

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

*Методические рекомендации к лабораторным работам
для студентов направления подготовки
12.03.01 «Приборостроение» очной формы обучения*



Могилев 2021

УДК 621.317
ББК 31.21
Т45

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «26» мая 2021 г.,
протокол № 7

Составители: канд. техн. наук, доц. В. Ф. Гоголинский;
ст. преподаватель Н. В. Герасименко

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

Изложена методика выполнения лабораторных работ по курсу «Теория электрических цепей», даны схемы, рекомендации по оформлению отчета и контрольные вопросы к защите.

Учебно-методическое издание

ТЕОРИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Ответственный за выпуск	С. С. Сергеев
Корректор	И. В. Голубцова
Компьютерная верстка	Н. П. Полевничая

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 16 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, 2021

Содержание

Введение.....	4
1 Лабораторная работа № 1. Инструктаж по технике безопасности при работе в лаборатории ТОО.....	5
2 Лабораторная работа № 2. Исследование соотношений в линейных электрических цепях постоянного тока.....	6
3 Лабораторная работа № 3. Исследование пассивного двухполюсника в цепи переменного тока.....	8
4 Лабораторная работа № 4. Исследование резонансных явлений в линейных электрических цепях.....	13
5 Лабораторная работа № 5. Исследование индуктивно-связанных цепей.....	16
6 Лабораторная работа № 6. Исследование линейной цепи периодического несинусоидального тока.....	19
7 Лабораторная работы № 7. Переходные процессы в линейных электрических цепях постоянного тока.....	21
8 Лабораторная работа № 8. Исследование интегрирующих и дифференцирующих цепей.....	25
9 Лабораторная работа № 9. Исследование цепей с нелинейными резистивными сопротивлениями.....	27
10 Лабораторная работа № 10. Исследование катушки с магнитопроводом в цепи переменного тока.....	31
11 Лабораторная работа № 11. Исследование феррорезонансных цепей.....	34
Список литературы.....	36

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 схемы под напряжением без разрешения руководителя!

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 приобрести *лабораторный журнал* в канцелярском магазине университета, 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: изучение требований безопасной работы в лаборатории «Теоретические основы электротехники».

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 утвержденных кафедрой инструкциях, 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 оборудование производится одной рукой. Запрещено касаться металлических токоведущих частей соединительных проводов и кабелей осциллографа.

8 О любой 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. Исследование принципа суперпозиции и свойств взаимности.

2.1 Порядок выполнения работы

2.1.1 Измерить величину ЭДС E_1 при помощи вольтметра V_1 на лицевой панели учебного стенда. Установить при помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) величину ЭДС E_2 равной измеренному значению.

2.1.2 Собрать схему, представленную на рисунке 2.1.

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.

2.1.4 Принимая потенциал точки a на схеме (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	$\varphi_b,$ В	$\varphi_c,$ В	$\varphi_d,$ В	$\varphi_e,$ В	$\varphi_f,$ 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
Рассчитано																
$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_4,$ Ом	$R_5,$ Ом	$R_{вн1},$ Ом	$R_{вн2},$ Ом	$\Sigma E,$ В	$\Sigma IR,$ В								

2.1.5 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 рассчитанными аналитически.

2.1.6 Исследовать принцип суперпозиции. Для этого отключить при помощи тумблера ЭДС E_2 , а ЭДС E_1 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 E_1 и E_2 . 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

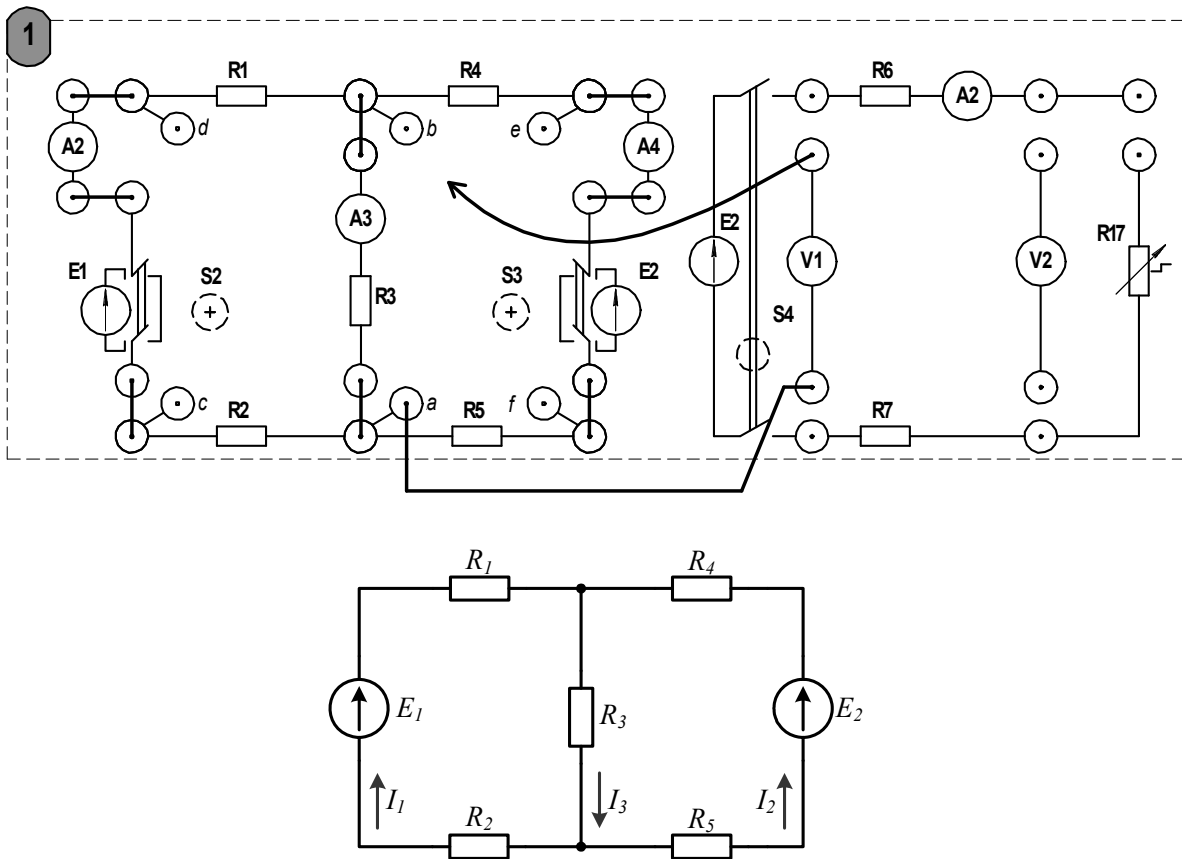


Рисунок 2.1 – Схема для измерения потенциалов в узлах

2.1.7 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.

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

2.1.8 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 пассивного двухполюсника в цепи переменного тока

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

3.1 Порядок выполнения работы

3.1.1 Определить параметры одноэлементных пассивных двухполюсников, для чего необходимо произвести измерения тока, напряжения и мощности согласно схемам, представленным на рисунках 3.1–3.3, затем, используя формулы (3.1)–(3.5), рассчитать неизвестные параметры элементов пассивного двухполюсника. К таким параметрам относятся: сопротивление резистивного элемента R ; индуктивность катушки и активное сопротивление ее обмотки L , R_L ; емкость конденсатора C .

