

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**Федеральное государственное автономное образовательное учреждение**  
**высшего образования**  
**«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**  
**Невинномысский технологический институт (филиал)**

Методические указания по выполнению лабораторных работ по дисциплине  
«Теоретические основы электротехники»

Направление подготовки 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника  
Профиль подготовки – Электропривод и автоматика промышленных установок  
и технологических комплексов  
Квалификация выпускника – бакалавр

Методические указания предназначены для проведения лабораторных работ по дисциплине «Теоретические основы электротехники» для студентов направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» и соответствуют требованиям ФГОС ВО направления подготовки бакалавров.

Составитель: Б.А. Добнер

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие .....	4
Лабораторная работа 1 «Разветвленная цепь постоянного тока».....	8
Лабораторная работа 2 «Исследование электрической цепи методом наложения, взаимности и эквивалентного генератора».....	14
Лабораторная работа 3 «Исследование неразветвленной цепи переменного тока».....	19
Лабораторная работа 4 «Исследование разветвленной цепи переменного тока».....	27
Лабораторная работа 5 «Исследование электрической цепи с взаимной индуктивностью».....	35
Лабораторная работа 6 «Исследования четырехполюсника».....	42
Лабораторная работа 7 «Исследование трехфазной системы при соединении нагрузки звездой».....	48
Лабораторная работа 8 «Исследование трехфазной системы при соединении приемников треугольником».....	54
Лабораторная работа 9 «Исследование переходного процесса в электрической цепи, содержащей резистор и конденсатор».....	59
Лабораторная работа 10 «Изучение переходных процессов в линейной неразветвленной электрической цепи».....	64
Лабораторная работа 11 «Магнитный усилитель мощности».....	69
Лабораторная работа 12 «Нелинейная управляемая индуктивность».....	74
Лабораторная работа 13 «Феррорезонанс токов».....	80
Лабораторная работа 14 «Феррорезонанс напряжений».....	85
Лабораторная работа 15 «Характеристики однородной линии передачи».....	91
лабораторная работа 16 «Исследование электрического поля постоянного тока в проводящих листах.....	97
Литература.....	107
Приложение 1. Правила выполнения лабораторных работ в лаборатории теоретических основ электротехники.....	109
Приложение 2. Правила безопасности при сборке схемы и выполнении работ.....	111

## **ПРЕДИСЛОВИЕ**

Инженер-электрик должен знать физические законы электротехники, уметь применять их для решения конкретных технических задач, исследования различных электротехнических устройств, промышленных электротехнических установок и технологических комплексов. Уметь анализировать протекающие в них процессы, поэтому в предлагаемом пособии уделено большое внимание основным электротехническим процессам.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1

### “РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА”

**Цель работы:** Изучить основные закономерности в линейных электрических цепях постоянного тока. Овладеть методикой составления уравнений по законам Кирхгофа и построения потенциальной диаграммы.

#### Программа работы

1. Рассчитать токи в цепи воспользовавшись законами Кирхгофа.
2. Исследовать экспериментально распределение токов и напряжений в разветвленной цепи постоянного тока.
3. Составить выражения по закону Ома для участка цепи (пассивной или активной ветвей). Используя данные п.2 рассчитать величины сопротивлений:  $R_{в1}$ ,  $R_{в2}$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $R_5$ ,  $R_6$ .

*Примечание: Каждый студент бригады считает свои три сопротивления.*

4. Построить в масштабе потенциальную диаграмму замкнутого контура, приняв потенциал одной из точек цепи (например, точки "а") равным нулю. Используя данные измерения токов, сопротивлений, ЭДС, аналитически вычислить потенциалы точек электрической цепи и сравнить их с потенциалами на диаграмме.

*Примечание: 1. Каждый студент бригады строит потенциальную диаграмму для своего контура.*

*2. Каждый студент бригады вычисляет потенциалы 2-х точек своего контура.*

5. Составить и проверить баланс мощностей.

#### Элементы теории

Для установления соотношений между ЭДС, напряжениями и токами в сложных электрических цепях, пользуются законами Ома и Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа устанавливает связь между токами ветвей, имеющих общий узел, и формулируется так: **алгебраическая сумма токов в любом узле равна нулю**

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0 \quad (1.1)$$

При этом токи, направленные к узлу и от него, берутся с разными знаками.

