

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов специальностей
6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов
и производств»
и 6-05-0716-03 «Информационно-измерительные приборы
и системы»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2024

УДК 537.8
ББК 31.21
Т45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «7» марта 2024 г.,
протокол № 8

Составители: канд. техн. наук. Н. В. Герасименко;
канд. техн. наук, доц. В. Ф. Гоголинский;
канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Рецензент канд. физ.-мат. наук С. О. Парашков

Изложена методика выполнения лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники», даны схемы, рекомендации по оформлению отчета и контрольные вопросы к защите.

Учебное издание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

Ответственный за выпуск	А. В. Хомченко
Корректор	А. Т. Червинская
Компьютерная верстка	М. М. Дударева

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 36 экз. Заказ № .

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2024

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Инструктаж по технике безопасности при работе в лаборатории ТООЭ.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Исследование соотношений в линейных электрических цепях постоянного тока.....	6
3 Лабораторная работа № 3. Исследование эквивалентного генератора в цепи постоянного тока.....	8
4 Лабораторная работа № 4. Исследование электрической цепи переменного тока (исследование пассивного двухполюсника в цепи переменного тока).....	11
5 Лабораторная работа № 5. Исследование резонансных явлений в линейных электрических цепях.....	16
6 Лабораторная работа № 6. Исследование электрической цепи с индуктивной связью.....	19
7 Лабораторная работа № 7. Исследование трехфазной цепи, соединенной звездой.....	23
8 Лабораторная работа № 8. Исследование трехфазной электрической цепи, соединенной треугольником.....	25
9 Лабораторная работа № 9. Исследование линейной цепи периодического несинусоидального тока.....	27
10 Лабораторная работа № 10. Исследование переходных процессов в линейных цепях с источниками постоянного напряжения (исследование переходных процессов в линейных электрических цепях).....	28
11 Лабораторная работа № 11. Исследование интегрирующих и дифференцирующих цепей.....	32
12 Лабораторная работа № 12. Исследование цепей с нелинейными резистивными сопротивлениями (исследование нелинейной электрической цепи постоянного тока).....	34
13 Лабораторная работа № 13. Исследование нелинейной электрической цепи переменного тока.....	37
Список литературы.....	39

Введение

Методические рекомендации необходимы для самостоятельной подготовки и проведения лабораторных работ с последующим оформлением и анализом результатов. Для получения допуска к очередным занятиям студент предварительно изучает содержание лабораторной работы, выполняет соответствующие задания для внеаудиторной подготовки и *представляет законченный отчет по предыдущей работе*. К выполнению лабораторных работ студенты допускаются после ознакомления с правилами и инструкцией по технике безопасности и инструктажа по безопасным методам работы на лабораторном оборудовании с оформлением соответствующей записи в журнале.

Лабораторные работы выполняются на универсальных лабораторных стендах. Перед сборкой схемы студент ознакомляется с оборудованием, относящимся к данной работе, составляет таблицу применяемых приборов с указанием наименования, системы, класса точности прибора и цены деления шкалы.

Запрещается включение стенов без разрешения преподавателя!

На основании полученных экспериментальных данных студенты выполняют расчеты параметров схем замещения, строят графики и векторные диаграммы токов и напряжений для исследуемых режимов работы электрических цепей и весь материал предоставляют для проверки преподавателю. Оформление отчетов выполняется в соответствии с действующими нормами и стандартами *каждым студентом индивидуально*.

Студентам рекомендуется распечатать и заполнять специализированный *лабораторный журнал*, содержащий заготовки для всех лабораторных работ. Это упростит оформление отчета и позволит сосредоточиться на содержательной части лабораторной работы.

1 Лабораторная работа № 1. Инструктаж по технике безопасности при работе в лаборатории ТОО

Цель работы: ознакомление с лабораторией электротехники и изучение требований безопасной работы.

Работа в лаборатории «Теоретические основы электротехники», связанная с эксплуатацией оборудования, находящегося под напряжением, требует организации и строгого соблюдения требований безопасности. Вопросы безопасности отражаются в инструкциях по эксплуатации, которыми снабжено оборудование, а также содержатся в утвержденной кафедрой инструкции, копии которых имеются на рабочих местах и у преподавателя. С целью предотвратить возможность поражения электрическим током при работе с оборудованием необходимо выполнять следующие требования безопасности.

1 К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности с последующей проверкой знаний и регистрацией в соответствующем протоколе.

2 Студенту разрешается выполнение только той лабораторной работы, задание на которую выдал преподаватель.

3 Приступая к лабораторной работе, студент обязан ознакомиться с методикой ее выполнения.

4 Сборка электрической схемы для лабораторной работы и ее изменение производятся *только при отключенном напряжении*.

5 Переносное оборудование, необходимое для выполнения лабораторных работ (осциллографы, измерительные комплекты, трансформаторы, измерительные приборы), подключается к сети согласно требованиям инструкции по эксплуатации.

6 Включение собранной схемы выполняется *только после проверки преподавателем или инженером лаборатории*.

7 Включение питания оборудования производится одной рукой. Запрещено касаться металлических токоведущих частей соединительных проводов и кабелей осциллографа.

8 О любой обнаруженной неисправности лабораторного оборудования необходимо немедленно сообщить преподавателю или инженеру лаборатории.

При выполнении лабораторных работ *запрещается* следующее.

1 Без разрешения перемещать оборудование, выносить его из лаборатории.

2 Оставлять без присмотра включенные стенды и приборы.

3 Загромождать рабочие места посторонними предметами.

4 *Находиться в лаборатории в верхней одежде. В зимнее время в учебном корпусе работает гардероб.*

2 Лабораторная работа № 2. Исследование соотношений в линейных электрических цепях постоянного тока

Цель работы: экспериментальное подтверждение законов линейных электрических цепей постоянного тока. Исследовать принцип суперпозиции и свойства взаимности.

2.1 Порядок выполнения работы

1 Измерить величину ЭДС «E1» при помощи вольтметра «V1» на лицевой панели учебного стенда. Установить при помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) величину ЭДС «E2», равной измеренному значению.

2 Собрать схему, представленную на рисунке 2.1.

3 Выполнить измерения токов в ветвях схемы.

Перед тем, как выполнить измерения, необходимо определить цену деления шкалы аналоговых измерительных приборов. Большинство измерительных приборов в составе учебного стенда могут работать в двух диапазонах измерения, что нужно учитывать.

4 Принимая потенциал точки «a» на схеме (см. рисунок 2.1) равным нулю, выполнить измерения потенциалов точек «b», «c», «d», «e», «f» с учетом знаков. Используя результаты измерения, с помощью закона Ома определить сопротивления ветвей цепи и внутренние сопротивления источников ЭДС. Измерить напряжения между узлами (U_{ab} , U_{ac} и т. д.). Результаты занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Измерения и расчеты (опыт 1)

Измерено																
E_1 , В	E_2 , В	φ_b , В	φ_c , В	φ_d , В	φ_e , В	φ_f , В	U_{ab} , В	U_{ac} , В	U_{bd} , В	U_{be} , В	U_{dc} , В	U_{ef} , В	U_{af} , В	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А

Продолжение таблицы 2.1

Рассчитано								
R_1 , Ом	R_2 , Ом	R_3 , Ом	R_4 , Ом	R_5 , Ом	$R_{вн1}$, Ом	$R_{вн2}$, Ом	ΣE , В	ΣIR , В

5 Определить сумму падений напряжений на участках внешнего контура (содержащего оба источника ЭДС) и сравнить ее с алгебраической суммой ЭДС. Для измеренных значений потенциала построить потенциальную диаграмму. Используя потенциальную диаграмму, определить напряжение U_{ad} и токи I_1 , I_2 по формуле

$$\operatorname{tg}(\beta) = I \cdot \frac{m_R}{m_\varphi}, \quad (2.1)$$

где m_R – масштаб сопротивлений;
 m_φ – масштаб потенциала.

Сравнить измеренные значения потенциалов с теоретическими.

6 Исследовать принцип суперпозиции. Для этого отключить при помощи тумблера ЭДС «E2», а ЭДС «E1» оставить включенным. Измерить токи в ветвях (если стрелка амперметра отклоняется до предела влево, следует переключить полярность при помощи тумблера «+/-» и записать в отчет значение со знаком «минус»). Повторить процедуру, меняя местами «E1» и «E2». Суммировать алгебраически частичные токи и сравнить полученные значения с результатами измерения токов из первого опыта. Заполнить таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Измерения и расчеты (опыт 2)

Измерено								Рассчитано		
E_1 , В	I_{11} , А	I_{21} , А	I_{31} , А	E_2 , В	I_{12} , А	I_{22} , А	I_{32} , А	I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А

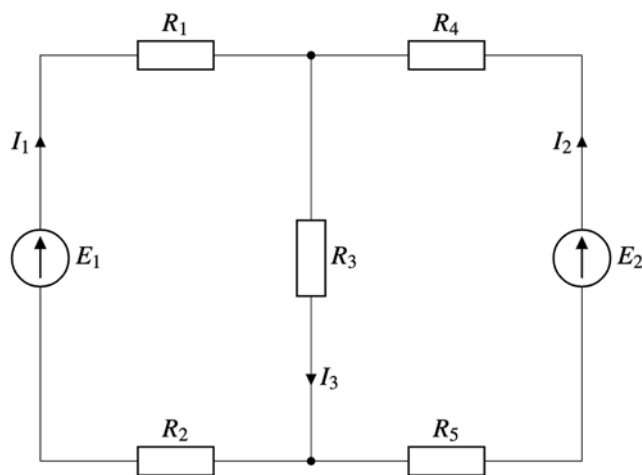
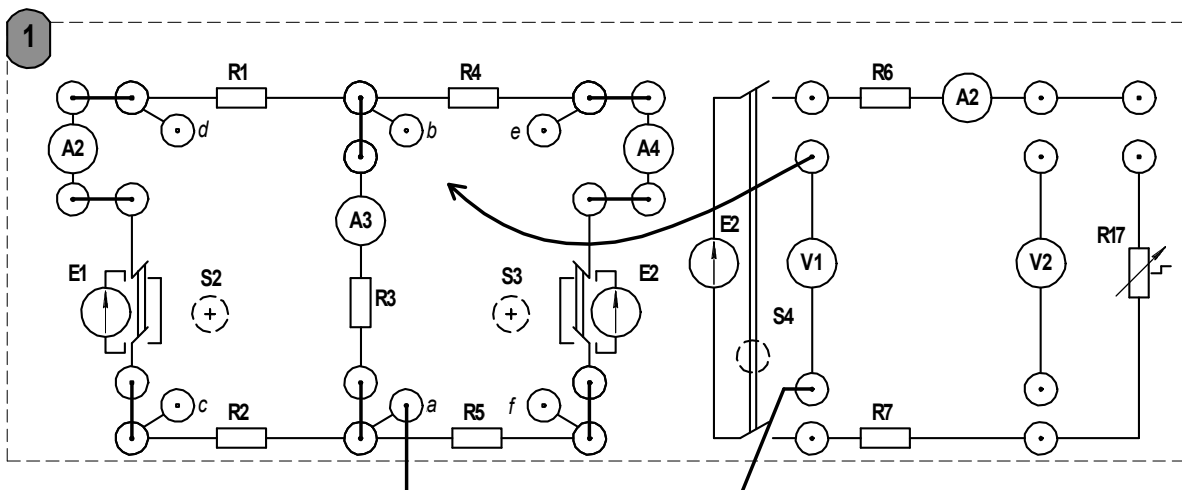


Рисунок 2.1 – Схема для измерения потенциалов в узлах

7 На основании данных, полученных в опыте 2, выполнить проверку принципа взаимности. Для этого необходимо вычислить значения собственных g_{ii} и взаимных g_{ij} проводимостей.

$$g_{ii} = \frac{I_i}{E_i}; \quad g_{ij} = g_{ji} = \frac{I_j}{E_i}. \quad (2.2)$$

Применяя формулы (2.2), вычислить собственную и взаимную проводимости теоретически. Сравнить полученные результаты.

