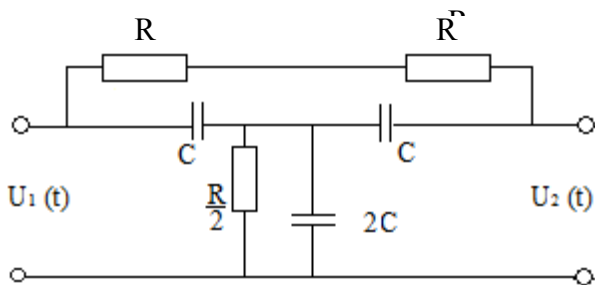


Рис.11.8

Частотные характеристики схемы определяются из формул:

$$|K| = \frac{1 - \omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2}{\sqrt{(1 - \omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2)^2 + 16 \cdot \omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2}} \quad \varphi = \operatorname{arctg} \frac{4 \cdot \omega \cdot RC}{\omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2 - 1} \quad (11.10)$$

АЧХ и ФЧХ заградительного фильтра представлены на рис. 11.9.

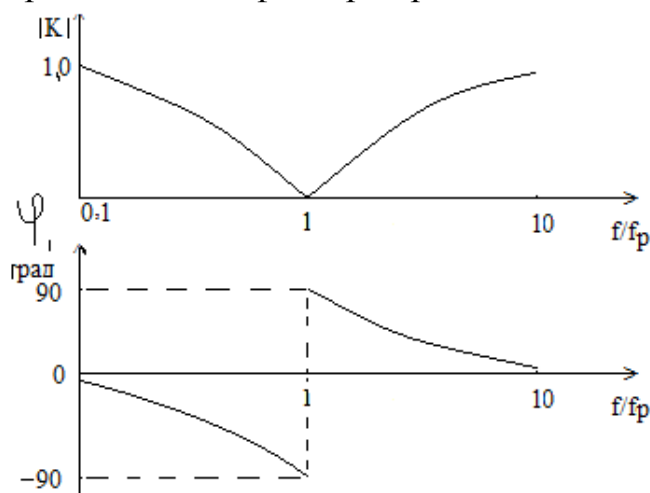


Рис.1 1.9

#### Порядок выполнения работы:

##### 1. Аналитическое исследование

Рассчитать и построить амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики фильтров, приведенных на рис. 11.2, 11.4, 11.6, 11.8, для следующих значений элементов:

$$R=100 \text{ Ом} \quad C=2 \text{ мкФ}$$

Значение частот принять равными: 50, 100, 150, 200, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 8000, 10000, 15000, 20000 Гц. Для построения ФЧХ взять пять значений частоты (включая частоту среза). По оси частот использовать логарифмический масштаб. Графики строить для абсолютных значений частоты.

##### 2. Экспериментальное исследование

При выполнении работы необходимо собрать схемы, показанные на рис.11.10.

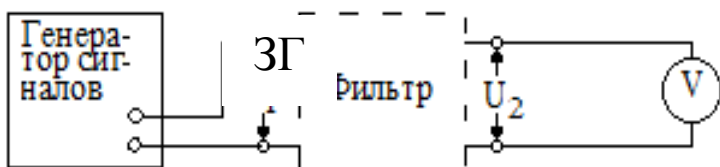


Рис.11.10

Уровень выходного напряжения звукового генератора установить 4 В. Изменяя частоту генератора в пределах 50...20000 Гц снять зависимости

$U_2 = \varphi(f)$  для значений частот, отмеченных ранее. Снять значение частот среза или частоты максимума (минимума) модуля передаточной функции фильтра. За экспериментальное значение частоты среза ( $f_c$ ) принять то значение частоты генератора, при котором напряжение на выходе фильтра равно:

$$U_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot U_1 = 0.707 \cdot U_1$$

Результаты измерений занести в таблицы.

Таблица 11.1 – Выходное напряжение фильтра низких частот

$f, \text{Гц}$	50	100	...	20000
$U_2$ (изм.), В				
$U_2$ (расч.), В				

Дополнительные требования к отчету:

Построить экспериментальные амплитудно-частотные характеристики фильтров на тех же рисунках, где строились рассчитанные характеристики, выделив их другим цветом. Сравнить экспериментальные и рассчитанные характеристики.

Контрольные вопросы:

1. Как можно классифицировать фильтры?
2. Какие фильтры называют типа  $k$  и типа  $m$ ?
3. Что такое коэффициент затухания, единицы его измерения?
4. Что такое характеристическая постоянная передача?
5. Какие фильтры могут использоваться в качестве дифференцирующего звена?
6. Какие фильтры могут использоваться в качестве интегрирующего звена?
7. Какие фильтры называются активными, в чем их преимущество?
8. Как можно получить необходимое затухание фильтра?
9. На чем основано свойство фильтров пропускать или задерживать токи с различными частотами?
10. Как работает колебательный контур в качестве фильтра?
11. Что такое добротность контура?
12. Какие существуют области применения фильтров?

## Лабораторная работа №12

### ИССЛЕДОВАНИЕ КАТУШКИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

#### Цель работы:

Исследование влияния ферромагнитного сердечника на вольтамперную характеристику, параметры и форму тока катушки индуктивности.