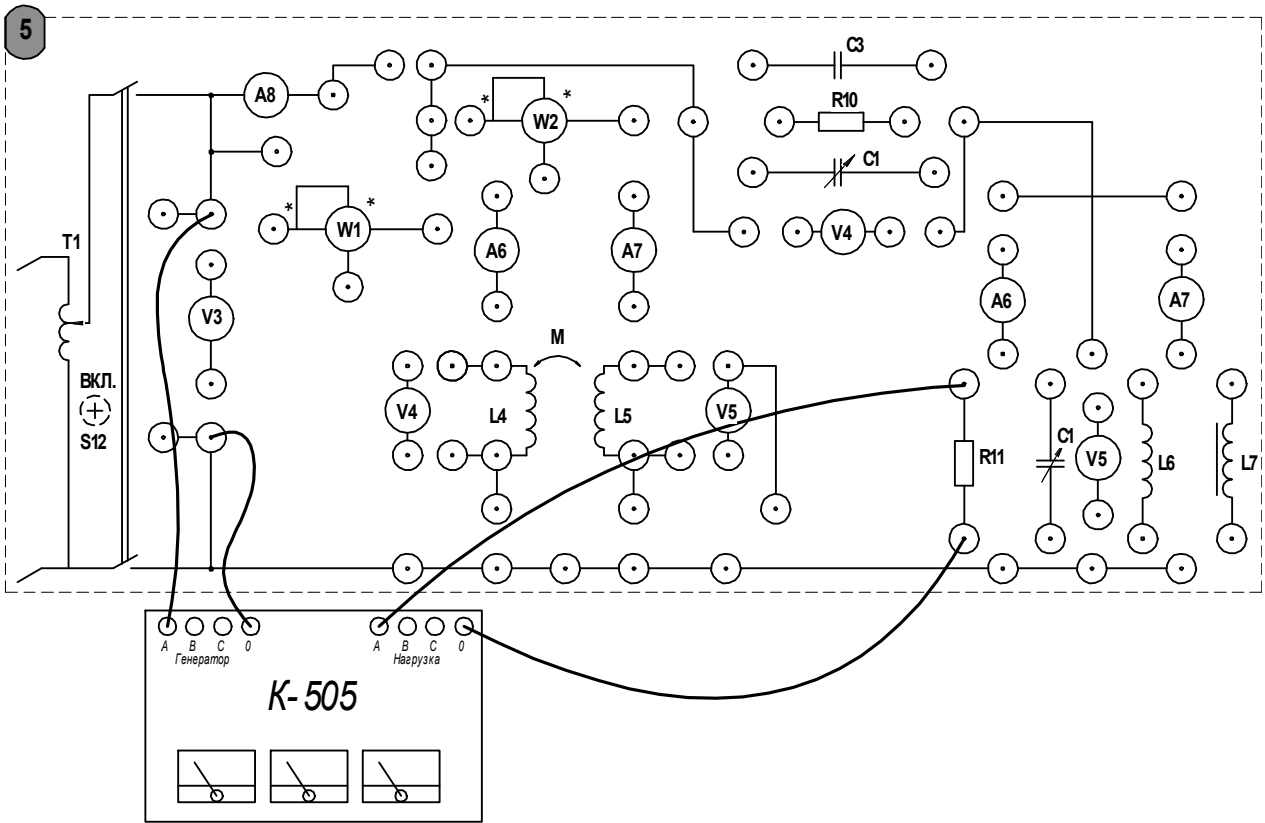


Рисунок 3.1 – Схема для исследования параметров резистора

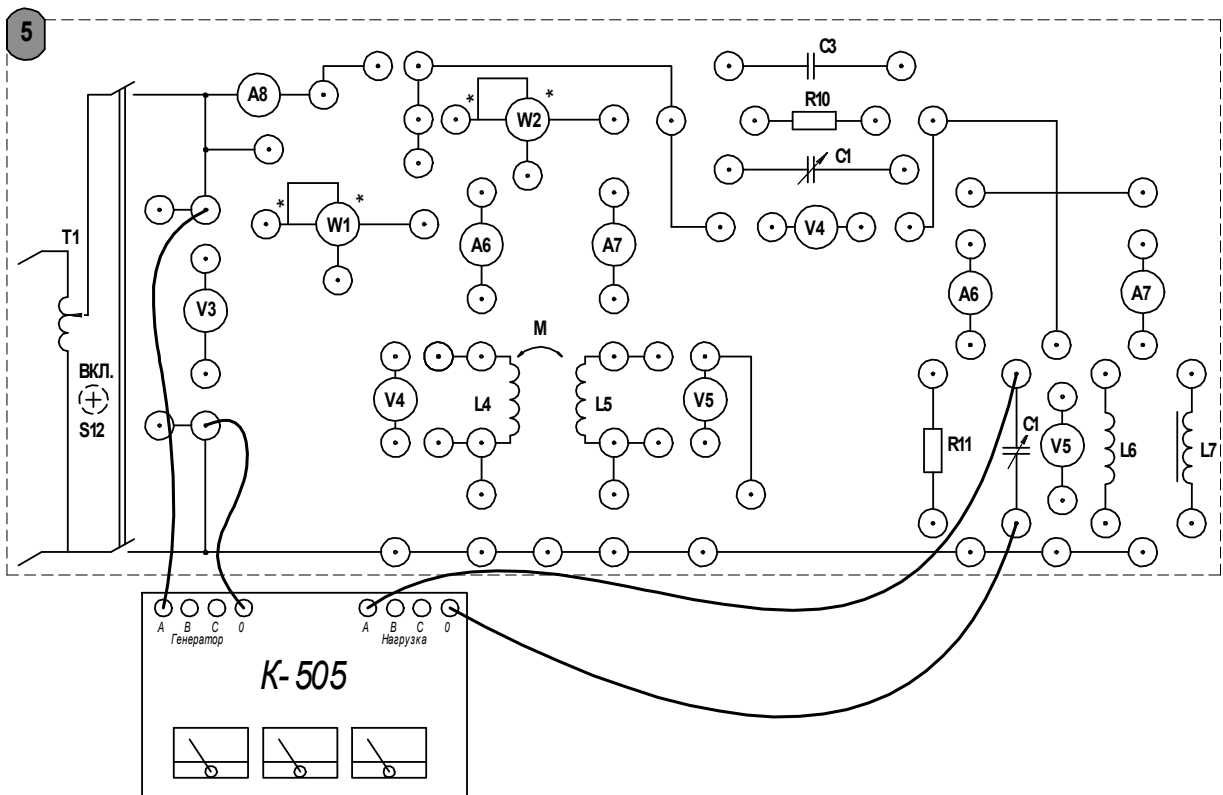


Рисунок 3.2 – Схема для исследования параметров конденсатора

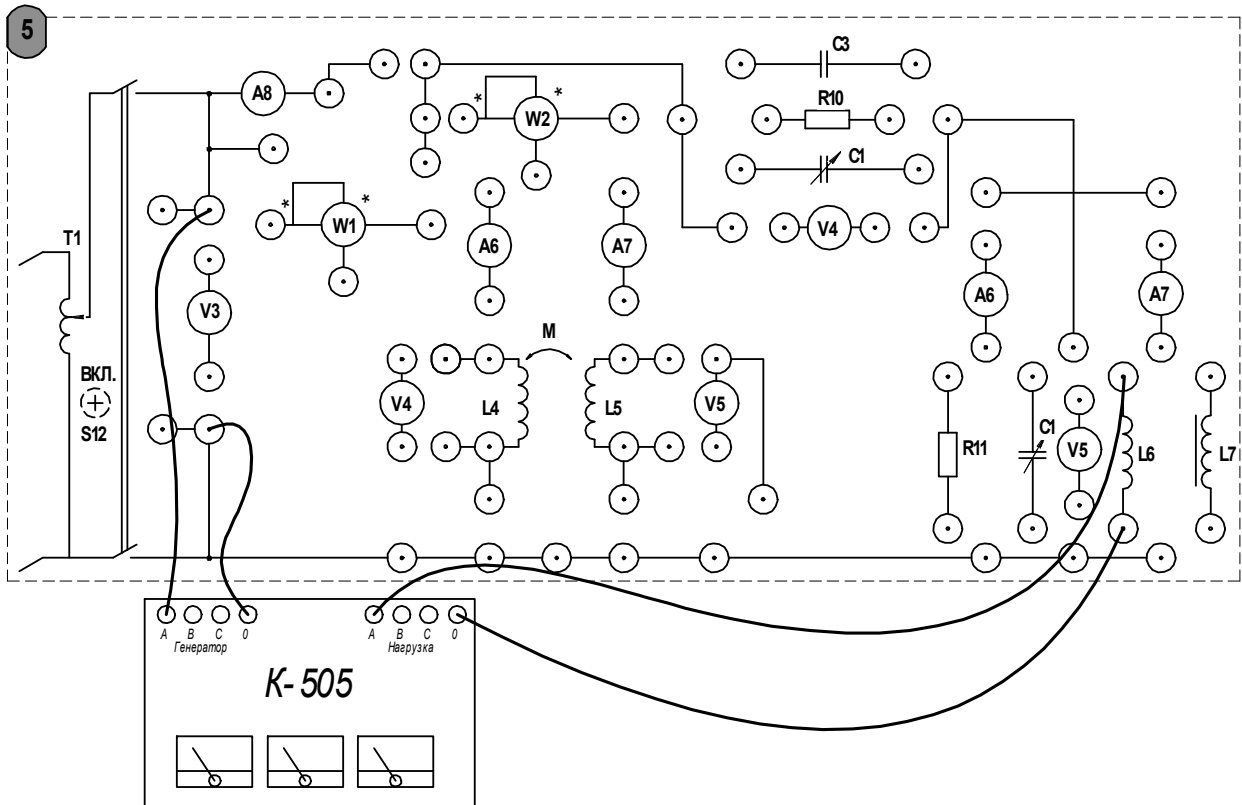


Рисунок 3.3 – Схема для исследования параметров катушки индуктивности

$$R = \frac{P}{I^2}, \quad (3.1)$$

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

$$z = \frac{U}{I}, \quad (3.2)$$

где z – полное сопротивление, Ом;

U – действующее значение напряжения (устанавливается при помощи лабораторного автотрансформатора по указанию преподавателя), В.

$$\varphi = \arccos\left(\frac{P}{UI}\right), \quad (3.3)$$

где φ – разность фаз напряжения и тока, град.

$$X_{L,C} = \sqrt{z^2 - R^2}, \quad (3.4)$$

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

$$L = \frac{X_L}{\omega}; C = \frac{1}{\omega \cdot X_C}, \quad (3.5)$$

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 3.1. 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 пассивных двухполюсников.

3.1.2 Исследовать по схемам соединений, представленным на рисунках 3.4 и 3.5, 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 3.2.

Таблица 3.1 – Результаты исследования пассивных двухполюсников

Вид двухполюсника	Измерено			Рассчитано					
	I , А	U , В	P , Вт	R , Ом	z , Ом	X , Ом	φ , град	L , Гн	C , мкФ
R									
L									
C									

Таблица 3.2 – Результаты измерений

I_1 , А	I_2 , А	I_3 , А	U , В	U_1 , В	U_{ab} , В	P , Вт

3.1.3 Используя таблицы 3.1 и 3.2, построить векторную диаграмму токов и напряжений для исследуемого двухполюсника.

3.1.4 По результатам измерений (см. таблицу 3.2) определить полное, активное и реактивное сопротивления на входе системы, угол смещения фазы между напряжением и токов на входе цепи. Для вычислений следует воспользоваться формулами (3.1) и (3.3). Выполнить расчет цепи аналитически, в комплексной форме, используя параметры элементов из таблицы 3.1. Результаты расчетов занести в таблицу 3.3. Сравнить полученные значения и сделать вывод о проделанной работе.