Рассчитать ток I_1 и сравнить результат с полученным в опыте 1.

$$I_1 = E_1 g_{11} - E_2 g_{12}. \quad (2.3)$$

8 Составить баланс мощности для цепи, используя результаты опыта 1.

$$\sum E \cdot I = \sum I^2 R. \quad (2.4)$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать: цель работы, схемы исследуемых электрических цепей, ход расчетов и заполненные таблицы, потенциальную диаграмму, вывод о проделанной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Сформулируйте определение узла, ветви и контура электрической цепи.
- 2 Сформулируйте правила Кирхгофа и порядок расчета цепи постоянного тока.
- 3 Сформулируйте принцип суперпозиции и основанный на нем метод расчета цепи постоянного тока.
- 4 Что такое собственная и взаимная проводимости? Как определить их экспериментально?

3 Лабораторная работа № 3. Исследование эквивалентного генератора в цепи постоянного тока

Цель работы: исследование режимов работы электрической цепи, представленной активным двухполюсником. Изучение условий передачи энергии от активного двухполюсника к нагрузке.

3.1 Порядок выполнения работы

- 1 Экспериментально получить значение тока в ветви «*b e f a*» методом активного двухполюсника для анализа состояния электрической цепи на примере

схемы, представленной на рисунке 3.1, считая ветвь « $a b e f$ » выделенной. Методика эксперимента заключается в следующем. Выделенную ветвь исключают из схемы (см. рисунок 3.1), затем выполняют опыты холостого хода и короткого замыкания, из которых определяют значения U_{xx} и I_k . По результатам опытов холостого хода и короткого замыкания определяют входное сопротивление двухполюсника по формуле

$$R_{ex} = \frac{U_{xx}}{I_k} \quad (3.1)$$

2 Используя значения сопротивлений из лабораторной работы № 2, рассчитать аналитически входное сопротивление и сравнить результат с полученными по формуле (3.1). Рассчитать аналитически ток в исключенной ветви. Результаты занести в таблицу 3.1.

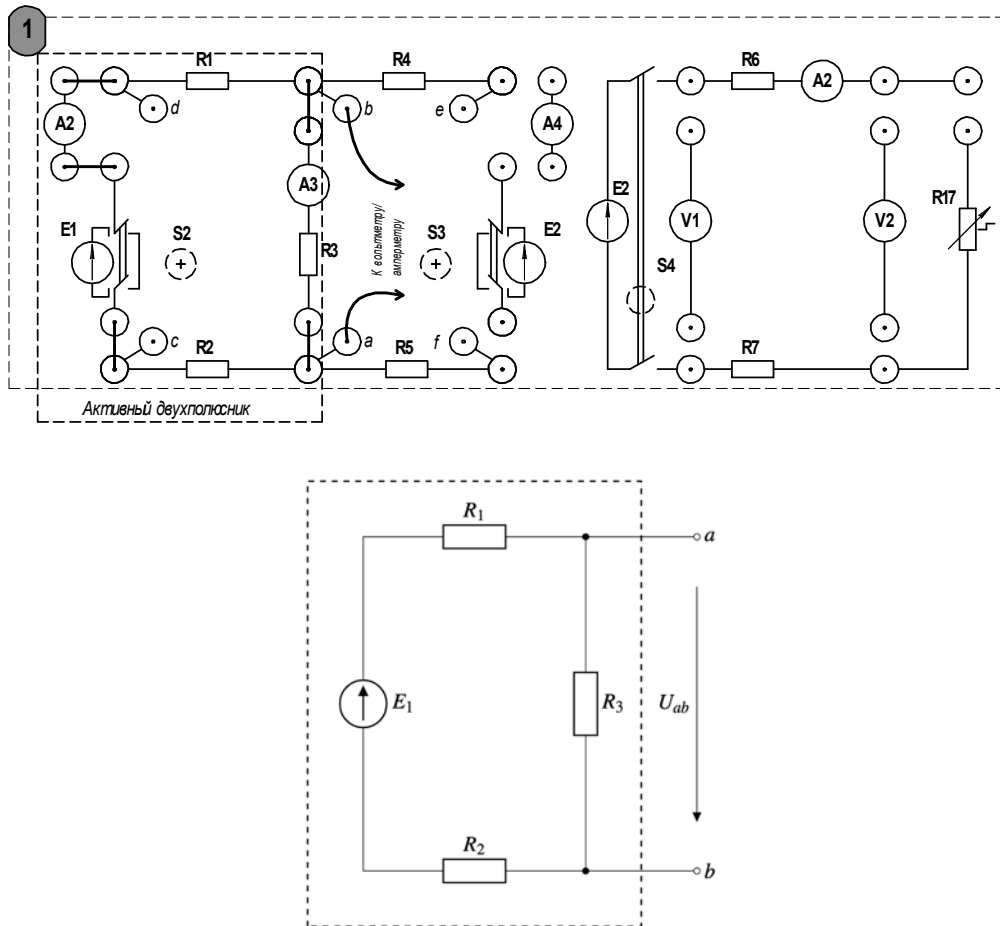


Рисунок 3.1 – Схема для исследования активного двухполюсника (опыт 1)

3 Собрать схему, представленную на рисунке 3.2. С помощью данной схемы исследовать условия передачи энергии от генератора к нагрузке.

Изменяя значение «R17» от нуля до максимального доступного на стенде значения, фиксировать показание вольтметров «V1» и «V2», а также амперметра «A2».

Содержание отчета

Отчет должен содержать схемы исследуемых электрических цепей с указанием активного двухполюсника, ход вычислений и заполненные таблицы, графики зависимостей, указанные в п. 3.

Контрольные вопросы

- 1 Что называют активным двухполюсником?
- 2 Какими параметрами характеризуется активный двухполюсник? Как определить эти параметры экспериментально и аналитически?
- 3 Сформулируйте теорему Тевенена об эквивалентном генераторе.
- 4 Изложите методику расчета тока выделенной ветви методом эквивалентного генератора.

4 Лабораторная работа № 4. Исследование электрической цепи переменного тока (исследование пассивного двухполюсника в цепи переменного тока)

Цель работы: экспериментальное подтверждение основных положений теории линейных электрических цепей переменного синусоидального тока.

4.1 Порядок выполнения работы

1 Определить параметры одноэлементных пассивных двухполюсников, для чего необходимо произвести измерения тока, напряжения и мощности согласно схемам, представленным на рисунках 4.1–4.3, затем, используя формулы (4.1)–(4.5), рассчитать неизвестные параметры элементов пассивного двухполюсника. К таким параметрам относятся: сопротивление резистивного элемента R , индуктивность катушки L и активное сопротивление ее обмотки R_L , емкость конденсатора C .

$$R = \frac{P}{I^2}, \quad (4.1)$$

где R – активное сопротивление, Ом;
 P – активная мощность, Вт;
 I – действующее значение тока, А.

$$z = \frac{U}{I}, \quad (4.2)$$

где U – действующее значение напряжения (устанавливается при помощи лабораторного автотрансформатора по указанию преподавателя), В;
 z – полное сопротивление, Ом.

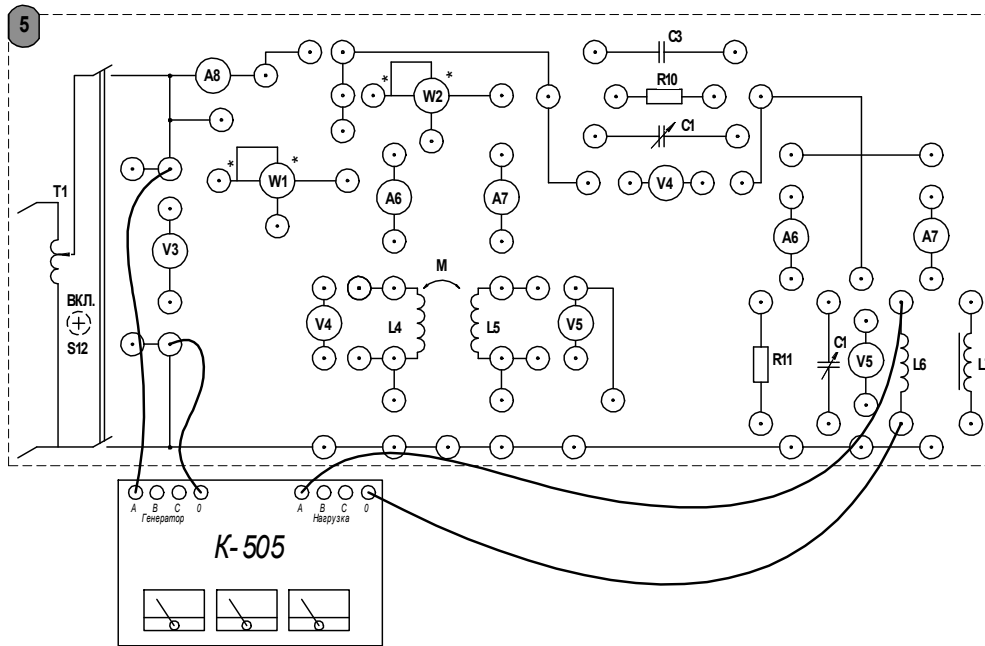


Рисунок 4.3 – Схема для исследования параметров катушки индуктивности

$$X_{L,C} = \sqrt{z^2 - R^2}, \quad (4.4)$$

где $X_{L,C}$ – реактивное сопротивление индуктивности или емкости, Ом.

$$L = \frac{X_L}{\omega}; \quad C = \frac{1}{\omega \cdot X_C}, \quad (4.5)$$

где L – индуктивность катушки, Гн;

C – емкость конденсатора;

ω – угловая частота колебаний тока: для бытовой электрической сети $\omega = 314$ рад/с.

Результаты измерений и параметры элементов необходимо занести в таблицу 4.1. Анализируя полученные результаты, показать, можно ли пренебречь активной составляющей сопротивления в случае индуктивности и емкости. Используя материалы лекций или рекомендуемую литературу, построить векторные диаграммы токов и напряжений для каждого из предложенных пассивных двухполюсников.

2 Исследовать по схемам соединений, представленным на рисунках 4.4 и 4.5, один из вариантов многоэлементного пассивного двухполюсника (по указанию преподавателя). Экспериментально определить токи и напряжения в ветвях схемы электрической цепи, а также потребляемую активную мощность. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.1 – Результаты исследования пассивных двухполюсников

Вид двухполюсника	Измерено			Рассчитано					
	I, A	U, B	$P, Вт$	$R, Ом$	$z, Ом$	$X, Ом$	$\varphi, град$	$L, Гн$	$C, мкФ$
R									
L									
C									

Таблица 4.2 – Результаты измерений

I_1, A	I_2, A	I_3, A	U, B	U_1, B	U_{ab}, B	$P, Вт$

3 Используя таблицы 4.1 и 4.2, построить векторную диаграмму токов и напряжений для исследуемого двухполюсника.

4 По результатам измерений (см. таблицу 4.2) определить полное, активное и реактивное сопротивления на входе системы, угол смещения фазы между приложенным напряжением U и током I_1 . Для вычислений следует воспользоваться формулами (4.1) и (4.3). Выполнить расчет цепи аналитически, в комплексной форме, используя параметры элементов из таблицы 4.1. Результаты расчетов занести в таблицу 4.3. Сравнить полученные значения и сделать вывод о проделанной работе.