#### Сведения из теории:

Ферромагнитный сердечник катушки увеличивает ее индуктивность, поскольку усиление магнитной индукции означает рост магнитного потока при неизменном токе катушки. Поскольку связь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля  $B=f(H)$  нелинейная, то магнитная проницаемость зависит от напряженности поля, и, следовательно, от тока в катушки. Поэтому характеристики катушки с сердечником нелинейные, и сама катушка является нелинейным элементом электрической цепи. То есть параметры катушки с сердечником зависят от величины тока, и сам ток при насыщении сердечника изменяется по периодическому несинусоидальному закону при воздействии синусоидального напряжения. Кроме того, в сердечнике катушки имеются потери электрической энергии. Вольтамперная характеристика, связывающая действующие значения напряжения и тока  $U=f(I)$  катушки без сердечника, линейна, так как индуктивность  $L$  постоянна и ее напряжение равно:

$$U = \omega \cdot L \cdot I \quad (12.1)$$

У катушки с замкнутым ферромагнитным сердечником ВАХ изогнута в сторону оси тока, поскольку увеличение тока приводит к насыщению сердечника и, как следствие, уменьшению индуктивности и индуктивного сопротивления.

Если сердечник не замкнут, то есть имеется воздушный зазор, то ВАХ имеет меньший изгиб, чем в случае замкнутого сердечника из-за включения в магнитную цепь линейного участка.

На рис. 12.1, а) представлена схема замещения катушки без сердечника, а на рис. 12.1, б) - с сердечником.

где  $R$  – сопротивление, связанное с активными потерями в меди катушки, Ом;

$L_s$  – индуктивность, связанная с реактивными потерями от потока рассеивания, Гн;

$L_\mu$  – индуктивность, обусловленная потоком намагничивания, то есть потоком, замыкающимся по сердечнику, Гн;

$R_{Fe}$  – сопротивление, обусловленное активными потерями в сердечнике, Ом.

Схему замещения можно упростить, считая, что для катушки с ферромагнитным сердечником  $X_s \approx 0$

На рис. 12.1, в) изображена векторная диаграмма упрощенной схемы замещения ( $X_s \approx 0$ ). Измерив  $U$ ,  $L$ ,  $P$  можно рассчитать параметры ее элементов по формулам:

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \frac{P}{U \cdot I} & P_{Fe} &= P - I^2 \cdot R \\ Q &= \sqrt{(U \cdot I)^2 - P^2} & E &= \sqrt{U^2 + (I \cdot R)^2 - 2 \cdot I \cdot R \cdot \cos \varphi} \\ X_\mu &= \frac{E^2}{Q} \end{aligned} \quad (12.2)$$

$$R_{Fe} = \frac{E^2}{P_{Fe}} \quad I_\mu = \sqrt{\frac{Q}{X_\mu}} \quad L_\mu = \frac{X_\mu}{\omega}$$

где  $E$  – действующее значение ЭДС самоиндукции от основного намагничивающего потока  $\Phi_\mu$  образуемого током  $I_\mu$ .

$$\Phi_\mu = \frac{E}{4.44 \cdot f \cdot w} \quad (12.3)$$

где  $f$  – частота переменного тока, Гц;

$w$  – число витков катушки.

Величину  $R$  следует определять на постоянном токе (мостом, омметром).



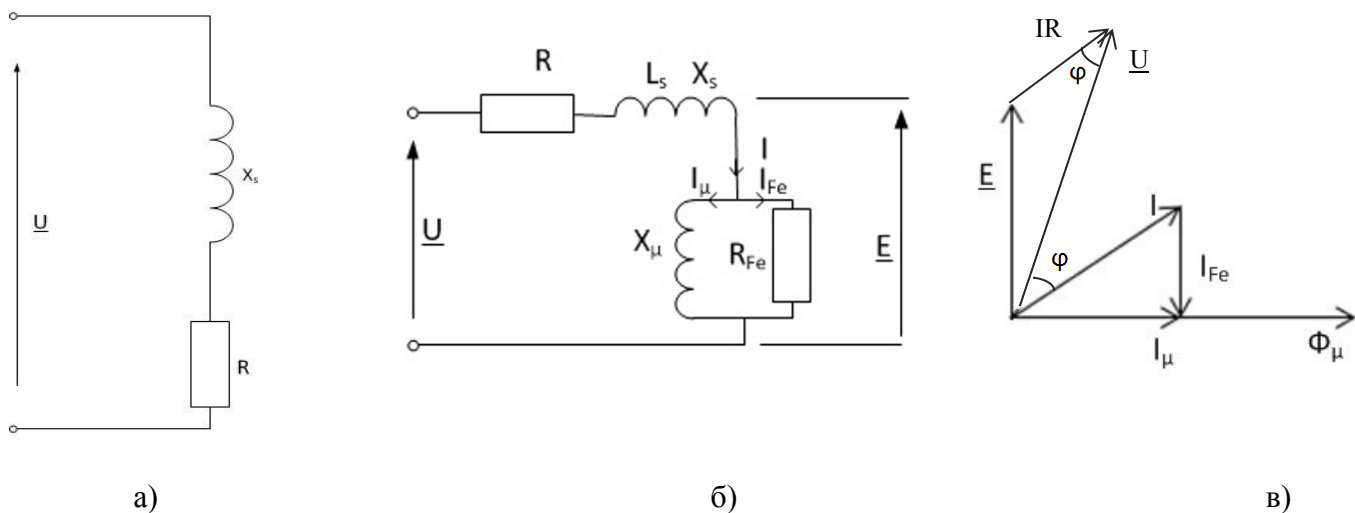


Рис. 12.1

Порядок выполнения работы:

1. Снять вольтамперную характеристику
  - 1.1 Измерить омическое сопротивление катушки.
  - 1.2 Собрать цепь, изображенную на рис. 12.2.