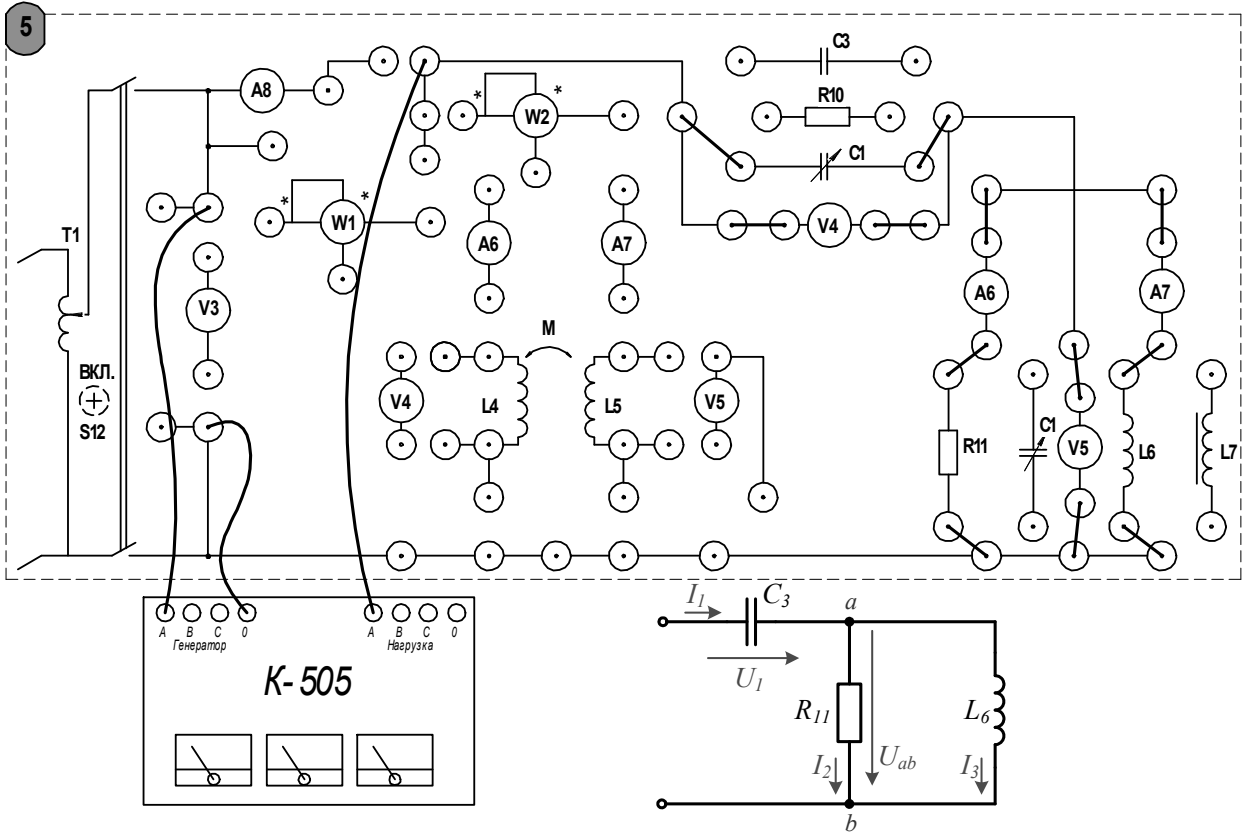


Рисунок 3.4 – Двухполюсник, вариант А

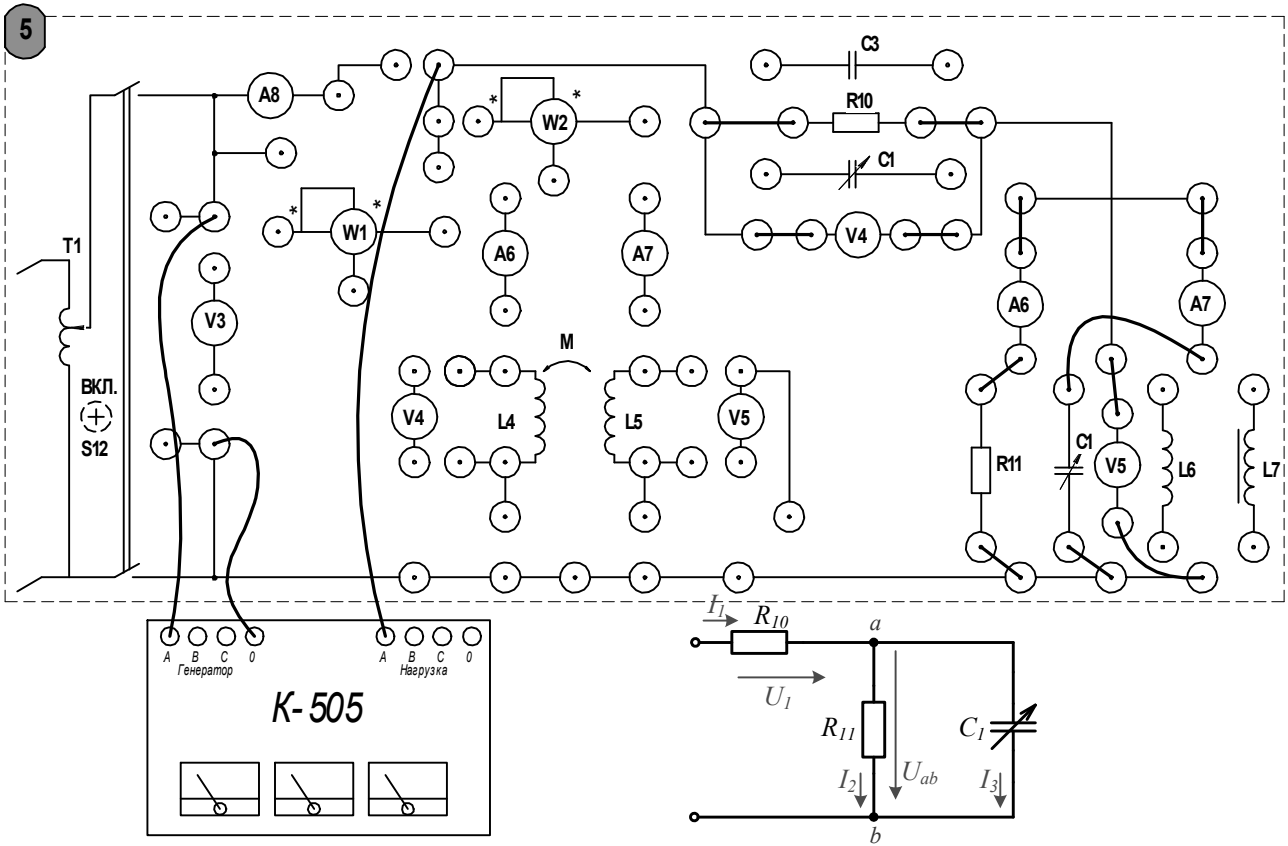


Рисунок 3.5 – Двухполюсник, вариант Б

Таблица 3.3 – 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 Сформулируйте определение активного и пассивного двухполюсника в цепи переменного тока.

2 Как экспериментально определить параметры произвольного пассивного двухполюсника в цепи переменного тока?

3 Что понимают под активной, реактивной и полной мощностью?

4 Приведите формулы для вычисления активного и реактивного сопротивлений пассивного двухполюсника.

5 Как изменяется фаза тока в цепи, содержащей идеальную катушку индуктивности (идеальный конденсатор)?

4 Лабораторная работа № 4. Исследование резонансных явлений в линейных электрических цепях

Цель работы: экспериментальное исследование резонансных явлений в линейных электрических цепях.

4.1 Порядок работы

4.1.1 Рассчитать резонансную емкость конденсатора, используя параметры катушки индуктивности, полученные в лабораторной работе № 2, по формуле

$$C_p = \frac{1}{\omega^2 L}. \quad (4.1)$$

4.1.2 Исследовать резонанс при последовательном соединении R , L , C (резонанс напряжений) при помощи схемы электрической цепи, представленной на рисунке 4.1. Собрать схему на стенде. Поддерживая постоянное значение напря-

жения на входе цепи (значение напряжения не должно превышать 50 В), изменять емкость конденсатора при помощи переключателей на стенде.

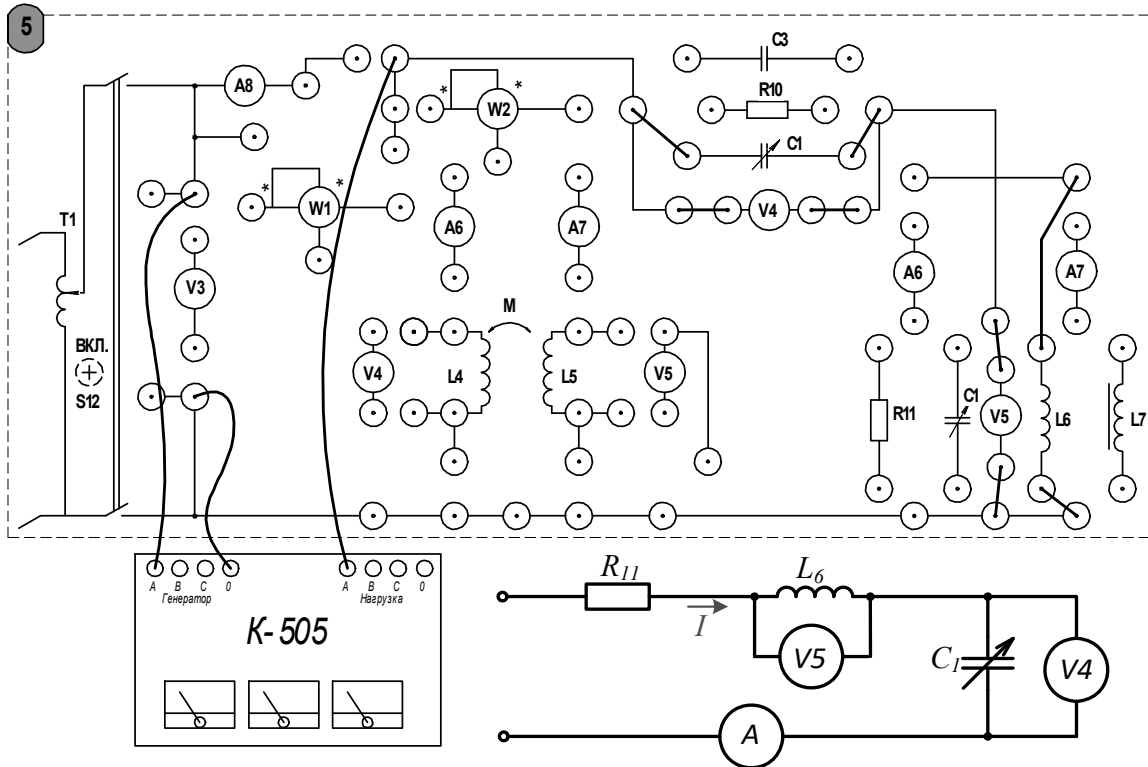


Рисунок 4.1 – Схема для исследования резонанса напряжений

Экспериментально установить значение емкости, при котором ток в цепи максимален, сравнить полученное значение емкости с результатом расчета по формуле (4.1). Определить угол сдвига фазы по формуле (4.2), а также значение $\cos(\varphi)$ в режиме резонанса напряжений. Если при этом $\cos(\varphi) < 0,92$, опыт следует провести повторно и точнее настроить схему в резонанс.

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4.2)$$

Определить добротность резонансного контура по формуле

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (4.3)$$

Результаты эксперимента и расчетов занести в таблицу 4.1 и построить графики зависимостей $I(C)$ и $\varphi(C)$.

4.1.3 Исследовать резонанс при параллельном соединении элементов R , L , C (резонанс токов), изменяя емкость конденсатора при помощи переключателей на стенде. Экспериментально определить значение емкости, при котором наступает

резонанс токов (рисунок 4.2). Результаты эксперимента и расчетов занести в таблицу 4.2 и построить графики зависимостей $I(C)$ и $\varphi(C)$.

Таблица 4.1 – Результаты исследования резонанса напряжений

Измерено						Рассчитано			
I, A	U, B	U_R, B	U_L, B	U_C, B	$P, Вт$	$Z, Ом$	$\varphi, град$	$X_L, Ом$	$X_C, Ом$

Таблица 4.2 – Результаты исследования резонанса токов

Измерено				Рассчитано			
U, B	I_L, B	I_C, B	$P, Вт$	$Y, См$	$\varphi, град$	$b_L, См$	$b_C, См$

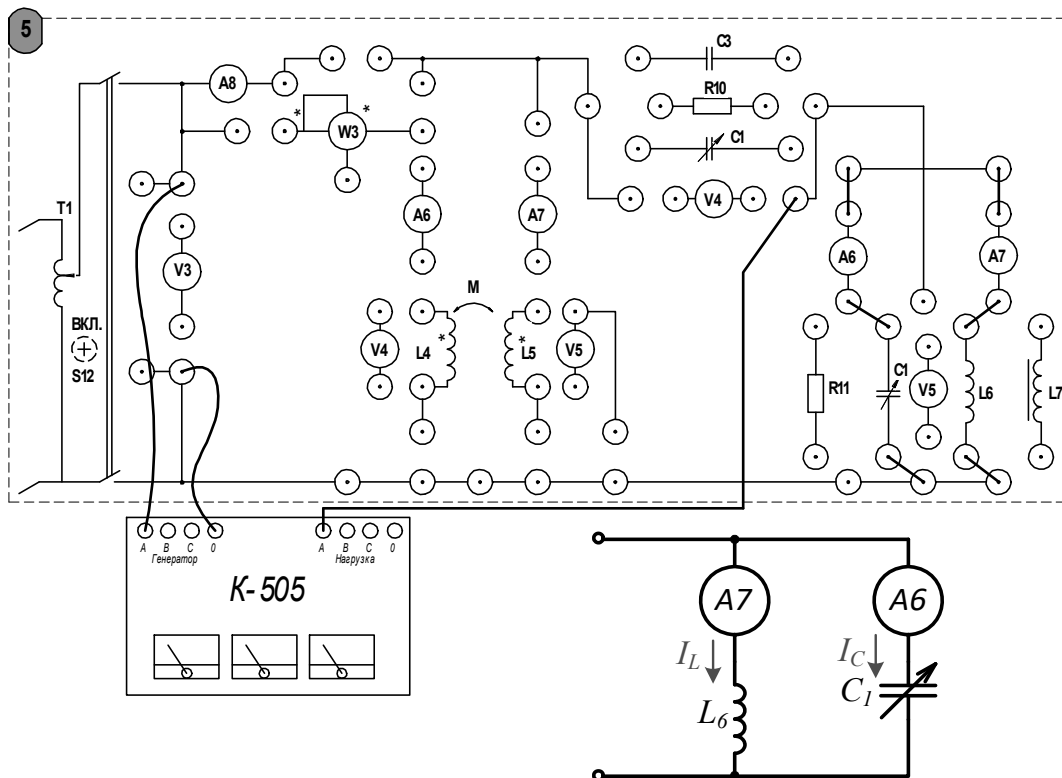


Рисунок 4.2 – Схема для исследования резонанса токов

4.1.4 Используя данные из таблиц 4.1 и 4.2, 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 необходимо указать, чем обусловлено это несоответствие.