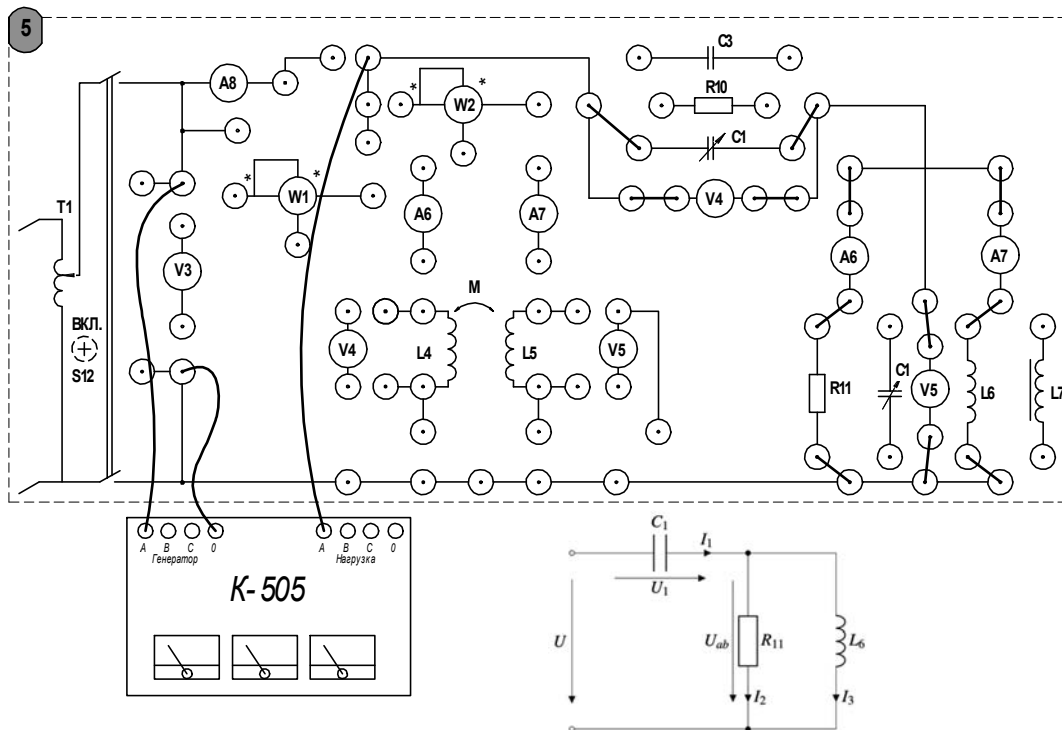


Рисунок 4.4 – Двухполюсник (вариант А)

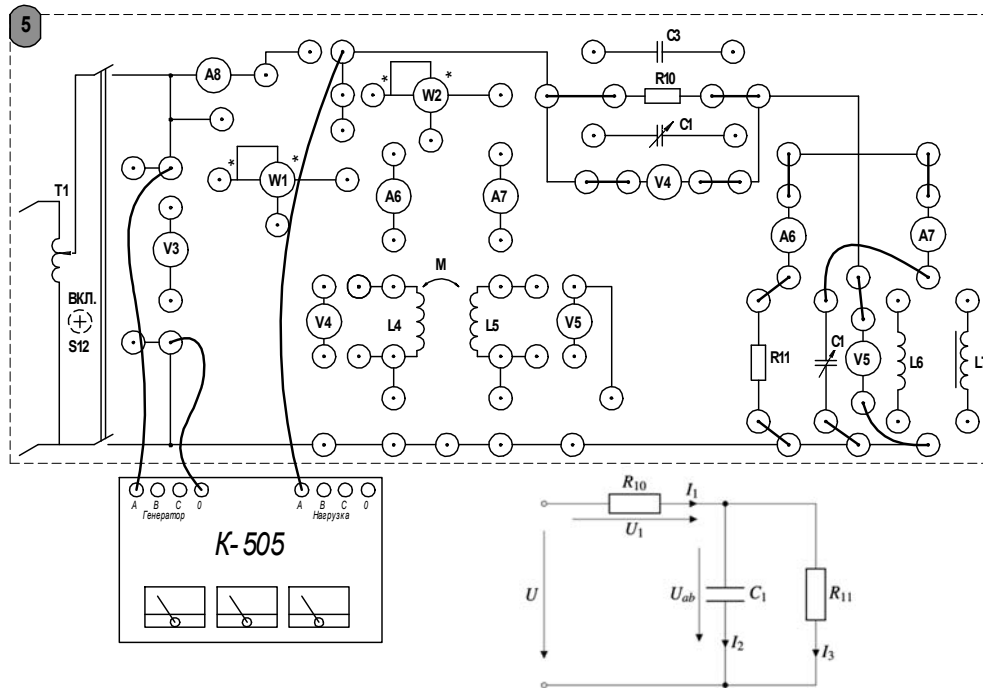


Рисунок 4.5 – Двухполюсник (вариант Б)

Таблица 4.3 – Результаты расчетов сопротивлений и угла смещения фазы

Рассчитано по показаниям приборов				Рассчитано по известным параметрам		
R , Ом	z , Ом	X , Ом	φ , град	R , Ом	X , Ом	φ , град

Содержание отчета

Отчет должен содержать: цель работы, схемы исследуемых двухполюсников, таблицы с результатами экспериментов и расчетов, расчеты параметров двухполюсников, анализ полученных результатов, векторные диаграммы с указанием масштабов, вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Как экспериментально определить параметры произвольного пассивного двухполюсника в цепи переменного тока?
- 2 Что понимают под активной, реактивной и полной мощностями?
- 3 Приведите формулы для вычисления активного и реактивного сопротивлений пассивного двухполюсника.
- 4 Как изменяется фаза тока в цепи, содержащей идеальную катушку индуктивности (идеальный конденсатор)?

3 Исследовать резонанс токов при параллельном соединении элементов R , L , C (рисунок 5.2), изменяя емкость конденсатора при помощи переключателей на стенде. Экспериментально определить значение емкости, при котором наступает резонанс токов. Результаты эксперимента и расчетов занести в таблицу 5.2 и построить графики зависимостей $I(C)$ и $\varphi(C)$.

4 Используя данные из таблиц 5.1 и 5.2, построить векторные диаграммы для резонансных значений C с указанием масштаба. Сравнить полученные диаграммы с векторными диаграммами, полученными на лекционных занятиях для контуров с идеальными реактивными элементами. В выводе о проделанной работе указать, чем обусловлено это несоответствие.

Таблица 5.2 – Результаты исследования резонанса токов

Номер опыта	Измерено				Рассчитано			
	U , В	I_L , В	I_C , В	P , Вт	Y , см	φ , град	b_L , см	b_C , см
1								
2								
3								
4								

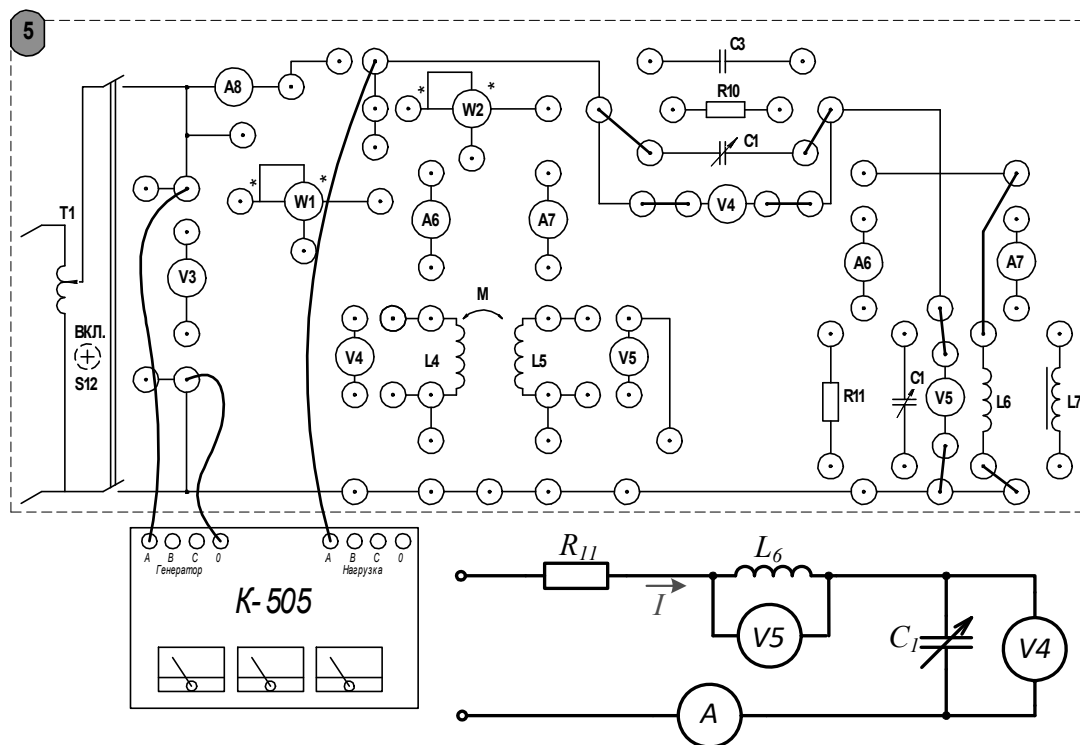


Рисунок 5.1 – Схема для исследования резонанса напряжений

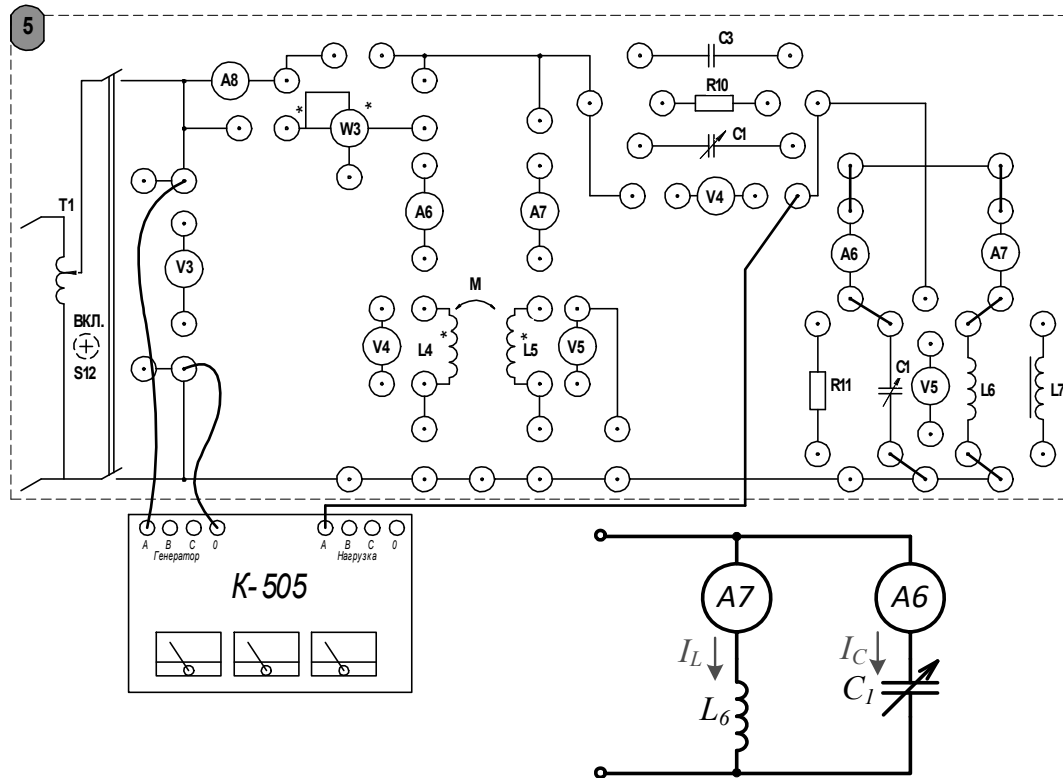


Рисунок 5.2 – Схема для исследования резонанса токов

Содержание отчета

Отчет должен содержать номер и название лабораторной работы, цель работы, таблицы с результатами экспериментов и расчетов, результаты вычислений резонансной емкости и добротности, векторные диаграммы с указанием масштаба, указанные графики зависимостей, вывод о проделанной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Сформулируйте определение резонанса. Каково условие возникновения резонанса в последовательном колебательном контуре?
- 2 В каких цепях возникает резонанс токов? В чем заключается его отличие от резонанса напряжений?
- 3 Что такое добротность колебательного контура? Приведите формулы для вычисления добротности.
- 4 Как изменяется значение $\cos(\varphi)$ по мере приближения к резонансу в последовательном колебательном контуре?

6 Лабораторная работа № 6. Исследование электрической цепи с индуктивной связью

Цель работы: изучить явления в электрических цепях с индуктивной связью. Экспериментально определить параметры индуктивно-связанных элементов, исследовать процесс обмена энергией между контурами посредством магнитного поля.

6.1 Порядок выполнения работы

1 Собрать схему для определения параметров катушек индуктивности, изображенную на рисунке 6.1.

2 Выполнить измерения тока, напряжения и мощности при помощи измерительного комплекта К-505.

3 Используя формулы (4.1)–(4.4), приведенные в лабораторной работе № 4, определить параметры катушек: индуктивность и активное сопротивление обмотки. Результаты эксперимента и вычислений записать в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Параметры катушек индуктивности

Катушка	Измерено			Вычислено				
	U , В	I , А	P , Вт	Z , Ом	R , Ом	X_L , Ом	L , Гн	φ , град
L_4								
L_5								

4 Собрать схему для исследования последовательного согласного соединения катушек, представленную на рисунке 6.2. Выполнить измерения тока, напряжения и мощности при помощи измерительного комплекта К-505. Результаты занести в таблицу 6.2.