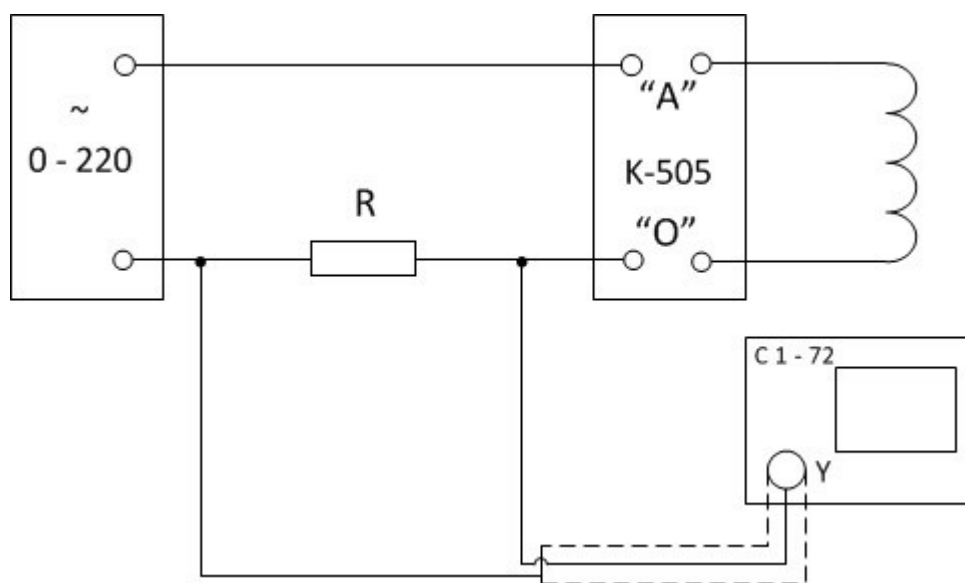


Рис. 12.2

1.3 Снять показания тока  $I$  и активной мощности  $P$  для величин воздушного зазора  $\Delta = 0; 0.5; 1.0; 1.5$  мм при значении питающего напряжения  $U = 30; 60; 90; 120; 150; 180$  В. При этом ток катушки не должен превышать 3.5 А. Снять показания активной мощности  $P$  и напряжения  $U$  для этих же воздушных зазоров при токе  $I = 1$  А. Данные измерения занести в таблицу 12.1.

Для зазора  $\Delta = 2.0$  мм снять показания напряжения  $U$  и активной мощности  $P$ , измерения производить плавно, увеличивая его до токов  $I = 0.5; 1.0; 1.5; 2.0; 2.5; 3.0$  А. Данные измерения занести в таблицу 12.2.

Таблица 12.1 – ВАХ нелинейной катушки

$\Delta = 0.0$	U, В	30	60	90	120	150	180	
	I, А							1
	P, Вт							
$\Delta = 0.5$	U, В	30	60	90	120	150	180	1
	I, А							
	P, Вт							
$\Delta = 1.0$	U, В	30	60	90	120	150	180	1
	I, А							
	P, Вт							
$\Delta = 1.5$	U, В	30	60	90	120	150	180	
	I, А							1
	P, Вт							

Таблица 12.2 – ВАХ нелинейной катушки с зазором 2.0 мм

$\Delta = 2.0$	I, А	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
	U, В						
	P, Вт						

1.4 Для напряжения  $U = 180$  В и  $\Delta = 0.0$  мм, а также для  $I = 2$  А и  $\Delta = 2.0$  мм зарисовать на кальку осциллограммы.

2. По данным измерений рассчитать параметры катушки с разными воздушными зазорами по формулам (12.2) и построить зависимости  $E(I_\mu)$ ,  $E(I_{Fe})$  и  $IR(I)$ .

3. Построить зависимости:  $P_{Fe}(\Delta)$ ,  $L(\Delta)$ ,  $Z(\Delta)$  и  $\cos\varphi(\Delta)$  для  $I = 1$  А.

4. Построить векторную диаграмму при  $U = 120$  В и  $\Delta = 1.5$  мм.

#### Дополнительные требования к отчету:

На одном графике построить ВАХ для зазоров  $\Delta = 0.0$  мм и  $\Delta = 2.0$  мм. В выводах указать причину различия ВАХ катушки с сердечником без воздушного зазора и ВАХ катушки с сердечником, имеющим воздушный зазор.

### Контрольные вопросы:

1. Почему ферромагнитный сердечник увеличивает индуктивность катушки?
2. Почему при удалении сердечника из катушки ток заметно увеличивается?
3. Отличие ВАХ катушек с сердечником и без сердечника?
4. Почему при синусоидальном напряжении ток в катушке с ферромагнитным сердечником несинусоидален?
5. Опытное определение параметров схемы замещения катушки с сердечником.
6. Объяснить причину различия ВАХ катушек с замкнутым сердечником и с сердечником, имеющий воздушный зазор.
7. Какие из параметров схемы замещения являются нелинейными и почему?
8. Последовательность построения векторной диаграммы катушки с сердечником по опытным данным.
9. Будет ли напряжение на катушки с ферромагнитным сердечником синусоидальным, если ток через нее изменяется по гармоническому закону?

## Лабораторная работа № 13

### ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

#### Цель работы:

Экспериментально исследовать триггерный эффект изменения тока в цепи с последовательным соединением нелинейной катушки индуктивности и линейного конденсатора.