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.

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?

5 Лабораторная работа № 5. Исследование индуктивно-связанных цепей

Цель работы: изучение явлений в электрических цепях с индуктивной связью. Экспериментальное определение параметров индуктивно-связанных элементов и исследование процесса обмена энергией между контурами посредством магнитного поля.

5.1 Порядок выполнения работы

5.1.1 Собрать схему для определения параметров катушек индуктивности, изображенную на рисунке 5.1.

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

5.1.3 Используя формулы (5.1)–(5.4), приведенные в лабораторной работе № 3, определить параметры катушек: индуктивность и активное сопротивление обмотки. Результаты эксперимента и вычислений записать в таблицу 5.1.

5.1.4 Собрать схему для исследования последовательного согласного соединения катушек, представленную на рисунке 5.2. Выполнить измерения тока, напряжения и мощности при помощи измерительного комплекта К-505. Результаты занести в таблицу 5.2.

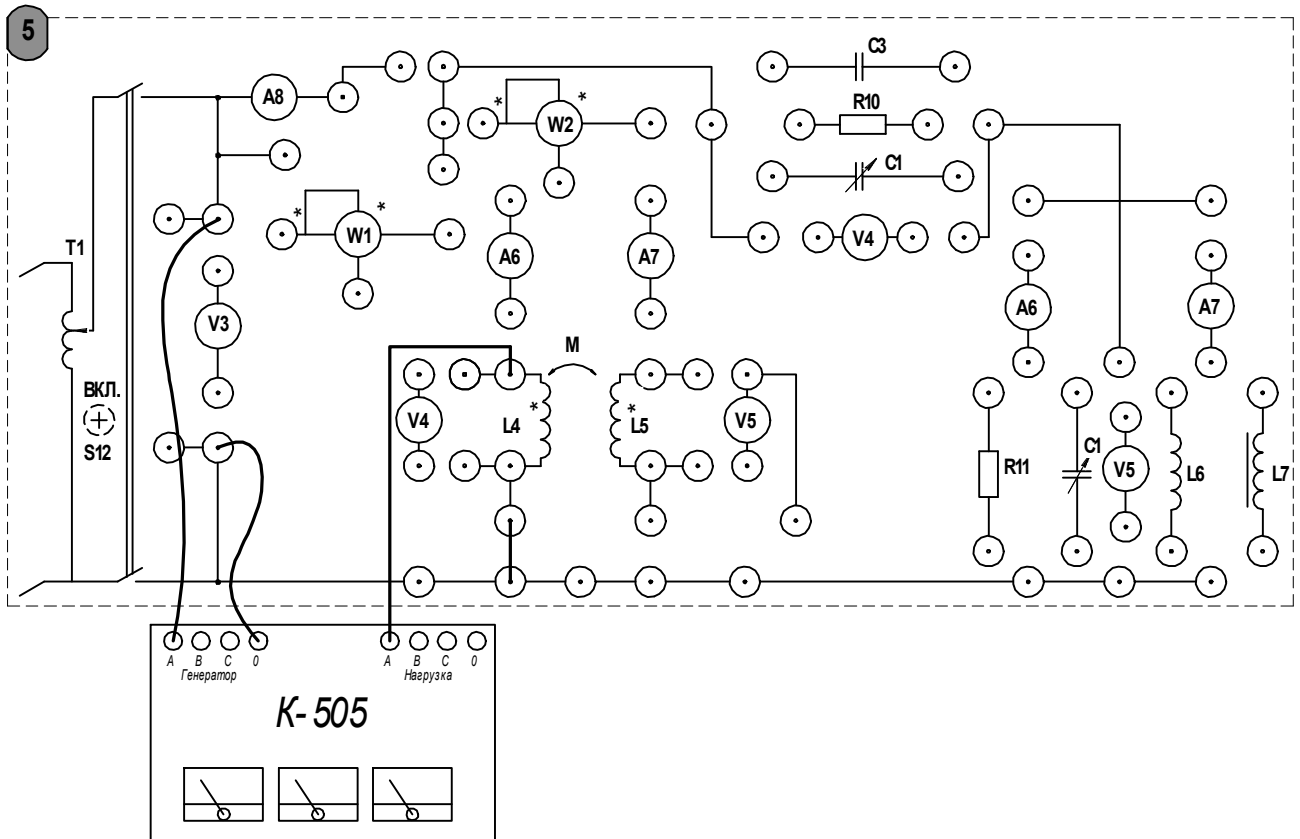


Рисунок 5.1 – Схема для исследования параметров катушек

Таблица 5.1 – 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								

Таблица 5.2 – Исследование последовательного соединения катушек

Соединение	Измерено					Рассчитано					
	U , В	I , А	U_1 , В	U_2 , В	P , Вт	Z_{Σ} , Ом	R_{Σ} , Ом	X_{Σ} , Гн	M , Гн	k	φ , град
Встречное											
Согласное											

5.1.5 Собрать схему для исследования последовательного встречного соединения катушек, представленную на рисунке 5.3. Выполнить измерения тока, напряжения и мощности при помощи измерительного комплекта К-505. Результаты занести в таблицу 5.2.

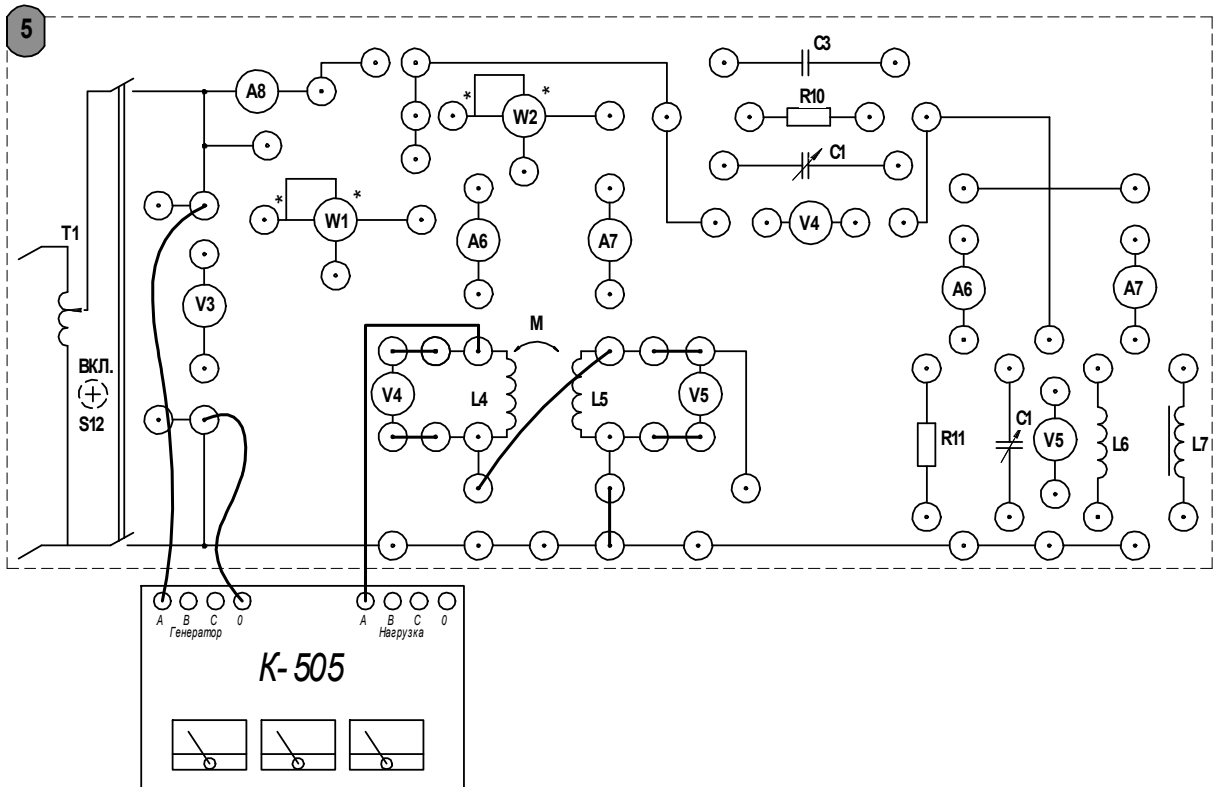


Рисунок 5.2 – Схема последовательного согласного соединения катушек

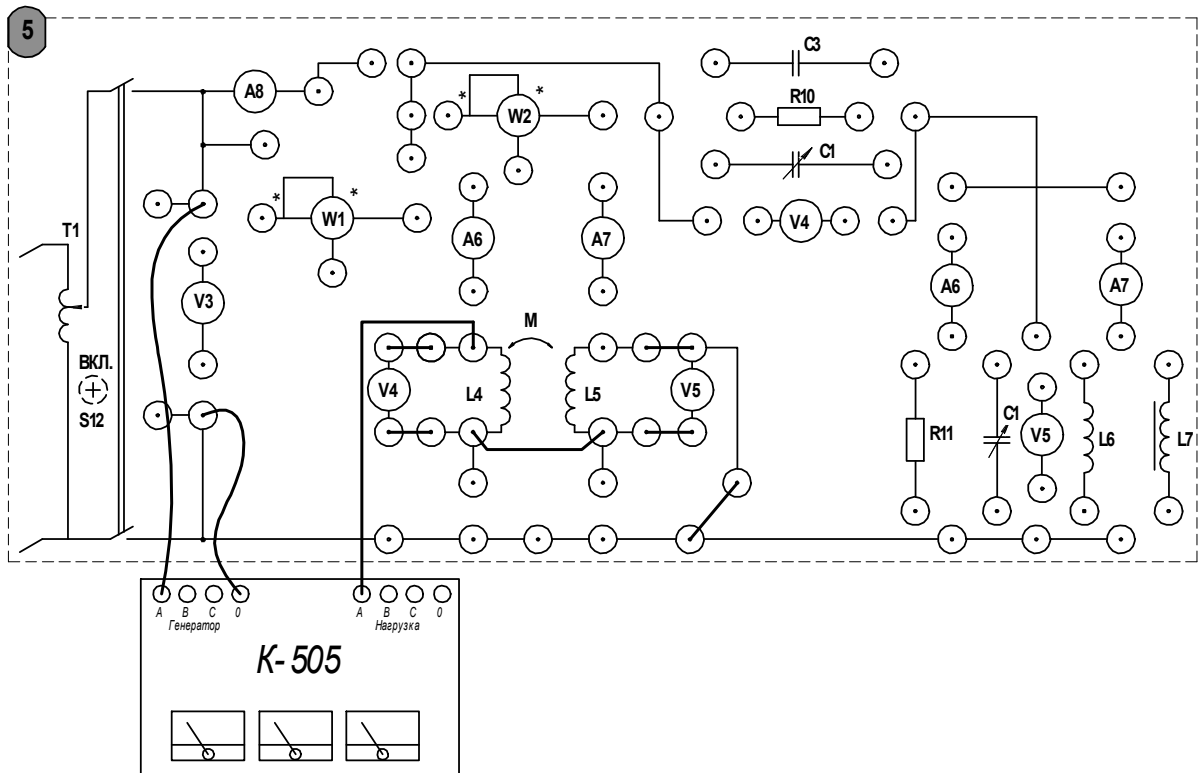


Рисунок 5.3 – Схема последовательного встречного соединения катушек

По результатам измерений вычислить параметры цепи и взаимную индуктивность по формуле

$$M = \frac{X_{\text{э.согл.}} - X_{\text{э.встр.}}}{4\omega}, \quad (5.1)$$

а также коэффициент связи

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_4 L_5}}. \quad (5.2)$$

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

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.