5 Собрать схему для исследования последовательного встречного соединения катушек, представленную на рисунке 6.3. Выполнить измерения тока, напряжения и мощности при помощи измерительного комплекта К-505. Результаты занести в таблицу 6.2.

По результатам измерений вычислить параметры цепи и взаимную индуктивность по формуле

$$M = \frac{X_{\text{э.согл}} - X_{\text{э.встр}}}{4\omega}, \quad (6.1)$$

а также коэффициент связи

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_4 L_5}}. \quad (6.2)$$

По данным эксперимента определить начало обмотки катушек, отметить такие зажимы на схеме соответствующим символом.

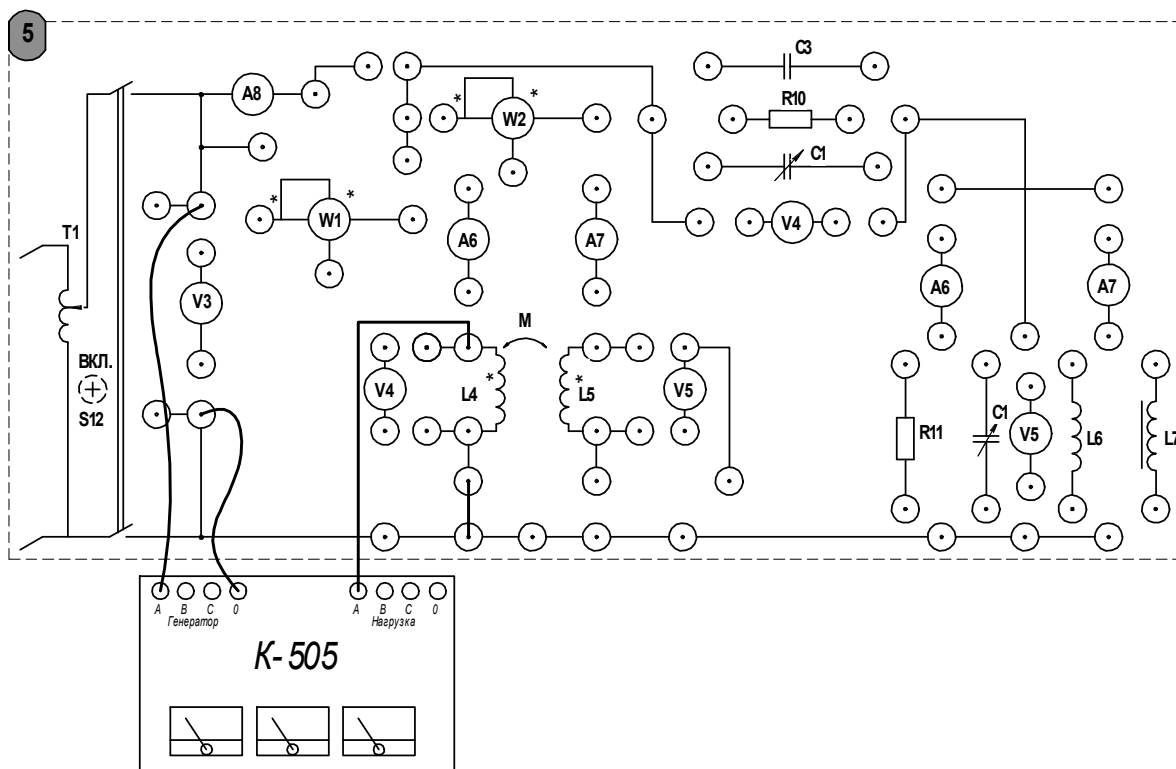


Рисунок 6.1 – Схема для исследования параметров катушек

Таблица 6.2 – Исследование последовательного соединения катушек

Соединение	Измерено					Рассчитано					
	$U, В$	$I, А$	$U_1, В$	$U_2, В$	$P, Вт$	$Z_э, Ом$	$R_э, Ом$	$X_э, Гн$	$M, Гн$	k	$\phi, град$
Встречное											
Согласное											

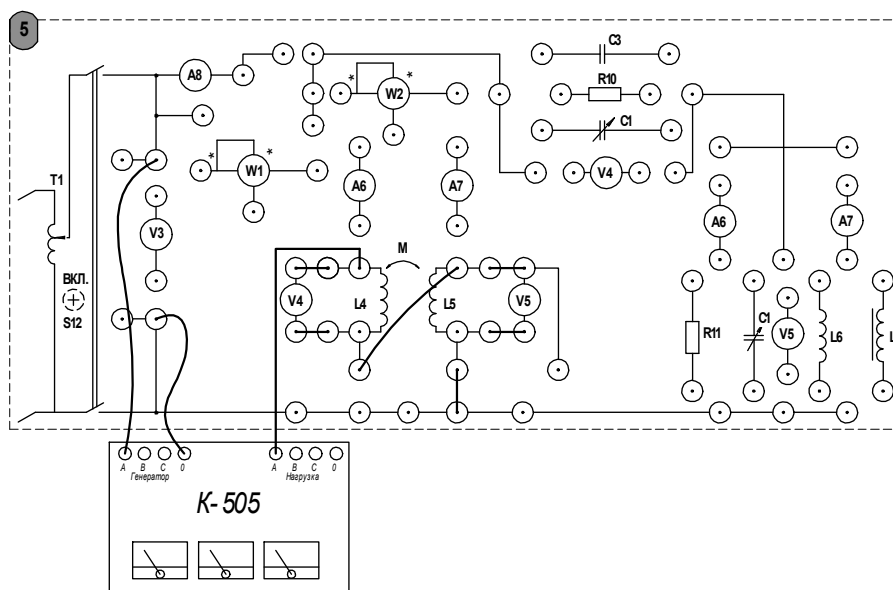


Рисунок 6.2 – Схема последовательного согласного соединения катушек

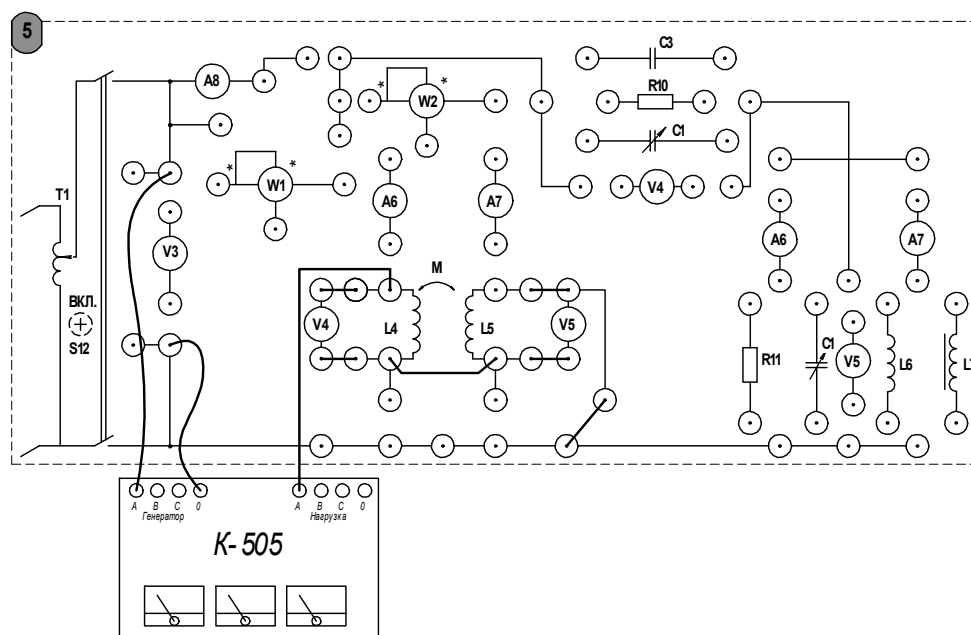


Рисунок 6.3 – Схема последовательного встречного соединения катушек

6 Исследовать цепь при параллельном соединении катушек индуктивности согласно схемам, представленным на рисунках 6.4, 6.5, и заполнить таблицу 6.3.

Поддерживая постоянной величину тока в ветви с ваттметром, выполнить необходимые измерения для согласного и встречного видов включения катушек. По данным эксперимента вычислить эквивалентные параметры цепи, эквивалентные и полные параметры каждой из катушек. Определить углы смещения фазы в каждой из ветвей, а также разность фаз $\Delta\psi$ токов I_1, I_2 . Вычислить мощность, передаваемую посредством взаимной индукции, по формуле

$$P_M = \frac{P_{1\text{согл}} - P_{1\text{встр}}}{2}. \quad (6.3)$$

Таблица 6.3 – Исследование параллельного соединения катушек

Соединение	Измерено					Рассчитано								
	$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$P, \text{Вт}$	$Z_{\Sigma}, \text{Ом}$	$R_{\Sigma}, \text{Ом}$	$X_{\Sigma}, \text{Гн}$	$P_M, \text{Вт}$	$Z_{1\Sigma}, \text{Ом}$	$Z_{2\Sigma}, \text{Ом}$	$\varphi_1, \text{град}$	$\varphi_2, \text{град}$	$\Delta\psi, \text{град}$
Встречное														
Согласное														

7 Используя данные таблиц 6.2 и 6.3, построить векторные диаграммы для последовательного согласного, последовательного встречного, параллельного согласного и параллельного встречного соединений катушек.