#### Сведения из теории:

Резонанс в цепи с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и линейного конденсатора называется феррорезонансом напряжений. Характерно, что феррорезонанс для данной катушки может быть достигнут не только за счет изменения величины емкости или частоты напряжения источника, но и путем изменения амплитуды этого напряжения. Такое явление принципиально невозможно в линейных цепях.

Точный анализ явления феррорезонанса представляет значительные трудности, и для его упрощения реальные несинусоидальные кривые напряжений и токов часто заменяют эквивалентными синусоидами. Катушку в этом случае считают условно-нелинейным элементом и в расчете используют её ВАХ для действующих значений, примерная форма которой показана на рис.13.1.

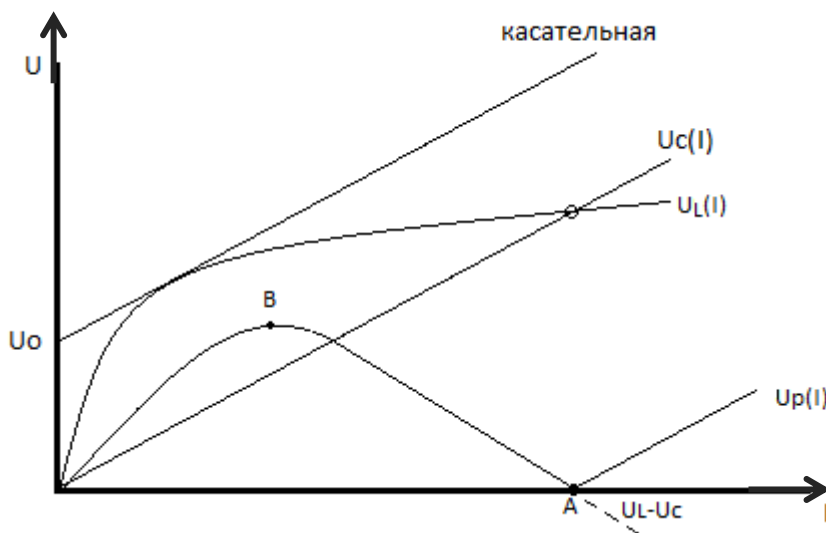


Рис. 13.1.

Если не учитывать потерь в цепи, то напряжение на ее зажимах не будет содержать активной составляющей

$$|K| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\omega^2 \cdot R^2 \cdot C^2}}} \quad \varphi = \arctg \frac{1}{\omega \cdot R \cdot C} \quad (13.1)$$

$$\underline{U} = \underline{U}_P = \underline{U}_L + \underline{U}_C \text{ или } U_P = |U_L - U_C|$$

Так как напряжение на индуктивности  $U_L$  опережает ток  $I$  на УГОЛ  $\frac{\pi}{2}$ , а напряжение на емкости  $U_C$  отстает от тока на тот же угол.

ВАХ емкости имеет вид прямой, проходящей через начало координат рис.13.1. На том же рисунке построена и характеристика всей цепи, соответствующая уравнению

$$U_P(I) = |U_L(I) - \frac{I}{\omega C}| \quad (13.2)$$

Точка А этой характеристики и соответствует режиму резонанса напряжений. Точка В является экстремальной точкой характеристики  $U_P(I)$ , поэтому здесь

$$\frac{dU_P(I)}{dI} = \frac{dU_L(I)}{dI} - \frac{dU_C(I)}{dI} = 0 \quad (13.3)$$

или

$$\frac{dU_L(I)}{dI} = \frac{1}{\omega C}$$

То есть наклон касательной к кривой  $U_L(I)$  равен наклону ВАХ конденсатора.

При этом касательная отсекает на оси ординат отрезок  $U_0$ , равный напряжению  $U$  в точке В. Эти соображения позволяют подобрать такую емкость, которая обеспечивала заданное экстремальное значение напряжения. Для этого нужно из точки на оси напряжений с координатой, равной заданному напряжению  $U_0$  провести касательную к известной ВАХ катушки  $U_L(I)$ . Затем из начала координат провести прямую, параллельную касательной - это и будет ВАХ искомой емкости. В каждой точке этой характеристике

$$\frac{U_C(I)}{I} = X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (13.4)$$

откуда легко найти значение емкости.

Экспериментально кривую  $U_P(I)$  можно снять только при питании от источника тока. Если же питание осуществляется от источника напряжения, то при плавном изменении действующего значения напряжения в цепи наблюдается триггерный эффект.

При плавном увеличении действующего значения напряжения от нуля до  $U = U_1$  ток также плавно увеличивается. Если напряжение увеличивать дальше, то при  $U = U_1$  произойдет скачкообразное увеличение действующего значения тока с  $I_1$  до  $I_2$ . При плавном уменьшении напряжения с  $U > U_1$  до  $U = U_2$  ток уменьшается плавно. Если напряжение уменьшать дальше, то при  $U = U_2$  происходит скачок тока с  $I_3$  до  $I_4$ . Одновременно происходят и скачкообразные изменения угла сдвига фаз между эквивалентными синусоидами напряжения и тока в цепи.

В реальной же катушке имеются активные потери в стали и меди. Если учесть их постоянным сопротивлением  $R$ , включенным последовательно с индуктивностью, то в приложенном напряжении будет активная составляющая  $U_a = IR$ .

Тогда  $U^2 = U_a^2 + U_p^2$ , так как на векторной диаграмме  $U_a$  и  $U_p$  являются катетами треугольника, гипотенуза которого  $U$ . Кривая  $U(I)$  и прямая  $U_a(I)$  показаны на рис. 13.2.