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?

6 Лабораторная работа № 6. 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.

Порядок выполнения работы

6.1.1 Подключить к сети генератор сигналов и настроить режим работы следующим образом. При помощи клавиш на лицевой панели выбрать форму напряжения Ramp , установить амплитуду $U_m = 20 \text{ Vpp}$ и частоту колебаний $f = 50 \text{ Гц}$ (рекомендации по настройке генератора приведены в лабораторной работе № 9).

6.1.2 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 6.1.

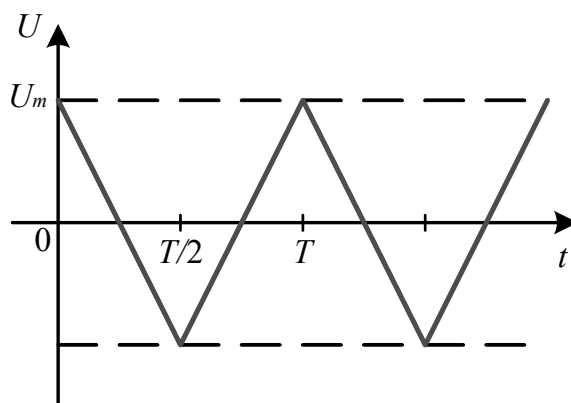


Рисунок 6.1 – Форма исследуемого сигнала

6.1.3 Собрать по схеме, представленной на рисунке 9.4 (лабораторная работа № 9), последовательный колебательный контур. Изменяя емкость конденсатора при помощи блока С1 на стенде, проследить за изменением осциллограммы тока.

6.1.4 Применяя формулу (5.1) (см. лабораторную работу № 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.

6.1.5 Выполнить разложение в ряд Фурье исследуемого напряжения (см. рисунок 6.1) 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: осциллограмму исследуемого сигнала; формулы и вычисления резонансных емкостей; осциллограммы отдельных гармоник; разложение в ряд Фурье.

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?

7 Лабораторная работы № 7. Переходные процессы в линейных электрических цепях постоянного тока

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.

7.1 Порядок выполнения работы

7.1.1 Настроить генератор сигналов следующим образом. Установить прямоугольную форму напряжения, нажав кнопку Square, при помощи кнопок экранного меню выбрать пункт Amplitude, на цифровой клавиатуре ввести максимальное значение амплитуды 20 Vpp. 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 блоке лабораторной работы. 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.

7.1.2 Собрать схему для исследования переходного процесса в RC-цепи согласно схеме, представленной на рисунке 7.1. Установить при помощи панели C1 на стенде емкость конденсатора и значение сопротивления R17, рекомендованные преподавателем.

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 7.1 параметры цепи. По осциллограммам определить постоянную времени цепи (рисунок 7.2), эту же величину рассчитать по известным параметрам, используя формулу $\tau_{RC} = RC$. Сравнить результаты расчета и эксперимента.

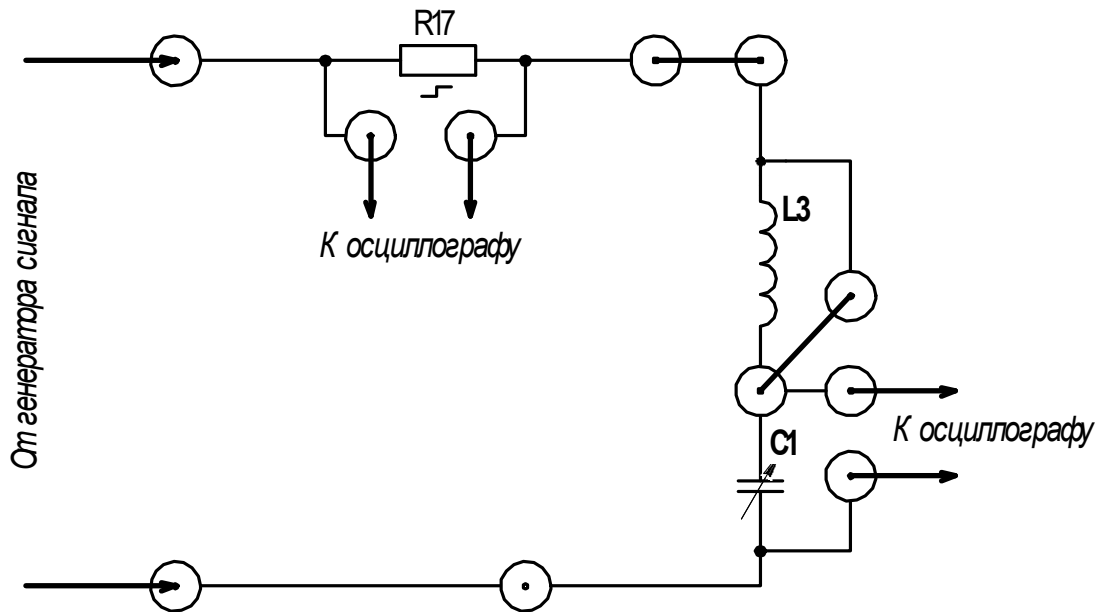


Рисунок 7.1 – Схема для исследования переходного процесса в RC-цепи

Таблица 7.1 – Величина индуктивности*

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

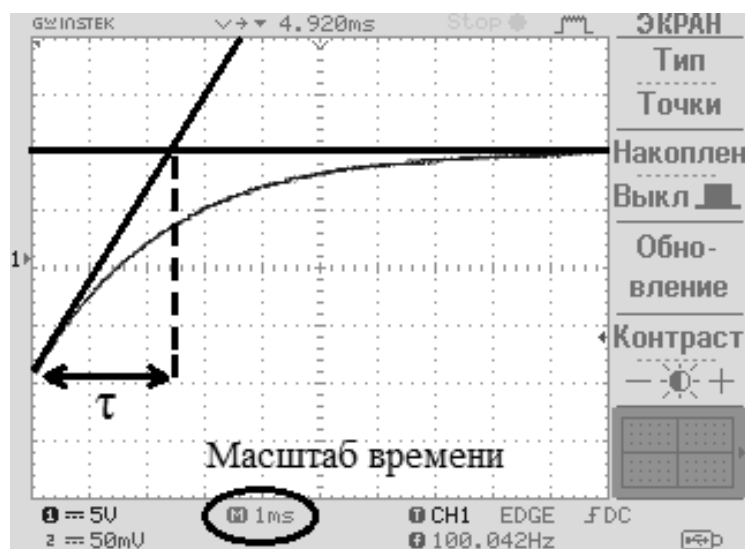


Рисунок 7.2 – Способ определения постоянной времени цепи по осциллограмме

Величины индуктивностей также указаны на стендах.

7.1.3 Собрать схему для исследования переходного процесса в RL-цепи согласно схеме, представленной на рисунке 7.3. Индуктивность катушки фиксирована и приведена в таблице 7.1 для каждого стенда. Изменяя величину сопротивления R17, проследить за изменением осциллограммы. Для двух различных параметров сохранить осциллограмму.

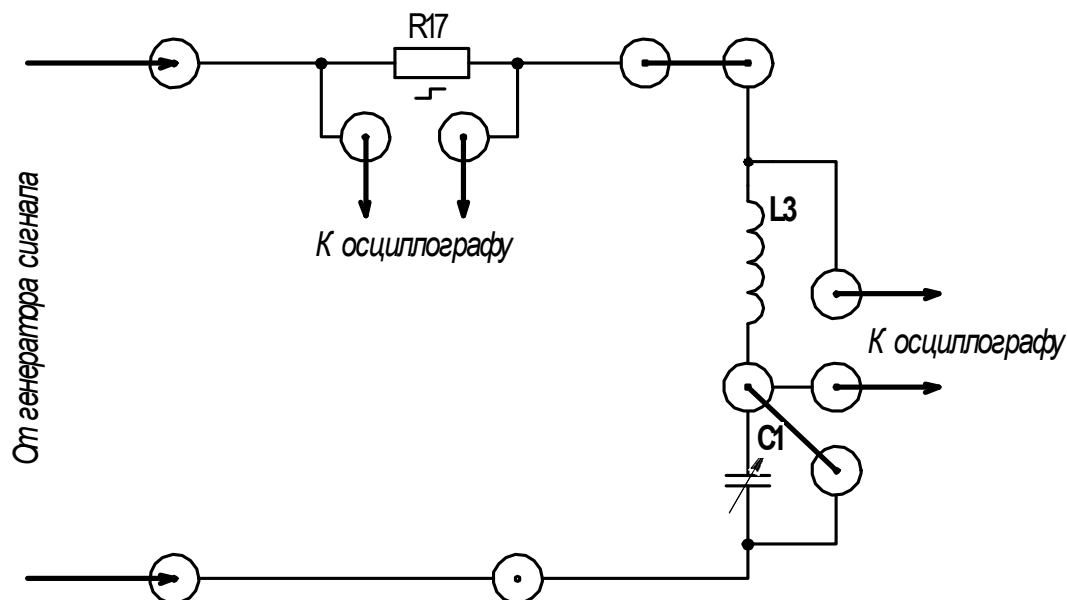


Рисунок 7.3 – Схема для исследования переходного процесса в RL-цепи

Параметры цепи записать в таблицу 7.2. По осциллограммам определить постоянную времени цепи, рассчитать эту же величину по формуле $\tau_{RL} = L/R$ и сравнить результаты.

Таблица 7.2 – Результаты эксперимента

Номер опыта	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	$u_C(t)$					

7.1.4 Собрать схему для исследования аperiodического процесса и затухающих колебаний в последовательном RLC-контуре, представленную на рисунке 7.4.