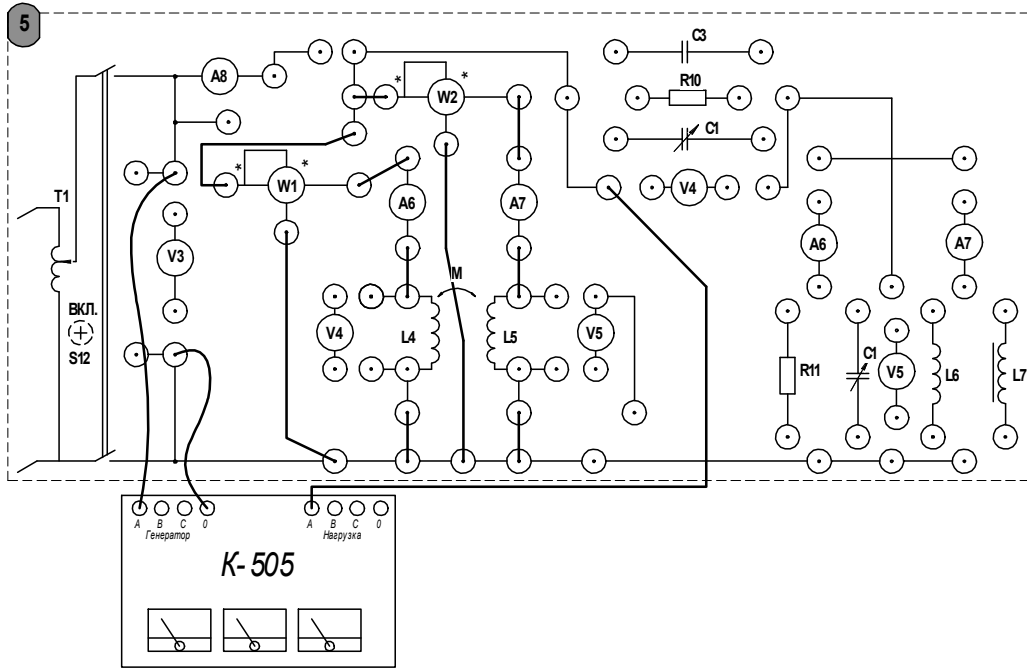


Рисунок 6.4 – Схема параллельного согласного соединения катушек

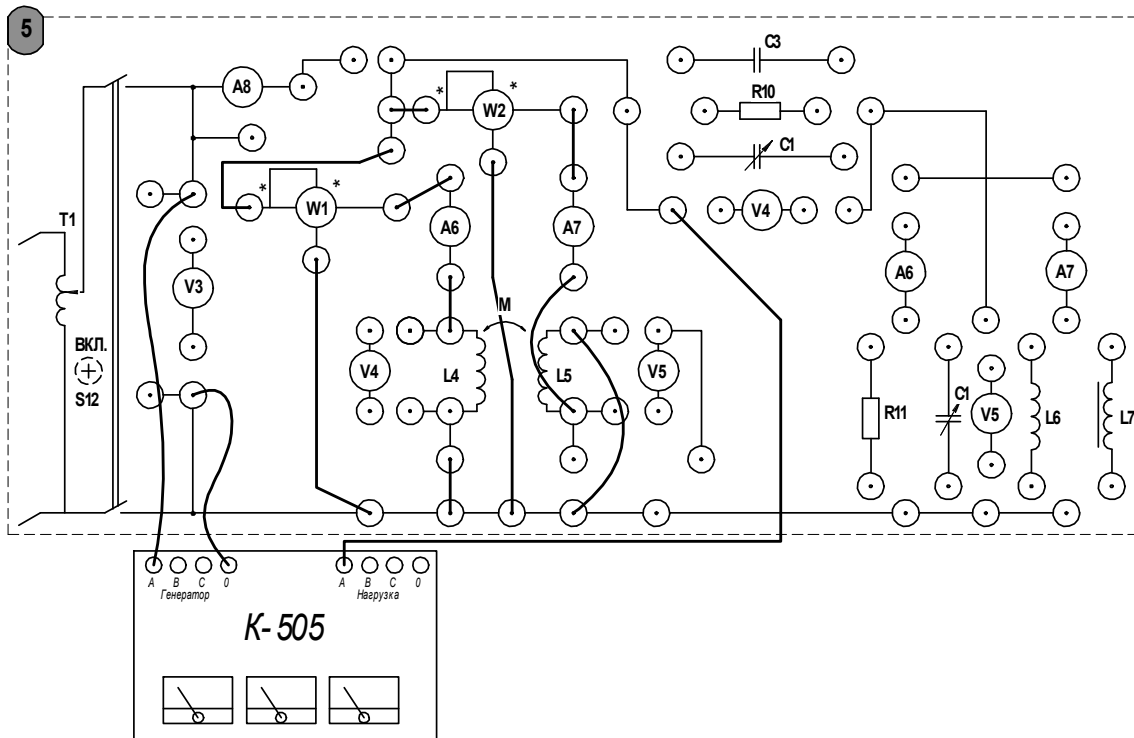


Рисунок 6.5 – Схема параллельного встречного соединения катушек

Содержание отчета

Отчет должен содержать: цель работы, схемы исследуемых электрических цепей, таблицы с результатами экспериментов и вычислений, вычисления, выполненные по приведенным формулам, векторные диаграммы, построенные с указанием масштабов токов и напряжений, вывод о проделанной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Каковы физические процессы, возникающие в электрической цепи с взаимной индукцией?
- 2 Что такое взаимная индуктивность?
- 3 Как экспериментально определить взаимную индуктивность?
- 4 Какие факторы влияют на величину взаимной индуктивности?
- 5 В чем заключается принцип работы линейного трансформатора.

7 Лабораторная работа № 7. Исследование трехфазной цепи, соединенной звездой

Цель работы: исследовать режимы работы трехфазной цепи с нейтральным проводом и без нейтрального провода в различных режимах работы.

7.1 Порядок выполнения работы

1 Собрать схему соединения трехфазной цепи звездой, приведенную на рисунке 7.1. В этой работе измерительный комплект К-505 используется в трехфазном режиме, выбор фазы для измерения осуществляется при помощи переключателя. Следует отметить, что прибор измеряет *фазные напряжения* и *линейные токи*.

2 Установить симметричную активную нагрузку во всех фазах. Выполнить измерение линейных и фазных токов и напряжений, а также ток в нулевом проводе. Результаты эксперимента занести в таблицу 7.1. Сравнить измеренные мощности фаз с вычисленными по формуле $P = UI$.

3 Выполнить дополнительные эксперименты в следующей последовательности: 1) увеличить активную нагрузку в фазе С; 2) отключить один из линейных проводов; 3) отключить нагрузку в одной из фаз. Для каждого из указанных экспериментов вычислить те же величины, что в п. 2, результаты занести в таблицу 7.1.

4 Отключить нулевой провод и повторить эксперименты из п. 3, дополнительно исследовать режим короткого замыкания одной из фаз. *Перед включением схемы с коротким замыканием фазы убедитесь в том, что нейтральный провод удален!* Результаты занести в таблицу, аналогичную таблице 7.1.

5 Включить в одну из фаз последовательно с сопротивлением R реактивную нагрузку в виде катушки $L3$ или конденсатора $C1$ (предварительно установить емкость при помощи блока «С1» на стенде). Результаты измерений занести в таблицу, аналогичную таблице 7.1.

6 Вычислить импеданс для каждой из фаз, используя экспериментально полученные данные. Заполнить таблицу 7.2.

7 По указанию преподавателя построить векторные диаграммы токов и напряжений для одного или нескольких режимов работы трехфазной цепи.

Таблица 7.1 – Результаты эксперимента

Тип нагрузки	Измерено												$P_{\Sigma},$ Вт
	$U_{л},$ В	$U_A,$ В	$U_B,$ В	$U_C,$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_N,$ А	$U_n,$ В	$P_A,$ Вт	$P_B,$ Вт	$P_C,$ Вт	
Активная симметричная													
Активная несимметричная													
Обрыв фазы													
Обрыв линии													

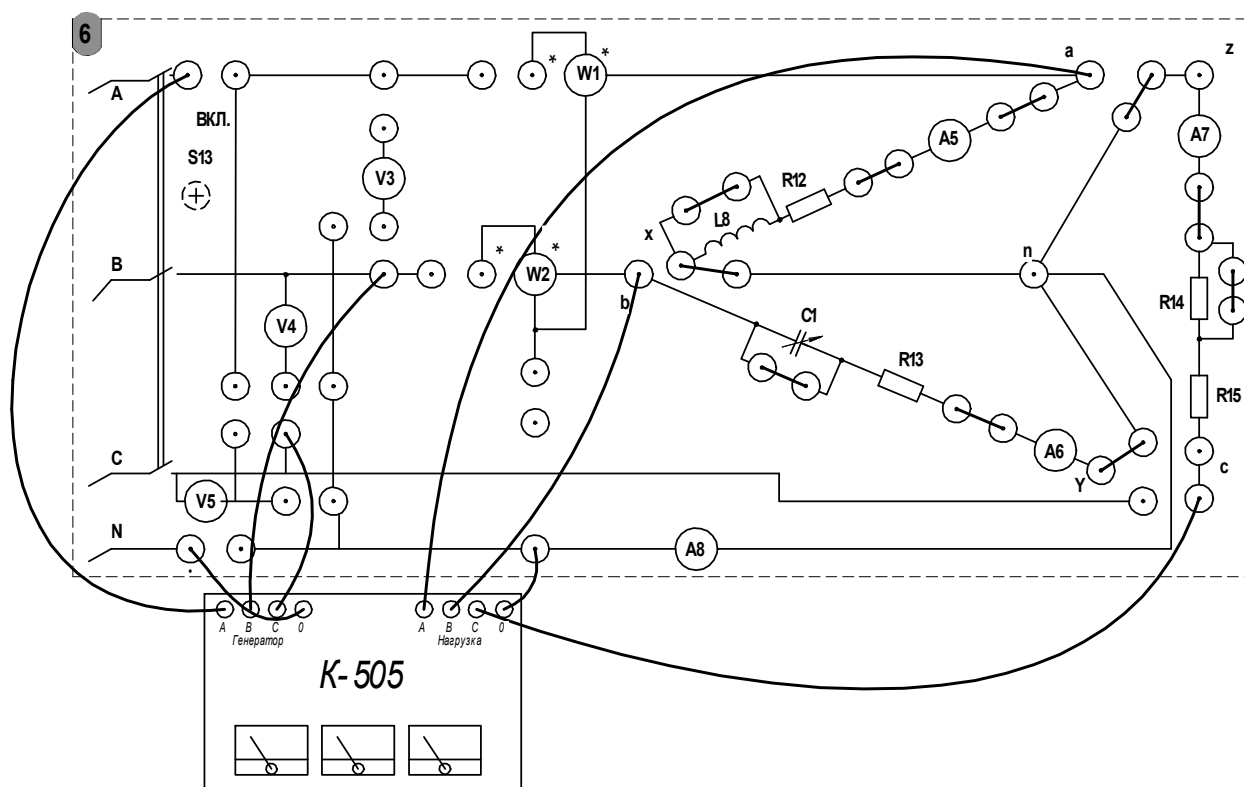


Рисунок 7.1 – Схема соединения трехфазной цепи звездой

Таблица 7.2 – Результаты вычислений

$\hat{Z}_A,$	$\hat{Z}_B,$	$\hat{Z}_C,$	$\dot{I}_A,$	$\dot{I}_B,$	$\dot{I}_C,$	$\dot{U}_{N'N}$
Ом	Ом	Ом	А	А	А	В

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, электрические схемы исследуемых цепей, таблицы с результатами эксперимента и расчета, векторные диаграммы токов и напряжений с указанием масштаба (рекомендуется выполнять на миллиметровой бумаге), вывод о проделанной работе.

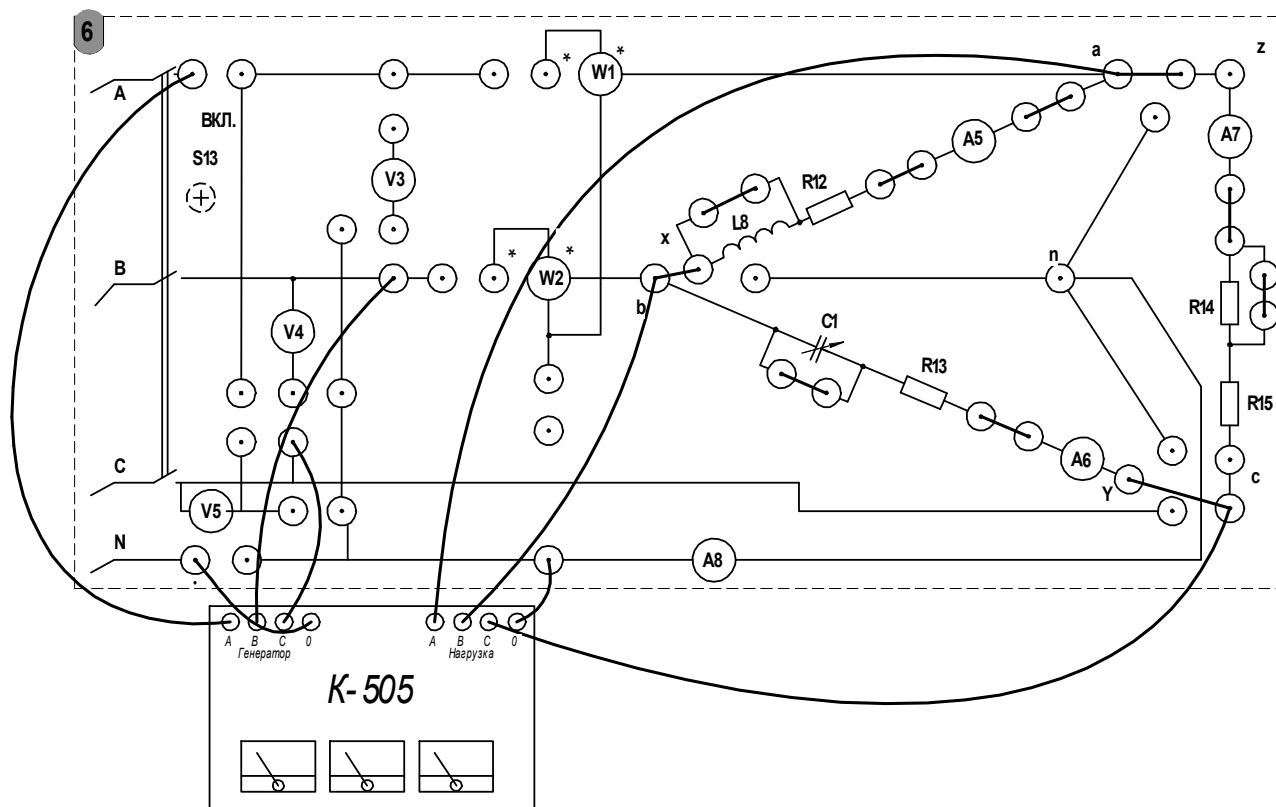


Рисунок 8.1 – Схема соединения трехфазной цепи треугольником

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, электрические схемы исследуемых цепей, таблицы с результатами эксперимента и расчета, векторные диаграммы токов и напряжений с указанием масштаба, вывод о проделанной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Каковы соотношения между напряжениями и токами в трехфазной цепи, соединенной треугольником?
- 2 Чем опасно междуфазное короткое замыкание при соединении фаз треугольником?
- 3 Как распределяются токи в фазах и линиях при обрыве линейного провода, при обрыве фазы?
- 4 Изложите методику расчета трехфазной цепи, соединенной треугольником при наличии сопротивлений линейных проводов.
- 5 Изложите методы измерения активной мощности в трехфазных электрических цепях.
- 6 Изложите методику построения векторных диаграмм трехфазных электрических цепей.