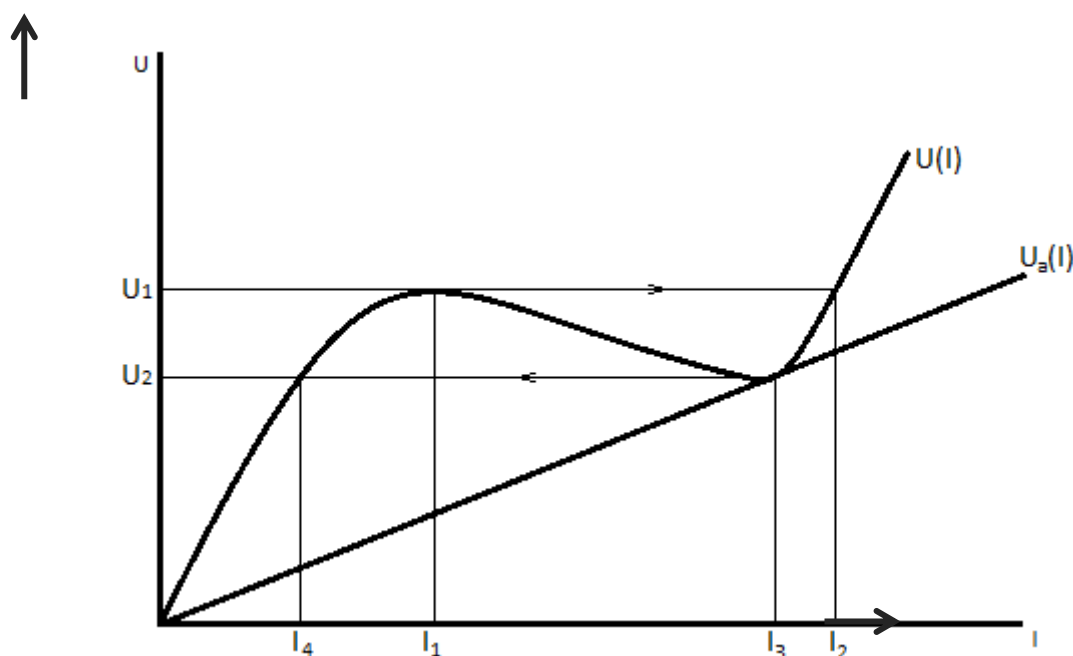


Рис.13.2.

При больших токах крутизна суммарной вольт-амперной характеристики  $U(I)$  значительно меньше крутизны характеристики  $U_p(I)$  рис.13.1. Этот эффект используется для стабилизации выходного напряжения, которое снимается с катушки, когда входное напряжение изменяется в значительных пределах.

#### Порядок выполнения работы:

1. Аналитическое исследование

1.1. Снять  $BAHI = f(U)$  нелинейной катушки индуктивности  $L$  в пределах от 0 до 200 В. После насыщения сердечника ток катушки растет быстро. Во время опыта он не должен превышать 4.5 А.

1.2. Построить ВАХ катушки.

1.3. По заданному преподавателем значению экстремального напряжения  $U_0$  рассчитать емкость  $C$  при помощи построения для нее ВАХ.

1.4. Построить суммарную ВАХ для последовательно соединенных нелинейной катушки и расчётной емкости  $C$ .

## 2. Экспериментальное исследование

2.1. Собрать цепь по схеме рис. 13.3, состоящую из последовательного соединения катушки  $L$  и расчетной емкости  $C$ .

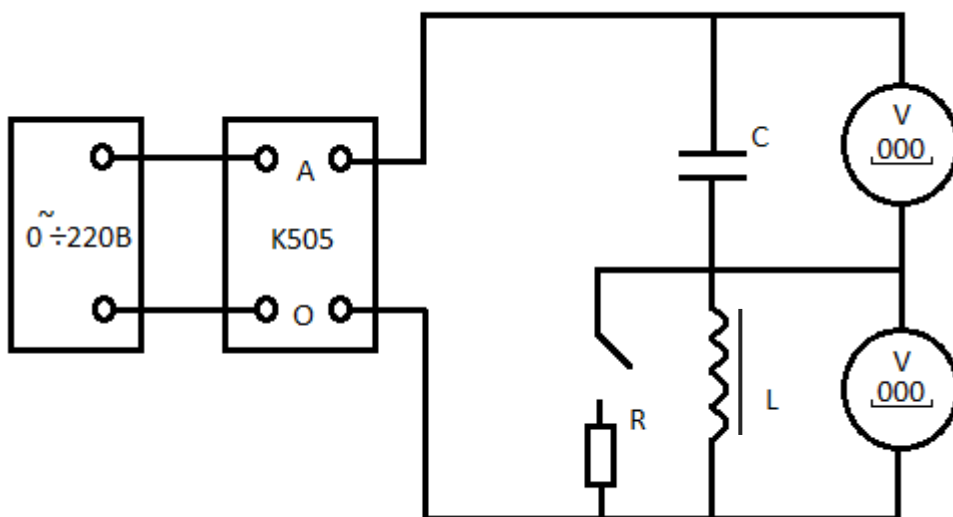


Рис. 13.3

2.2. Результаты измерений занести в таблицу 13.1. Начертить экспериментальную ВАХ на миллиметровку и сравнить с расчётной.

Примечание: в области скачка токов напряжение изменять медленно, чтобы снять характеристику как можно точнее.

2.3. Снять ВАХ для сопротивления, включив его параллельно катушке индуктивности, равного  $R=600$  Ом и  $R=300$  Ом. Результаты измерений занести в таблицу.