Установить значение сопротивления R17 в диапазоне от 100 до 600 Ом, а значение емкости C1 – в диапазоне от 4 до 10 мкФ. Уменьшая емкость, проследить за изменением осциллограммы. Фиксировать значение емкости, при котором аperiodический процесс переходит в колебательный. В таблицу 7.2 записать

параметры цепи, соответствующие колебательному процессу. Сохранить осциллограмму и с ее помощью определить постоянную времени колебательного контура (рисунок 7.5). Рассчитать постоянную времени колебательного контура по формуле $\tau = 2L/R$ и сравнить с экспериментом.

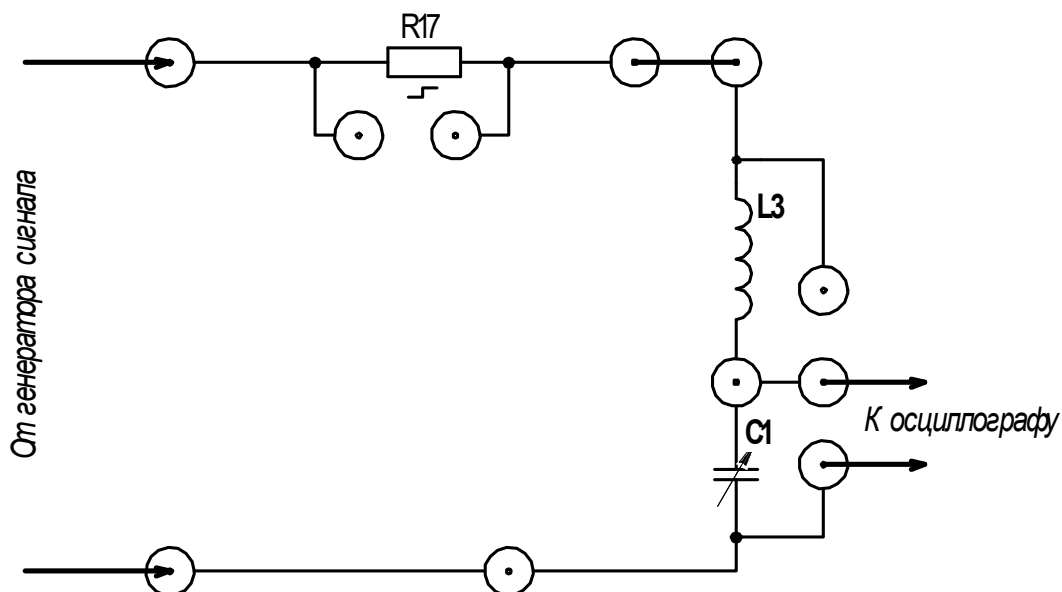


Рисунок 7.4 – Схема для исследования переходного процесса в RLC-цепи

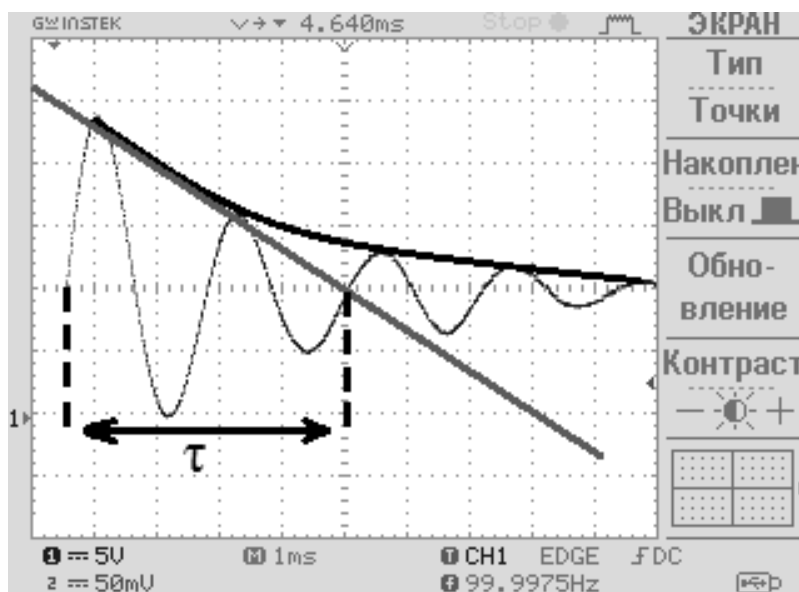


Рисунок 7.5 – Способ определения постоянной времени колебательного контура

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

$$\omega_{расч} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}; \quad \omega_{эксп} = \frac{2\pi}{T_{эксп}}, \quad (7.1)$$

где $T_{\text{эксн}}$ – период затухающих колебаний по осциллограмме.

Определить логарифмический декремент затуханий по результатам эксперимента и аналитически, используя формулу. Сравнить полученные результаты.

$$d = \frac{1}{\tau} \cdot T. \quad (7.2)$$

Содержание отчета

Отчет должен содержать: цель работы; схемы исследуемых электрических цепей для каждого эксперимента; распечатанные осциллограммы с необходимыми графическими построениями, помещенные в соответствии с видом цепи; ход вычислений, заполненную таблицу 7.2; 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?

8 Лабораторная работа № 8. Исследование интегрирующих и дифференцирующих цепей

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

8.1 Порядок выполнения работы

8.1.1 Подготовить генератор сигналов и осциллограф к работе согласно рекомендациям и убедиться в корректности параметров сигнала согласно рекомендациям, представленным в п. 7.1.1 лабораторной работы № 7. 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 № 6. Однако при надлежащем выборе параметров цепи можно получить осциллограммы, соответствующие интегралу и производной от прямоугольного импульса.

8.1.2 Ознакомьтесь со схемами опытов, представленными на рисунке 8.1. Рассчитать сопротивление R и постоянную времени τ для дифференцирующей RC-цепи (см. рисунок 8.1, а), принимая емкость конденсатора в цепи равной 0,2...0,5 мкФ, учитывая условие дифференцирования

$$RC \ll t_0, \quad (8.1)$$

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

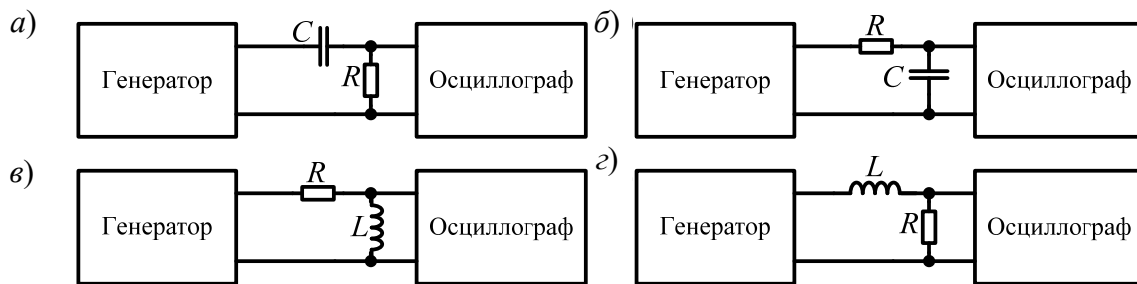


Рисунок 8.1 – Схемы интегрирующих и дифференцирующих цепей

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 8.1, используя параметры двух экспериментов, в одном из которых выполняется условие (8.1), а в другом – нет. Амплитуду и длительность выходного сигнала определить по осциллограмме.

Таблица 8.1 – 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						

8.1.3 При тех же параметрах входного сигнала рассчитать емкость конденсатора и постоянную времени интегрирующей цепи, учитывая условие интегрирования (см. рисунок 8.1, б)

$$RC \gg t_0. \quad (8.2)$$

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 8.1.

8.1.4 Исследовать интегрирующие и дифференцирующие RL-цепи (см. рисунок 8.1, в, г). Учсть, что в экспериментах с RL-цепью доступным для изменения остается лишь параметр R . Условия дифференцирования и интегрирования аналогичны (8.1) и (8.2) соответственно, если учесть, что постоянная времени RL-цепи определяется как $\tau = L/R$. Заполнить таблицу 8.1.

Содержание отчета

Отчет должен содержать: цель работы; таблицу 8.1 и ход всех вычислений; 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?

9 Лабораторная работа № 9. Исследование цепей с нелинейными резистивными сопротивлениями

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

9.1 Порядок выполнения работы

9.1.1 Собрать схему, представленную на рисунке 9.1, 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 9.1 и построить ВАХ графически.

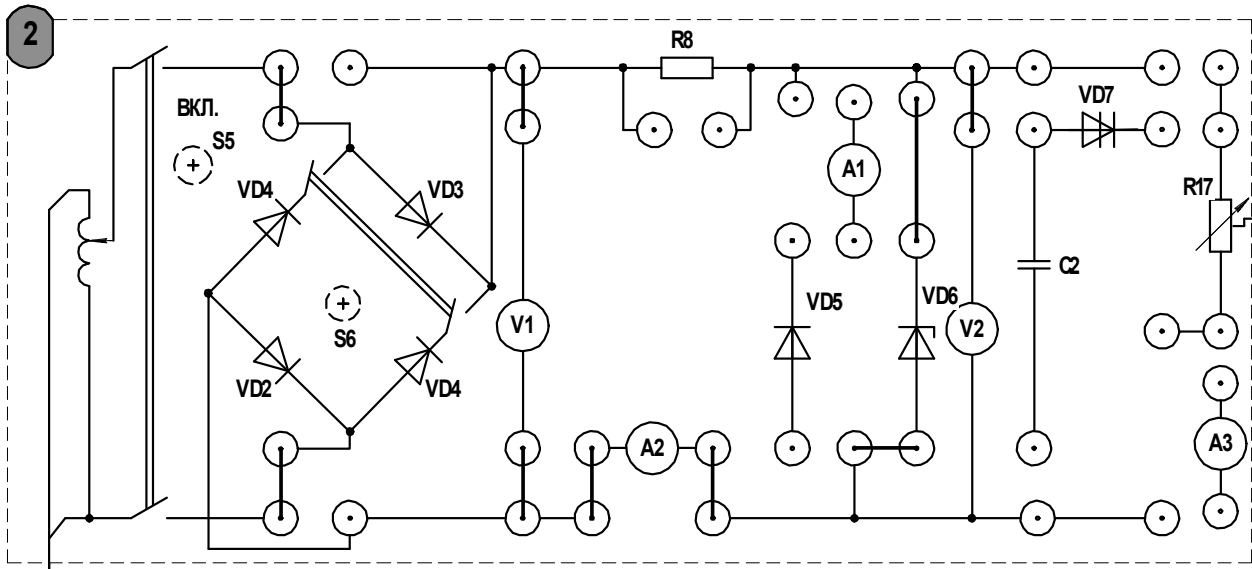


Рисунок 9.1 – Схема для исследования ВАХ стабилитрона

Таблица 9.1 – Экспериментальное исследование ВАХ

$U, \text{В}$									
$I, \text{А}$									

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.