9 Лабораторная работа № 9. Исследование линейной цепи периодического несинусоидального тока

Цель работы: изучение методов исследования линейных электрических цепей с источником периодической несинусоидальной ЭДС; исследование влияния параметров цепи на форму тока в цепи; изучение методики разложения периодической функции в ряд Фурье.

9.1 Порядок выполнения работы

1 Подключить к сети генератор сигналов и настроить режим работы следующим образом. При помощи клавиш на лицевой панели выбрать форму напряжения «гамр», установить амплитуду $U_m = 20 \text{ Vpp}$ и частоту колебаний $f = 50 \text{ Гц}$ (настройка генератора согласно рекомендациям в лабораторной работе № 10).

2 Соединить при помощи стенда генератор и осциллограф. Включить генератор и убедиться в корректности настроек. Если параметры и форма напряжения выбраны корректно, кривая на экране осциллографа будет иметь вид, представленный на рисунке 9.1.

3 Собрать по схеме, представленной на рисунке 10.4 (лабораторная работа № 10) последовательный колебательный контур. Изменяя емкость конденсатора при помощи блока «С1» на стенде, проследить за изменением осциллограммы тока.

4 Применяя формулу (5.1) (лабораторная работа № 5), вычислить резонансные емкости для первой и второй гармоник. Установить при помощи блока «С1» на стенде эти значения емкости и убедиться, что кривая на экране осциллографа соответствует гармоническим составляющим сигнала. Ход вычислений и снимки экрана осциллографа занести в отчет.

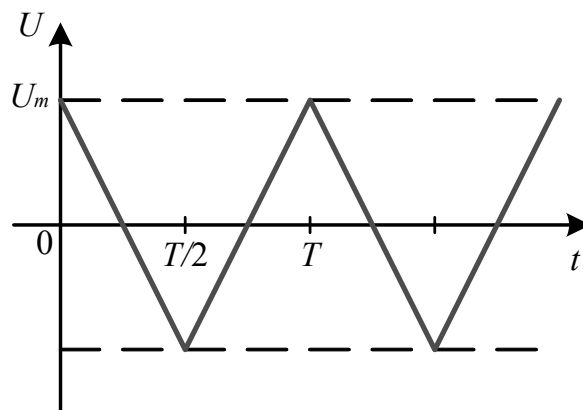


Рисунок 9.1 – Форма исследуемого сигнала

5 Выполнить разложение в ряд Фурье исследуемого напряжения (см. рисунок 9.1) аналитическим или графическим методом. Получить коэффициенты разложения в ряд Фурье для трех-четырех гармонических составляющих. При выполнении разложения учесть, что кривая обладает симметрией.

При помощи компьютера суммировать полученные гармонические составляющие и убедиться, что сумма стремится к исследуемой форме сигнала. Ход вычислений и результаты разложения в ряд Фурье занести в отчет.

Содержание отчета

Отчет должен содержать все составляющие, указанные в п. 9.1.

Контрольные вопросы

1 Изложите методику расчета линейных электрических цепей при воздействии периодических несинусоидальных ЭДС.

2 Приведите формулы для вычисления коэффициентов ряда Фурье.

3 Какими особенностями обладает ряд Фурье для четной и нечетной функций?

4 Какое влияние оказывают емкость и индуктивность на кривую тока в цепи, подключенной к периодическому несинусоидальному источнику ЭДС?

5 Как экспериментально получить осциллограмму одной из гармонических составляющих напряжения или тока?

6 При каком условии последовательный колебательный контур работает как фильтр, выделяющий первую гармонику?

7 Как определяется мощность в линейных электрических цепях периодического несинусоидального тока?

10 Лабораторная работа № 10. Исследование переходных процессов в линейных цепях с источниками постоянного напряжения (исследование переходных процессов в линейных электрических цепях)

Цель работы: экспериментальное исследование переходных процессов при включении неразветвленных линейных электрических цепей на постоянное напряжение; исследование влияния параметров цепи на характер переходного процесса; исследование апериодического процесса и затухающих колебаний в последовательном RLC-контуре.

10.1 Порядок выполнения работы

1 Настроить генератор сигналов следующим образом. Установить прямоугольную форму напряжения, нажав кнопку «square», при помощи кнопок экранного меню выбрать пункт «Ampl», на цифровой клавиатуре ввести максимальное значение амплитуды $20 V_{pp}$. Далее, при помощи кнопок экранного меню выбрать «Freq» и на цифровой клавиатуре ввести 50 Hz.

Включить осциллограф и соединить его с генератором сигналов через гнезда на стенде. На генераторе сигналов нажать кнопку «Output» снять осциллограмму выходного напряжения генератора. Убедиться в корректности всех настроек. Период прямоугольного напряжения должен составлять $T = 0,02$ с.

2 Собрать схему для исследования переходного процесса в RC-цепи согласно схеме, представленной на рисунке 10.1. Установить при помощи панели «С1» на стенде емкость конденсатора и значение сопротивления «R17», рекомендованные преподавателем.

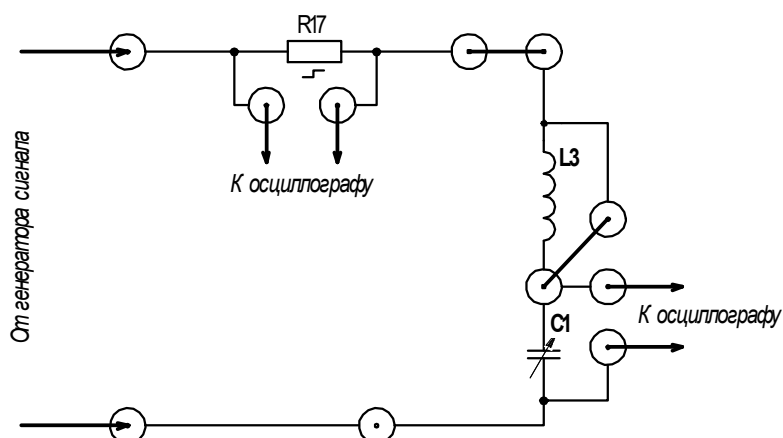


Рисунок 10.1 – Схема для исследования переходного процесса в RC-цепи

Проследить за изменением осциллограммы при вариации указанных параметров цепи. Для двух выбранных комбинаций сопротивления и емкости необходимо сохранить осциллограмму (рекомендуется использовать flash-накопитель с файловой системой FAT32, подключенный к USB-порту осциллографа. Нажатием кнопки «Print» выполняется сохранение осциллограммы. Файлы на flash-накопителе нумеруются по порядку, начиная с номера 000) и записать в таблицу 10.1 параметры цепи. По осциллограммам определить постоянную времени цепи (рисунок 10.2), эту же величину рассчитать по известным параметрам, используя формулу $\tau_{RC} = RC$. Сравнить результаты расчета и эксперимента.

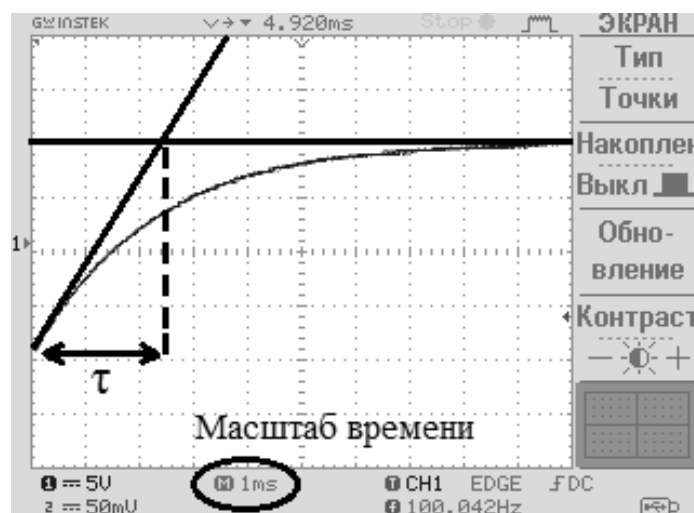


Рисунок 10.2 – Способ определения постоянной времени цепи по осциллограмме

3 Собрать схему для исследования переходного процесса в RL-цепи согласно схеме, представленной на рисунке 10.3. Индуктивность катушки фиксирована и приведена в таблице 10.1 для каждого стенда. Изменяя величину сопротивления «R17» проследить за изменением осциллограммы. Для двух различных параметров сохранить осциллограмму. Параметры цепи записать в таблицу 10.2. По осциллограммам определить постоянную времени цепи, рассчитать эту же величину по формуле $\tau_{RL} = L/R$ и сравнить результаты.

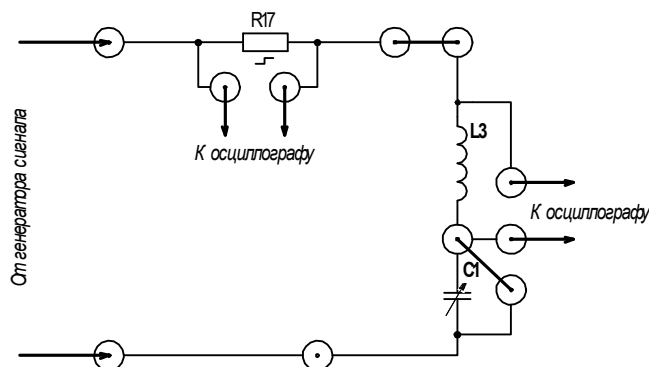


Рисунок 10.3 – Схема для исследования переходного процесса в RL-цепи

4 Собрать схему для исследования аperiodического процесса и затухающих колебаний в последовательном RLC-контуре (рисунок 10.4).

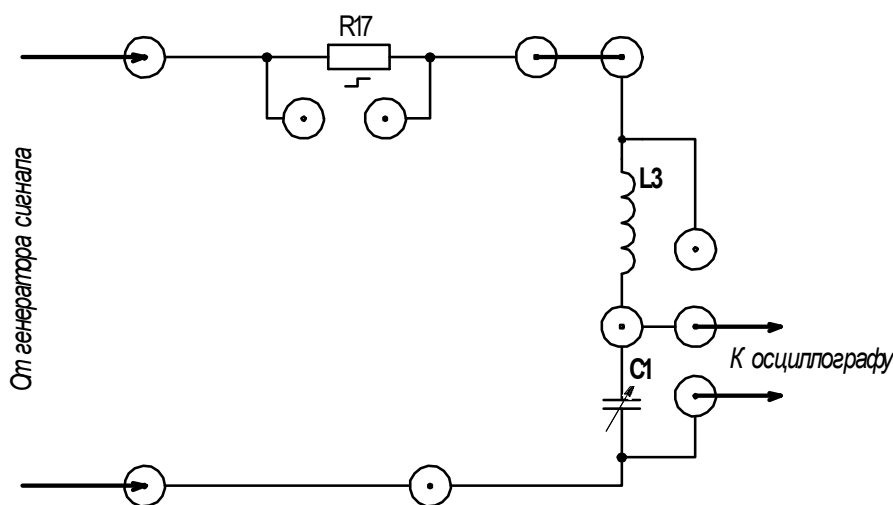


Рисунок 10.4 – Схема для исследования переходного процесса в RLC-цепи

Установить значение сопротивления «R17» в диапазоне от 100 до 300 Ом, а значение емкости «C1» в диапазоне от 0,1 до 32 мкФ. Уменьшая емкость, проследить за изменением осциллограммы. Фиксировать значение емкости, при котором аperiodический процесс переходит в колебательный. В таблицу 10.2 записать параметры цепи, соответствующие колебательному процессу. Сохранить осциллограмму и с ее помощью определить постоянную времени колебательного контура. Рассчитать постоянную времени колебательного контура по формуле $\tau = 2L/R$ и сравнить с экспериментом.