Таблица 13.1 – Феррорезонанс напряжений

U	I	U <sub>c</sub>	U <sub>L</sub>
В	А	В	В
20			
30			
.			
.			
.			
110			
.			
.			
.			
30			
20			

2.4. Построить график  $U_L = f(U)$ , отражающий стабилизирующие возможности схемы смешанного соединения для сопротивления нагрузки  $R = \infty, R = 600 \text{ Ом}, R = 300 \text{ Ом}$ .

Контрольные вопросы:

1. При каких условиях может быть получен режим феррорезонанса напряжений?
2. Почему возникают скачки тока и фазы при феррорезонансе напряжений, как можно их исключить?
3. Почему напряжение на нелинейной катушке стабилизируется?
4. Почему феррорезонанс напряжений возникает при изменении питающего напряжения?
5. При какой величине емкости получение феррорезонанса напряжений невозможно?
6. Как получить суммарную ВАХ последовательно соединенных резистора, нелинейной катушки индуктивности и линейного конденсатора?
7. В чем заключается отличие суммарной теоритической и реальной ВАХ нелинейной катушки и конденсатора?
8. Какой метод достижения резонанса использовался в работе?
9. В каких устройствах могут быть использованы скачки напряжения?



## Лабораторная работа № 14

### ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

#### Цель работы:

Экспериментально исследовать переходные процессы в цепях первого ( $RC$ -цепь) и второго ( $RLC$ -цепь) порядков.

#### Сведения из теории:

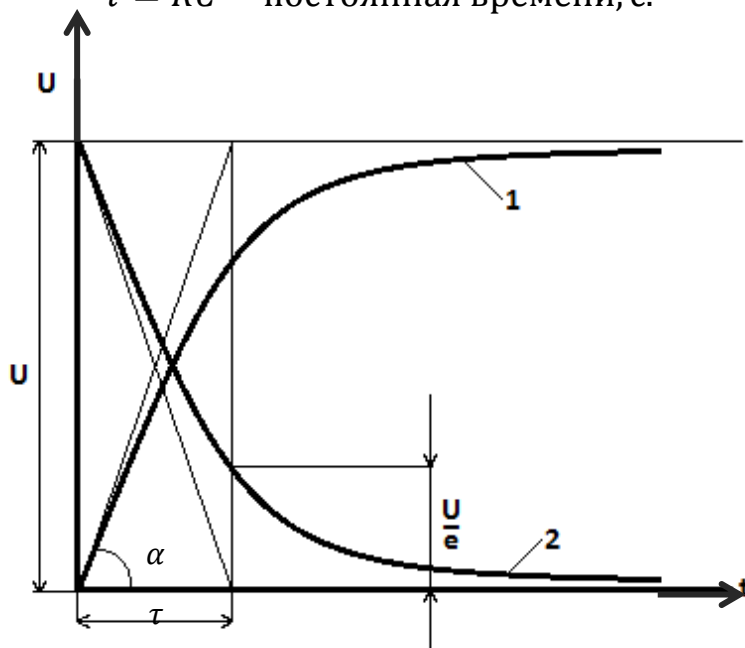
Переходный процесс в электрической цепи описывается дифференциальными уравнениями, составленными по законам Кирхгофа относительно мгновенных значений токов и напряжений. Решение этих уравнений с учетом начальных условий (токов в индуктивностях и напряжений на емкостях в момент коммутации – момент начала переходного процесса) позволяет определить законы искомых величин.

Так при подключении линейной  $RC$ -цепи к источнику постоянного напряжения  $U$  получаем дифференциальное уравнение первого порядка, в результате решения которого закон изменения напряжения на емкости при заряде конденсатора имеет вид (рис.14.1, кривая 1):

$$U_C = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (14.1)$$

а при разрядке на  $R$   $U_C = Ue^{-\frac{t}{\tau}}$ , (рис.14.1, кривая 2).  
где  $U$  – напряжение источника, В;

$\tau = RC$  – постоянная времени, с.