9.2.2. Для обратной ветви ВАХ стабилитрона рассчитать статическое и дифференциальное сопротивление (или проводимость по указанию преподавателя) (рисунок 9.2).

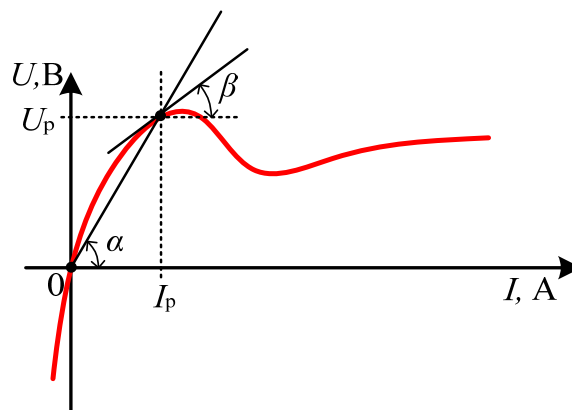


Рисунок 9.2 – Методика определения статического и дифференциального сопротивления

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

$$R_c = \frac{U}{I} = \frac{m_u}{m_i} \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (9.1)$$

где m_u – масштаб напряжения;
 m_i – масштаб тока.

9.1.3 Исследовать работу однополупериодного (тумблер S6 выключен) и двухполупериодного (тумблер S6 включен) выпрямителей. Для этого необходимо собрать схему, представленную на рисунке 9.3. Сохранить и поместить в отчет осциллограммы колебаний тока, изобразить электрические схемы выпрямителей.

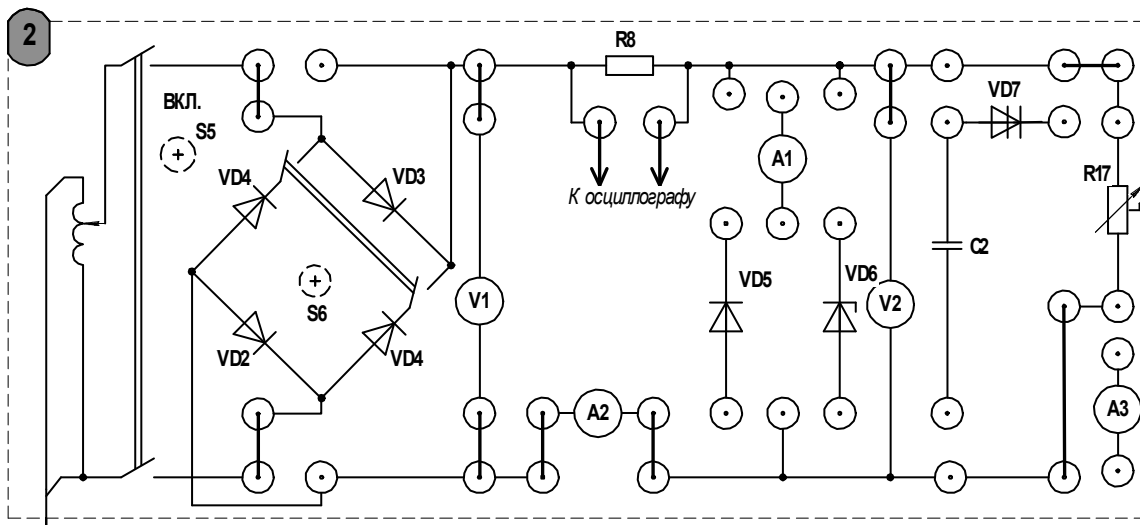


Рисунок 9.3 – Схема для исследования выпрямителей напряжения

9.1.4 Собрать схему, представленную на рисунке 9.4, и исследовать работу динистора. В положительном полупериоде синусоиды входного напряжения напряжение на конденсаторе возрастает до значения, соответствующего пробоему 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.

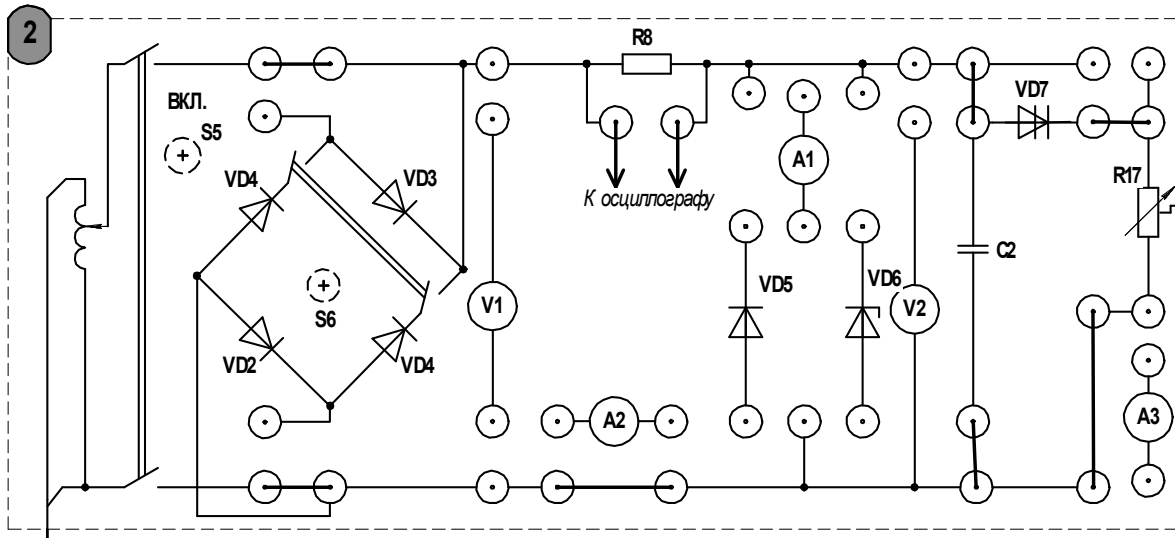


Рисунок 9.4 – Схема для исследования работы диодистора

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 сопротивления 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 сопротивление графически?
- 4 Изложите методику графического расчета нелинейных цепей постоянного тока.

10 Лабораторная работа № 10. Исследование катушки с магнитопроводом в цепи переменного тока

Цель работы: исследование зависимости формы кривой тока в цепи с катушкой индуктивности, содержащей сердечник из ферромагнитного материала. Экспериментальное определение параметров эквивалентной схемы катушки.

10.1 Порядок выполнения работы

10.1.1 Катушка индуктивности смонтирована на панели с выводами 1-1 и 2-2 (первичные и вторичные зажимы соответственно) и имеет $w_1 = 2400$ витков на основной обмотке и $w_2 = 1200$ витков на вторичной обмотке, которая предназначена для измерения индуцированной ЭДС. К катушке прилагается набор различных сердечников: стальной сплошной разомкнутый; стальной шихтованный разомкнутый; стальной шихтованный замкнутый.

Для выполнения лабораторной работы необходимо подключить катушку к стенду через измерительный комплект К-505 по схеме, представленной на рисунке 10.2. Эквивалентная схема катушки приведена на рисунке 10.1.

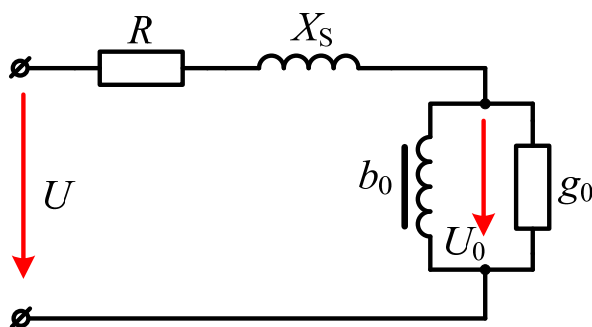


Рисунок 10.1 – Эквивалентная схема катушки с магнитопроводом

10.1.2 Выполнить измерения тока, напряжения и активной мощности катушки без сердечника. Этот эксперимент необходим для расчета активного сопротивления обмотки, которое должно учитываться в последующих экспериментах. Устанавливая поочередно предложенные типы сердечников, измерить напряжение, ток и активную мощность. Результаты экспериментов занести в таблицу 10.1.

10.1.3 Рассчитать потери мощности на нагрев обмотки и потери мощности в стали (сюда относятся потери на нагрев сердечника, вызванные наличием токов Фуко, и потери на перемагничивание) для каждого из предложенных сердечников.

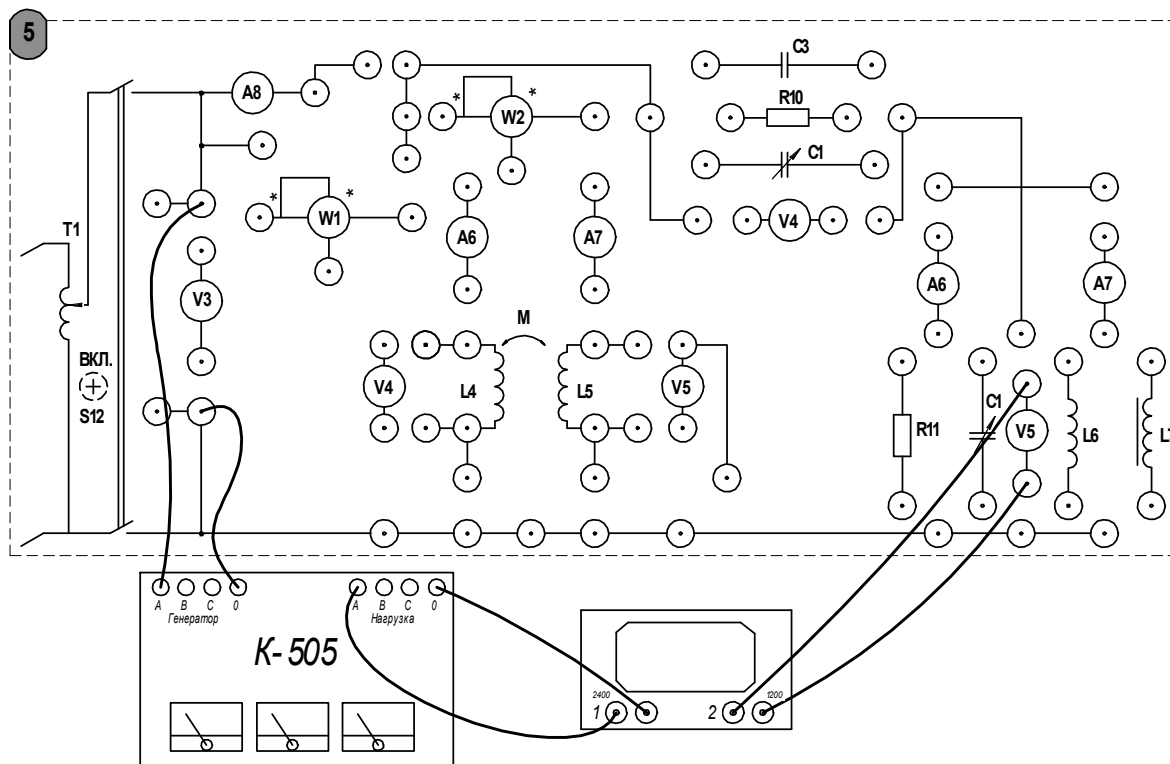


Рисунок 10.2 – Схема подключения катушки с магнитопроводом

Таблица 10.1 – Результаты экспериментов и расчетов

Тип сердечника	Измерено				Рассчитано								
	U , В	P , Вт	I , А	U_2 , В	Z_{Σ} , Ом	R_{Σ} , Ом	X_{Σ} , Ом	φ , град	g_0 , См	b_0 , См	P_{Σ} , Вт	P_{CT} , Вт	U_0 , В
Без сердечника													
Стальной сплошной разомкнутый													
Стальной шихтованный разомкнутый													
Стальной шихтованный замкнутый													