Таблица 10.1 – Величина индуктивности

Номер учебного стенда	L3, Гн
1	1,213
2	1,095
3	1,213
4	1,116
5	1,212
НТЦ	2,004

Таблица 10.2 – Результаты эксперимента

Номер осциллограммы	Вид цепи	Вид осциллограммы	Параметры контура				
			R, Ом	L, Гн	C, мкФ	τ (эксп.)	τ (расч.)
1	RC	$i(t), u_C(t)$					
2	RC	$u_L(t)$					
3	RL	$i(t), u_L(t)$					
4	RL	$u_L(t)$					
5	RLC	$u_C(t)$					

5 По осциллограмме колебательного процесса определить угловую частоту колебаний ω . Рассчитать этот же параметр, применяя формулу

$$\omega_{расч} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}; \quad \omega_{эксп} = \frac{2\pi}{T_{эксп}}, \quad (10.1)$$

где $T_{эксп}$ – период затухающих колебаний по осциллограмме.

Определить логарифмический декремент затуханий по результатам эксперимента и аналитически, используя формулу

$$d = \frac{1}{\tau} \cdot T. \quad (10.2)$$

Сравнить полученные результаты.

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, схемы исследуемых электрических цепей для каждого эксперимента, распечатанные осциллограммы с необходимыми графическими построениями следует поместить в соответствии с видом цепи, ход вычислений, заполненную таблицу 10.2, выводы о проделанной работе.

Контрольные вопросы

- 1 Сформулируйте законы коммутации.
- 2 Приведите алгоритм расчета переходного процесса классическим методом. В чем заключается его суть?

3 Поясните смысл характеристического уравнения и его корней.

4 Что понимают под независимыми начальными значениями?

5 Какие виды переходных процессов могут наблюдаться в RLC-цепи?

6 Как определить постоянную времени цепи по осциллограмме?

7 Как определить постоянную времени цепи аналитически по известным параметрам?

8 При каком условии апериодический процесс в RLC-цепи переходит в колебательный?

9 Как определить декремент затухающих колебаний по осциллограмме и аналитически?

11 Лабораторная работа № 11. Исследование интегрирующих и дифференцирующих цепей

Цель работы: экспериментальное исследование и выбор оптимальных параметров интегрирующих и дифференцирующих цепей.

11.1 Порядок выполнения работы

1 Подготовить генератор сигналов и осциллограф к работе и убедиться в корректности параметров сигнала согласно рекомендациям, представленным в п. 1 лабораторной работы № 10. Следует отметить, что действие прямоугольного импульса, длительность которого превышает постоянную времени RL или RC-цепи эквивалентно включению данной цепи на постоянное напряжение, поэтому вид осциллограмм должен быть аналогичен полученным в лабораторной работе № 10. Однако при надлежащем выборе параметров цепи, можно получить осциллограммы, соответствующие интегралу и производной от прямоугольного импульса.

2 Ознакомиться со схемами опытов, представленными на рисунке 11.1. Рассчитать сопротивление R и постоянную времени τ для дифференцирующей RC-цепи (см. рисунок 11.1, а), принимая емкость конденсатора в цепи равной 0,2 мкФ, учитывая условие дифференцирования

$$RC \ll t_0, \quad (11.1)$$

где t_0 – длительность прямоугольного импульса, $t_0 = 0,01$ с.

Для проведения эксперимента следует выбрать и установить ближайшее расчетному значению R на стенде.

Сохранить осциллограмму, после чего, изменяя параметры цепи, проследить за изменением осциллограмм выходного сигнала. Заполнить таблицу 11.1, используя параметры двух экспериментов, в одном из которых выполняется условие (11.1), а в другом – нет. Амплитуду и длительность выходного сигнала определить по осциллограмме.

3 При тех же параметрах входного сигнала рассчитать емкость конденсатора и постоянную времени интегрирующей цепи, учитывая условие интегрирования (см. рисунок 11.1, б)

$$RC \gg t_0. \quad (11.2)$$

Для проведения эксперимента следует выбрать и установить ближайшее расчетному значению C на стенде.

Сохранить осциллограмму, после чего, изменяя параметры цепи, проследить за изменением осциллограмм выходного сигнала. Заполнить таблицу 11.1.

4 Исследовать интегрирующие и дифференцирующие RL-цепи (см. рисунок 11.1, в, з). Учтеть, что в экспериментах с RL-цепью доступным для изменения остается лишь параметр R . Условия дифференцирования и интегрирования аналогичны (11.1) и (11.2) соответственно, если учесть, что постоянная времени RL-цепи определяется как $\tau = L/R$. Заполнить таблицу 11.1.

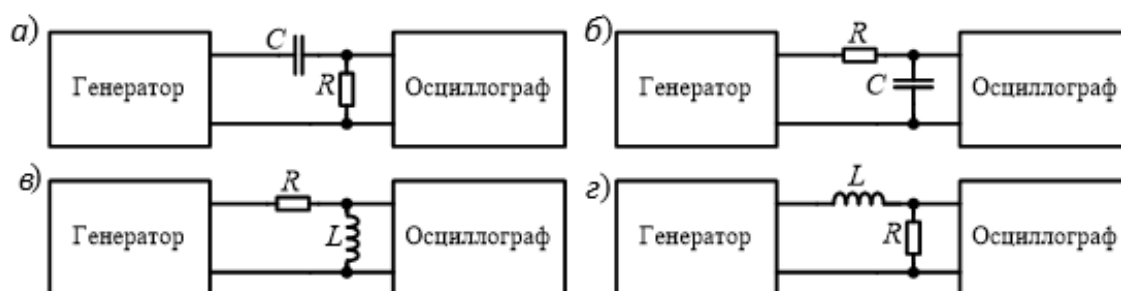


Рисунок 11.1 – Схемы интегрирующих и дифференцирующих цепей

Таблица 11.1 – Результаты экспериментов

Вид цепи	Параметры схемы			Постоянная времени	Амплитуда импульса	Длительность импульса
	R	L	C			
Дифференцирующая RC						
Дифференцирующая RC						
Интегрирующая RC						
Интегрирующая RC						
Дифференцирующая RL						
Дифференцирующая RL						
Интегрирующая RL						
Интегрирующая RL						

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, таблицу 11.1 и ход всех вычислений, а также осциллограммы сигналов.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите примеры дифференцирующих и интегрирующих цепей.
- 2 Какие условия должны быть выполнены для получения качественного дифференцирования (интегрирования) прямоугольного сигнала?
- 3 Что такое переходная характеристика цепи? Как получить переходную характеристику теоретически и экспериментально?

12 Лабораторная работа № 12. Исследование цепей с нелинейными резистивными сопротивлениями (исследование нелинейной электрической цепи постоянного тока)

Цель работы: экспериментальное определение вольт-амперных характеристик (ВАХ) нелинейных элементов, определение статических и дифференциальных параметров элементов, изучение практического применения полупроводниковых элементов.

12.1 Порядок выполнения работы

1 Собрать схему, представленную на рисунке 12.1, с помощью которой снять прямую и обратную ветви ВАХ полупроводникового стабилитрона. При снятии ВАХ нельзя повышать обратное напряжение выше допустимого паспортного значения для элемента. Данные занести в таблицу 12.1 и построить ВАХ графически.

Таблица 12.1 – Экспериментальное исследование ВАХ

$U, В$									
$I, А$									

При помощи осциллографа исследовать ограничение амплитуды напряжения полупроводниковым стабилитроном. Сохранить и поместить в отчет полученную осциллограмму. Изобразить электрическую схему включения полупроводникового стабилитрона с целью ограничения выпрямленного напряжения.

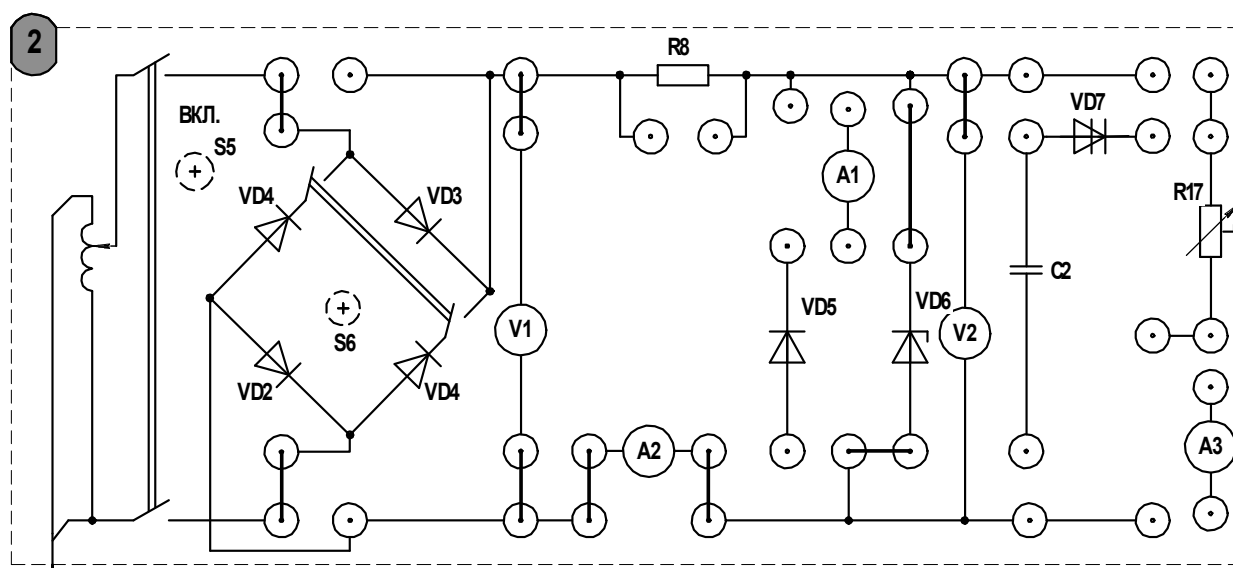


Рисунок 12.1 – Схема для исследования ВАХ стабилитрона

2 Для обратной ветви ВАХ стабилитрона рассчитать статическое и дифференциальное сопротивления (или проводимость по указанию преподавателя) (рисунок 12.2).

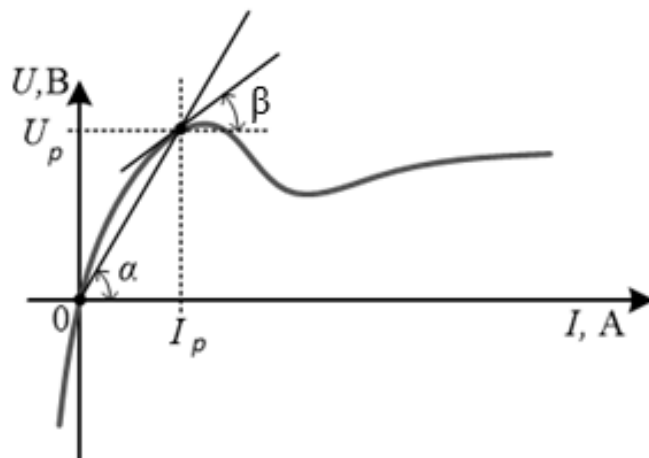


Рисунок 12.2 – Методика определения статического и дифференциального сопротивлений

$$R_o = \frac{dU}{dI} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \operatorname{tg}(\beta);$$

$$R_c = \frac{U}{I} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (12.1)$$

где m_u – масштаб напряжения;

m_i – масштаб тока.

3 Исследовать работу однополупериодного (тумблер S6 выключен) и двухполупериодного (тумблер S6 включен) выпрямителей. Для этого необходимо собрать схему, представленную на рисунке 12.3. Сохранить и поместить в отчет осциллограммы колебаний тока, изобразить электрические схемы выпрямителей.

4 Собрать схему, представленную на рисунке 12.4, и исследовать работу динистора. В положительном полупериоде синусоиды входного напряжения напряжение на конденсаторе возрастает до значения, соответствующего пробоем динистора. При этом динистор открывается и конденсатор разряжается через сопротивление нагрузки. По мере разряда конденсатора напряжение на зажимах динистора падает, и он закрывается.