$$tg\alpha = \frac{dU(0)}{dt} = \frac{U}{\tau}$$

Рис. 14.1

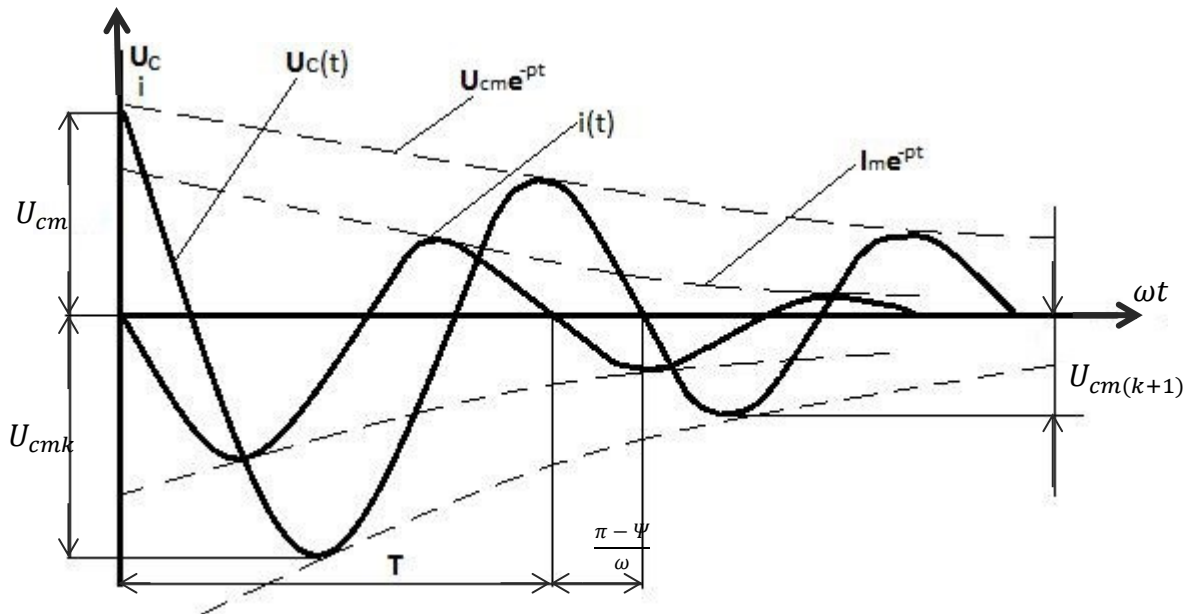


Рис.14.2

Цепь, состоящая из двух реактивных элементов, например  $LC$ , описывается дифференциальным уравнением второго порядка.

Отключая  $RLC$ -цепь от источника постоянного напряжения, получаем переходный процесс, который можно описать дифференциальным уравнением:

$$iR + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = 0 \quad (14.2)$$

$$\frac{d^2 U_C}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{dU_C}{dt} + \frac{1}{LC} U_C = 0 \quad (14.3)$$

Характеристическое уравнение этой цепи

$$p^2 + p \frac{R}{L} + \frac{1}{LC} = 0 \quad (14.4)$$

Корни характеристического уравнения

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2 \cdot L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4 \cdot L^2} - \frac{1}{L \cdot C}} \quad (14.5)$$

Характер разряда конденсатора зависит от корней характеристического уравнения:

1. Если  $\left(\frac{R}{2L}\right)^2 > \frac{1}{LC}$ , то  $p_1$  и  $p_2$  действительные числа. В этом случае напряжение на конденсаторе и ток в цепи заряда меняются плавно во времени и их можно описать уравнениями:

$$U_C(t) = E(p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}) / (p_2 - p_1) \quad (14.6)$$

$$(t) = Ep_1p_2(e^{p_1t} - e^{p_2t})/(p_2 - p_1$$

Такой характер разряда конденсатора называется апериодическим.

$$2. \text{ Если } \left(\frac{R}{2L}\right)^2 = \frac{1}{LC}, \text{ то } p_1 = p_2 = -\frac{R}{2L} \text{ и } R = R_k = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$$

В этом случае напряжение на конденсаторе и ток в цепи разряда описываются уравнениями:

$$\begin{aligned} U_C(t) &= E(1 - pt)e^{pt} \\ i(t) &= -Et \frac{e^{pt}}{L} \end{aligned} \quad (14.7)$$

Получаем предельный случай апериодического разряда конденсатора. Сопротивление цепи заряда  $R$  при этом равно критическому  $R_k$ .

$$3. \text{ Если } \left(\frac{R}{2L}\right)^2 < \frac{1}{LC}, \text{ то } p_{1,2} = -\beta \pm j\omega,$$

где  $\beta = \frac{R}{2L}$  – коэффициент затухания;

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} \text{ – угловая частота свободных колебаний.}$$

В этом случае возникает периодический (колебательный) разряд конденсатора. Напряжение на конденсаторе и ток в цепи разряда можно описать уравнениями:

$$\begin{aligned} U_C(t) &= \frac{E}{\sin\Psi} e^{-\beta t} \sin(\omega t + \varphi) \\ i(t) &= \frac{-E}{\omega L} e^{-\beta t} \sin\omega t \end{aligned} \quad (14.8)$$

$$\text{где } \Psi = \arctg \frac{\omega}{\beta}$$

Если известна емкость конденсатора  $C$ , то по кривым напряжения на емкости  $U_C(t)$  и тока разряда  $i(t)$  (рис.14.2), можно определить период колебаний  $T$ , угловую частоту  $\omega$ , коэффициент затухания  $\beta$ , а также активное сопротивление и индуктивность контура разряда.

Периодом  $T$  называется время, за которое происходит одно полное колебание. Его можно непосредственно измерить на оси времени (рис.14.2).

При определении  $\beta$ , находим отношение кривых напряжения и тока в точках соприкосновения с экспонентами:

$$\frac{U_{cmk}}{U_{cm(k+1)}} = \frac{U_{cm}e^{-\beta t}}{U_{cm}e^{-\beta(t+T)}} = e^{\beta T} \quad (14.9)$$

$$\beta = \frac{1}{T} \ln \frac{U_{cmk}}{U_{cm(k+1)}}$$

#### Порядок выполнения работы:

1. Экспериментально определить законы изменения напряжения  $u_C$  и тока  $i$  в  $RC$ -цепи

1.1. Собрать цепь, изображенную на рис.14.3. Переключатель поставить в режим  $RC$ .