При расчете необходимо учесть следующее:

- активное сопротивление обмотки определяется из эксперимента без сердечника по известной формуле $R = P/I^2$;
- при наличии сердечника активная мощность расходуется не только на нагрев обмотки, присутствуют также потери в стали. Справедливо следующее равенство:

$$P_{\Sigma} = I^2 R + P_{CT}; \quad (10.1)$$

– вторичная измерительная обмотка w_2 используется для экспериментального определения напряжения U_0 на эквивалентной схеме:

$$U_0 = \frac{w_1}{w_2} U_2, \quad (10.2)$$

где U_2 – напряжение холостого хода на зажимах вторичной обмотки;

– суммарная реактивная мощность катушки с ферромагнитным сердечником состоит из реактивной мощности намагничивания и реактивной мощности, обусловленной потоками рассеяния. Получаем следующее равенство:

$$Q_\Sigma = Q_H + Q_S. \quad (10.3)$$

Учитывая вышесказанное, параметры эквивалентной схемы катушки с ферромагнитным сердечником, представленной на рисунке 10.1, можно рассчитать по формулам

$$\begin{aligned} g_0 &= \frac{P_{CT}}{U_0^2}; & I_a &= \frac{P_{CT}}{U_0}; & I_p &= \sqrt{I^2 - I_a^2}; \\ b_0 &= \frac{I_p}{U_0}; & Q_{CT} &= U_0 I_p; & Q &= \sqrt{(UI)^2 - P^2}; & X_S &= \frac{Q_S}{I^2}. \end{aligned} \quad (10.4)$$

10.1.4 Исследовать влияние сердечника катушки на кривую тока в цепи. В этом эксперименте используется катушка индуктивности L7 с сердечником, изготовленным из магнитомягкого материала – пермаллоя. Осциллограмму тока сохранить и приложить к готовому отчету.

10.1.5 По данным таблицы 10.1 построить векторную диаграмму.

Содержание отчета

Отчет должен содержать: цель работы; таблицу с результатами расчета и эксперимента; ход вычислений; эквивалентную схему катушки с магнитопроводом; осциллограммы тока; векторную диаграмму.

Контрольные вопросы

- 1 Как влияет нелинейность вебер-амперной характеристики катушки с магнитопроводом на форму кривой тока в цепи?
- 2 При каких условиях можно применять эквивалентные синусоиды?
- 3 Приведите эквивалентную схему катушки с магнитопроводом.
- 4 Изобразите векторную диаграмму катушки с магнитопроводом.
- 5 При экспериментальном определении параметров эквивалентной схемы катушки выполняют опыт без сердечника. Для чего это необходимо?
- 6 Как определить эквивалентную индуктивность?

11 Лабораторная работа № 11. Исследование феррорезонансных цепей

Цель работы: экспериментальное исследование явления феррорезонанса в последовательных и параллельных контурах, содержащих катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником.

11.1 Порядок выполнения работы

11.1.1 Собрать схему, представленную на рисунке 11.1, 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.

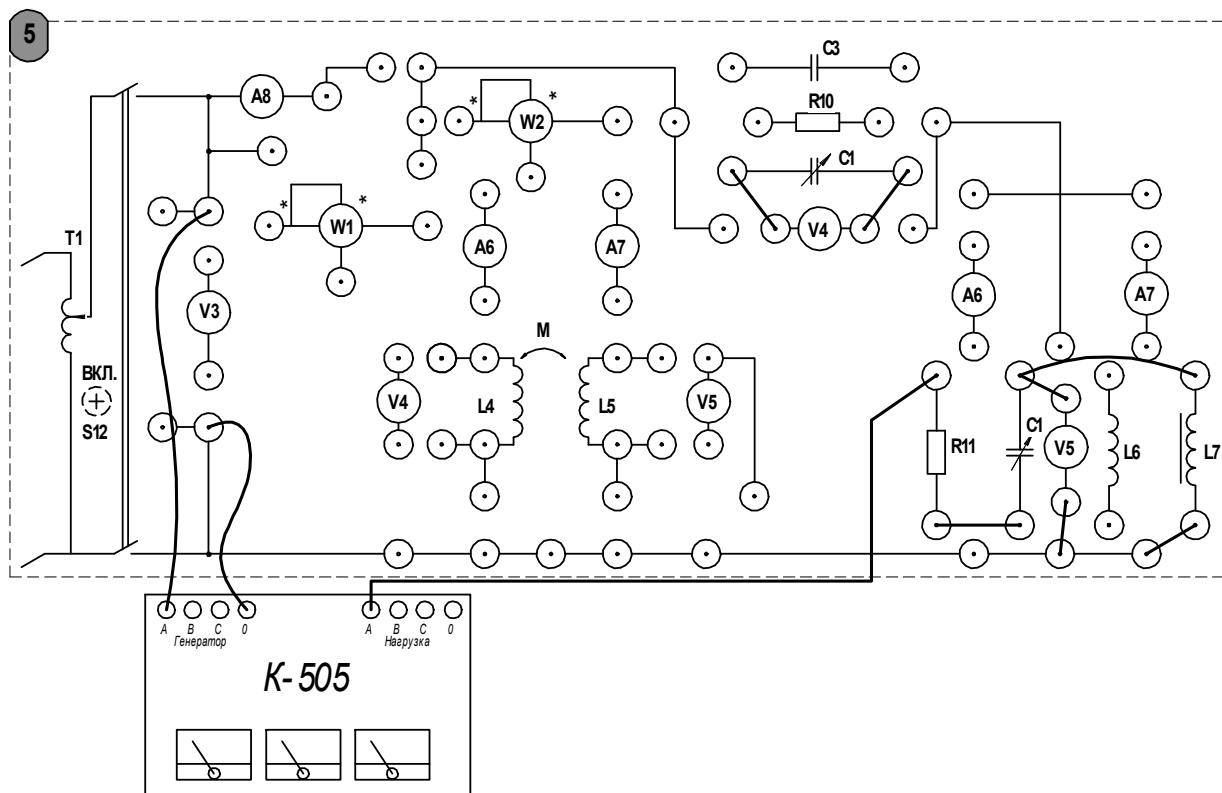


Рисунок 11.1 – Схема для исследования феррорезонанса в последовательном контуре

Построить график ВАХ по полученным точкам.

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

$$\frac{1}{\omega C} = \sqrt{\left(\frac{U_L}{I}\right)^2 - R^2}. \quad (11.1)$$

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

11.1.3 Получить экспериментальную зависимость $I = f(U)$ последовательного колебательного контура с нелинейной катушкой индуктивности. Для этого необходимо собрать схему, представленную на рисунке 11.1. Отметить напряжение U_p , при котором наступает скачкообразное увеличение тока. Затем, постепенно уменьшая напряжение, фиксировать момент скачкообразного уменьшения тока. Заполнить таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Исследование феррорезонанса в последовательном контуре

Номер опыта	U , В	U_L , В	U_C , В	I , А	P , Вт
1					
2					
3					
4					
5					

11.1.4 Собрать схему для исследования феррорезонанса в параллельном контуре, представленную на рисунке 11.2. Не изменяя установленной ранее резонансной емкости, плавно изменяя входное напряжение на входных зажимах цепи, получить экспериментальную зависимость $I = f(U)$. Заполнить таблицу 11.2.

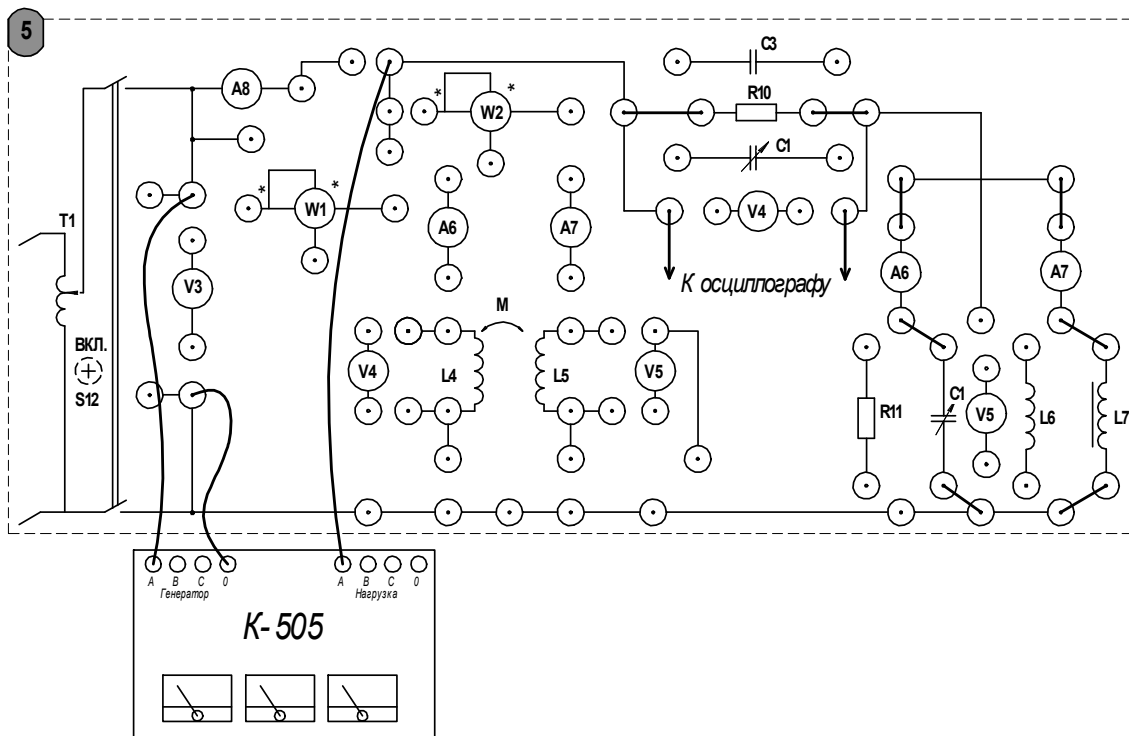


Рисунок 11.2 – Схема для исследования феррорезонанса в параллельном контуре

Таблица 11.2 – Исследование феррорезонанса в параллельном контуре

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

11.3 Содержание отчета

Отчет должен содержать: цель работы; электрические схемы последовательного и параллельного контуров с нелинейной катушкой индуктивности; заполненные таблицы; графики зависимостей согласно пп. 11.2.3 и 11.2.4; осциллограммы тока согласно п. 11.2.5; 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?

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 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» / Сост. Г. И. Скрыбина [и др.]. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2016. – 43 с.