Фиксировать момент пробоя p – n -перехода динистора при помощи осциллографа. Сохранить и поместить в отчет осциллограмму колебаний тока. Изобразить электрическую схему включения динистора.

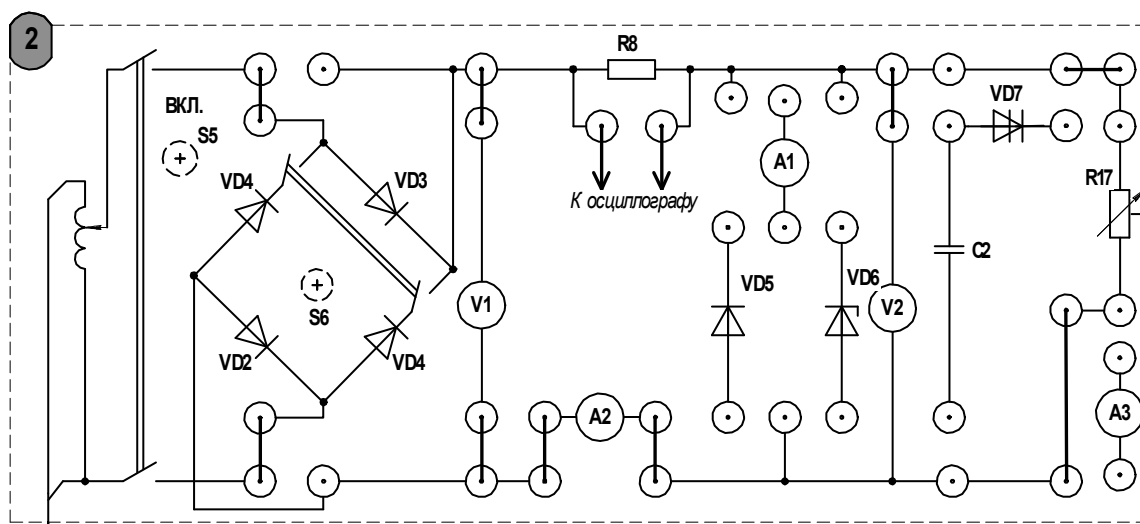


Рисунок 12.3 – Схема для исследования выпрямителей напряжения

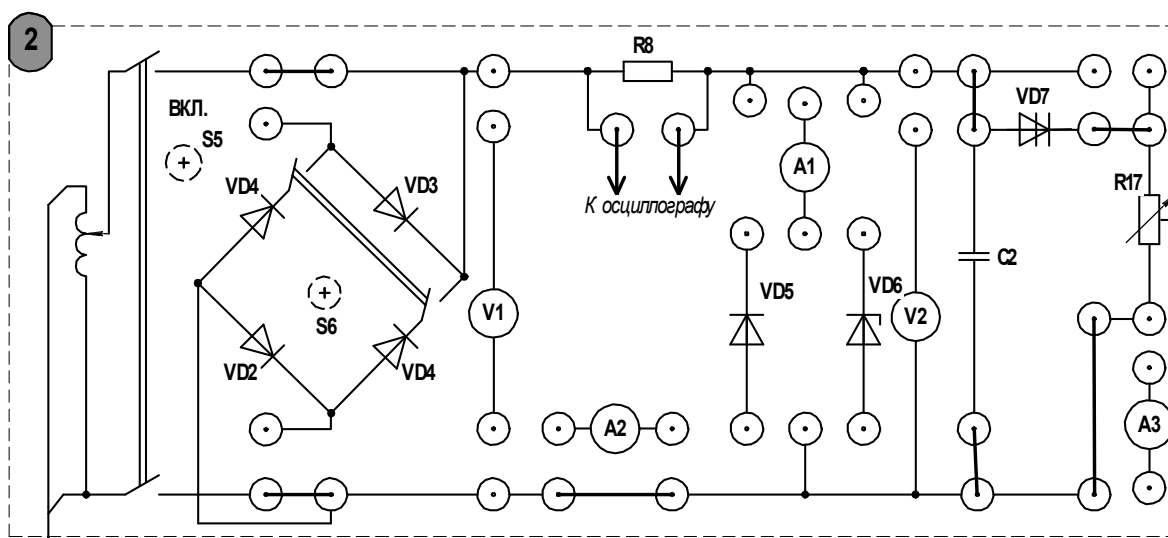


Рисунок 12.4 – Схема для исследования работы диодистора

Содержание отчета

Отчет должен содержать: цель работы, электрические схемы включения исследуемых элементов, таблицы экспериментальных данных, графическое представление ВАХ полупроводникового стабилитрона, ход вычислений и результаты расчета статического и дифференциального сопротивлений стабилитрона, осциллограммы, вывод.

Контрольные вопросы

- 1 Приведите примеры нелинейных элементов электрической цепи и их вольт-амперные характеристики.
- 2 Какой полупроводниковый элемент может использоваться для ограничения амплитуды выпрямленного напряжения?

3 Как определить статическое и дифференциальное сопротивления графически?

4 Изложите методику графического расчета нелинейных цепей постоянного тока.

13 Лабораторная работа № 13. Исследование нелинейной электрической цепи переменного тока

Цель работы: экспериментальное исследование явления феррорезонанса в нелинейных электрических цепях переменного тока, содержащих катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником.

13.1 Порядок выполнения работы

1 Собрать схему, представленную на рисунке 13.1, для экспериментального исследования ВАХ нелинейной катушки индуктивности «L7» по действующим значениям напряжения и тока. При выполнении эксперимента ток в катушке не должен превышать 0,7 А.

Построить график ВАХ по полученным точкам.

2 На ВАХ нелинейной катушки выбрать точку, находящуюся за перегибом кривой, и определить резонансную емкость по формуле

$$\frac{1}{\omega C} = \sqrt{\left(\frac{U_L}{I}\right)^2 - R^2}. \quad (13.1)$$

Построить ВАХ емкости в той же системе координат, что и ВАХ нелинейной катушки. Построить результирующую характеристику.

3 Получить экспериментальную зависимость $I = f(U)$ последовательного колебательного контура с нелинейной катушкой индуктивности. Для этого необходимо собрать схему, представленную на рисунке 13.1. Отметить напряжение U_p , при котором наступает скачкообразное увеличение тока. Затем, постепенно уменьшая напряжение, фиксировать момент скачкообразного уменьшения тока. Заполнить таблицу 13.1.

Таблица 13.1 – Исследование феррорезонанса в последовательном контуре

Номер опыта	U , В	U_L , В	U_C , В	I , А	P , Вт
1					
2					
3					
4					

4 Собрать схему для исследования феррорезонанса в параллельном контуре, представленную на рисунке 13.2. Не изменяя установленной ранее резонансной

емкости, плавно изменяя входное напряжение на входных зажимах цепи, получить экспериментальную зависимость $I = f(U)$. Заполнить таблицу 13.2.

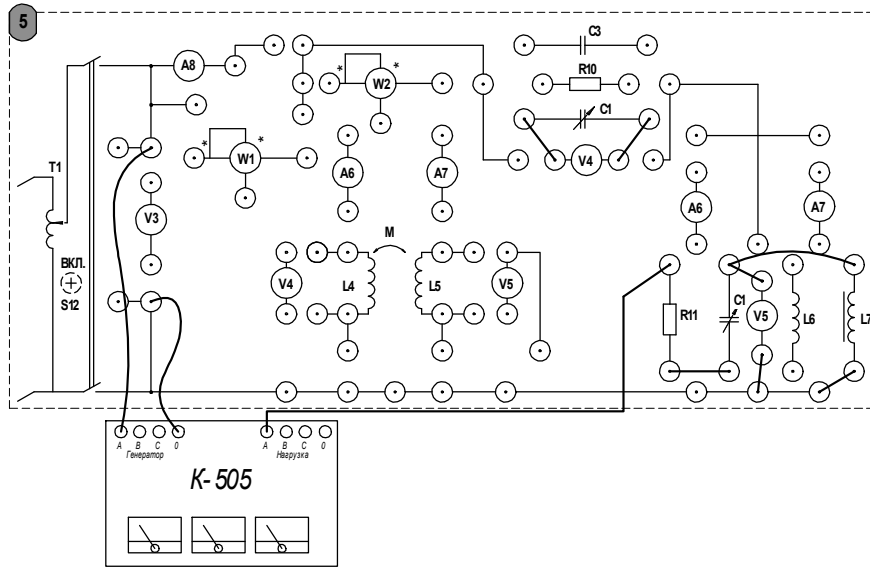


Рисунок 13.1 – Схема для исследования феррорезонанса в последовательном контуре

Таблица 13.2 – Исследование феррорезонанса в последовательном контуре

Номер опыта	$U, В$	$I, В$	$I_L, В$	$I_C, А$	$P, Вт$
1					
2					
3					
4					
5					

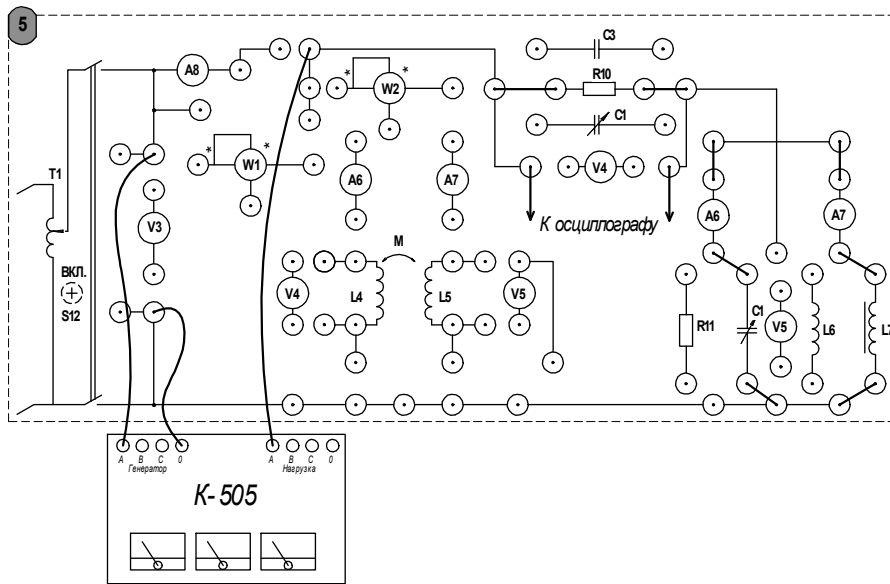


Рисунок 13.2 – Схема для исследования феррорезонанса в параллельном контуре

Содержание отчета

Отчет должен содержать цель работы, электрические схемы последовательного и параллельного контуров с нелинейной катушкой индуктивности, заполненные таблицы, графики зависимостей согласно пп. 3 и 4, осциллограммы тока, вывод о проделанной работе.

Контрольные вопросы

- 1 В каких цепях может возникнуть феррорезонанс?
- 2 Чем отличается феррорезонанс от обычного резонанса в линейном колебательном контуре?
- 3 Почему при феррорезонансе в цепи возникают скачки тока (напряжения)?
- 4 Почему импеданс последовательного контура имеет индуктивный характер до скачка тока и изменяется на емкостный после него?
- 5 Приведите примеры практического применения феррорезонансных явлений.

Примечание – Лабораторные работы № 14–17 по теории электромагнитного поля для специальности «Автоматизация технологических процессов и производств» содержатся в [6].

Список литературы

- 1 **Лоторейчук, Е. А.** Теоретические основы электротехники: учебник / Е. А. Лоторейчук. – Москва: ФОРУМ; ИНФРА-М, 2016. – 320 с. : ил.
- 2 **Бессонов, Л. А.** Теоретические основы электротехники. Электрические цепи / Л. А. Бессонов. – Москва: Гардарики, 2002. – 543 с.
- 3 **Бронштейн, И. Н.** Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – Москва: Наука, 1981. – 608 с.
- 4 **Калашников, С. Г.** Электричество: учебное пособие для вузов / С. Г. Калашников. – 6-е изд., стер. – Москва: Физматлит, 2008. – 624 с.
- 5 Теоретические основы электротехники: методические рекомендации к лабораторным работам для студентов специальностей 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» и направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / Сост. Г. И. Скрыбина [и др.] – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 43 с.