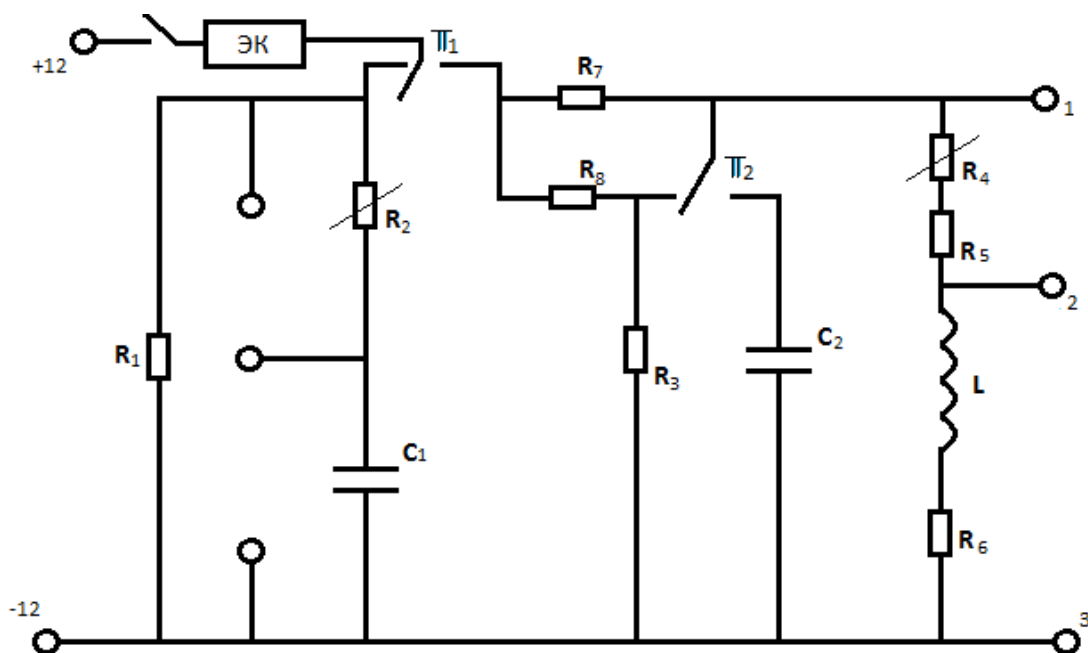


Рис. 14.3

1.2. Снять откалиброванные по напряжению и времени осциллограммы тока  $i$  и напряжения  $u_C$  для двух значений сопротивления резистора  $R_2$  10 кОм и 20 кОм при  $C_1 = 0.01$  мкФ.

1.3. С осциллограммы определить постоянную времени  $\tau$  и сопоставить ее с расчетным значением, заполнить таблицу 14.1.

Таблица 14.1 –  $RC$ -цепь

	R	C	$U_{cm}$	$\tau_{расч.}$	$\tau_{опытн.}$
№ п/п	кОм	мкФ	В	С	С

2. Экспериментально определить законы изменения напряжения  $u_L$  и тока  $I$  в  $RLC$ -цепи.

2.1. Перевести цепь, представленную на рис.14.3, в режим  $LC$ .

2.2. Снять откалиброванные по напряжению и времени осциллограммы тока  $I$  и напряжения  $u_L$  для двух значений сопротивлений  $R_4$  0 и 1 кОм при  $C=0.01$  мкФ.

2.3. По осциллограммам определить  $T$ ,  $\beta$  и  $\omega$  и полученные значения занести в таблицу 14.2. Сравнить с расчетными значениями.

2.4. Плавно изменяя сопротивление  $R_4$  определить переход от апериодического процесса к периодическому режиму. Замерить критическое сопротивление. Рассчитать критическое сопротивление и сопоставить с измеренным.

Таблица 14.2 -  $RLC$ -цепь

№ п/п	Результаты расчета				Результаты опыта			
	T	$\omega$	$\beta$	$R_k$	T	$\omega$	$\beta$	$R_k$
	с	рад/с	1/с	кОм	с	рад/с	1/с	кОм

#### Дополнительные требования к содержанию отчета:

К отчету приложить все осциллограммы, начерченные в масштабе напряжения и времени.

#### Контрольные вопросы:

1. Почему возникают переходные процессы?
2. Определение постоянной времени  $RC$  –цепи по осциллограмме.
3. Условие возникновения колебательного процесса.
4. Какие из электрических величин не могут изменяться скачком в момент коммутации?.
5. От чего зависит порядок дифференциального уравнения?

6. Что вызывает переходные процессы в цепях второго порядка?
7. Как составляется характеристическое уравнение?
8. Как зависит ток данной цепи  $i(t)$  от корней характеристического уравнения?
9. Как зависит напряжение конденсатора  $u_C(t)$  от корней характеристического уравнения?
10. Как по кривым  $u_C(t)$  и  $i(t)$  определяется период колебаний  $T$ , угловая частота  $\omega$  и коэффициент затухания  $\beta$ ?

## Рекомендуемая литература

### 1. Основная литература

1.1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. – Москва: Юрайт, 2016.

1.2. Теоретические основы электротехники. т.1, т.2. Учебник для студентов вузов / К.С. Демирчян, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин – Санкт-Петербург: Питер, 2003.

1.3. Сборник задач по теоретическим основам электротехники. / Л.А. Бессонов, И.Г. Демидова, М.Е. Заруди. - Москва: Высшая школа, 2002.

### 2. Дополнительная литература

2.1. Поливанов К.М. Теоретические основы электротехники. – Москва: Энергия, 1974.

2.2. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники. Учеб. пособие для вузов / П.А. Ионкина. – Москва: Энергоиздат, 1982.

Локальный электронный методический материал

Сивухо Марина Эрнстовна

## **ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

*Редактор И. Голубева*

Локальное электронное издание

Уч.-изд. л. 6,5. Печ. л. 5,5.

Федеральное государственное  
бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Калининградский государственный технический университет»,  
236022, Калининград, Советский проспект, 1