Второй закон Кирхгофа: **в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжений равна алгебраической сумме ЭДС.**

$$\sum_{k=1}^n I_k \cdot R_k = \sum_{k=1}^n E_k . \quad (1.2)$$

При записи уравнений по второму закону Кирхгофа произвольно выбирают направление обхода контура. Если при обходе контура направление обхода совпадает с направлением тока, то падение напряжения  $I_k R_k$  берется со знаком плюс, в противном случае – со знаком минус.

Закон Ома устанавливает связь между напряжением, сопротивлением и током для некоторого участка (ветви) электрической цепи:

$$I = \frac{U \pm E}{R} \quad (1.3)$$

ЭДС  $E$  и напряжение  $U$  в этом выражении берутся со знаком плюс, если их направление совпадает с направлением тока на этом участке и со знаком минус, если эти направления не совпадают. Если в ветви ЭДС отсутствует (пассивная ветвь), то последнее выражение принимает вид:

$$I = \frac{U}{R} \quad (1.4)$$

Потенциальной диаграммой называется график распределения потенциалов вдоль любого замкнутого контура. Потенциальная диаграмма дает наглядное представление о режиме цепи. Порядок ее построения следующий:

1. Выбирается любой замкнутый контур сложной цепи, и потенциал любой точки этого контура условно принимается равным нулю (точка мысленно заземляется).

2. Относительно выбранной точки измеряются вольтметром (или вычисляются по закону Ома для участка цепи) потенциалы остальных точек этого контура.
3. Выбираются масштабы потенциалов по вертикальной оси и сопротивлений по горизонтальной оси.
4. На диаграмме отображают точки контура, откладывая по оси ординат их потенциалы, а по оси абсцисс – сопротивления участков в последовательности обхода контура. Соединяя полученные точки прямыми линиями, получаем потенциальную диаграмму контура.

В любой электрической цепи имеет место преобразование электрической энергии в другие виды (механическую, тепловую и т.д.). В соответствии с законом сохранения энергии сумма мощностей источников энергии  $P_{ист}$  равна сумме мощностей потребителей  $P_{номр}$ . В сопротивлениях цепи идет необратимое преобразование электрической энергии в тепловую (по закону Джоуля-Ленца  $P_{потр}=I^2R$ ), т.е. они являются потребителями.

Мощность источника ЭДС определяется произведением ЭДС и тока ( $P_{истк} = E_k I_k$ ), где  $E_k$  – ЭДС  $k$ -го источника;  $I_k$  – потребляемый от него ток. Если направления ЭДС и тока совпадают, то источник работает в режиме генератора и соответствующее произведение входит в суммарную мощность источников со знаком плюс, если не совпадают – в режиме потребителя и соответствующее произведение берется со знаком минус.

При изменении величины любой ЭДС или любого сопротивления сложной электрической цепи изменяются токи и напряжения во всех ее ветвях, причем между этими величинами существует линейная зависимость  $y = kx+b$ , где роль  $y$  и  $x$  играют напряжения и токи отдельных ветвей;  $k$  и  $b$  - постоянные коэффициенты).

### **Описание лабораторной установки**

На стенде размещены источники ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , резисторы  $R_1 - R_6$ , два амперметра с переключателями тока различных ветвей, вольтметр.

## Методика выполнения работы

### 1. Расчет токов цепи по законам Кирхгофа

1.1. Измерить вольтметром со щупами  $E_{1xx}$  и  $E_{2xx}$ , а омметром – сопротивления резисторов  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$ . Данные измерений занести в отчет.

1.2. Для электрической цепи, представленной на рисунке 1.1 нанести направления токов в ветвях и записать уравнения по законам Кирхгофа. Подставив измеренные значения сопротивлений резисторов и ЭДС, рассчитать токи на ЭВМ, используя программу GAUSS1. Данные расчета занести в таблицу 1.

2. Экспериментальное исследование распределения токов и напряжений в разветвленной цепи постоянного тока.

2.1. Собрать электрическую цепь согласно рисунку 1.1 и предъявить преподавателю для проверки.

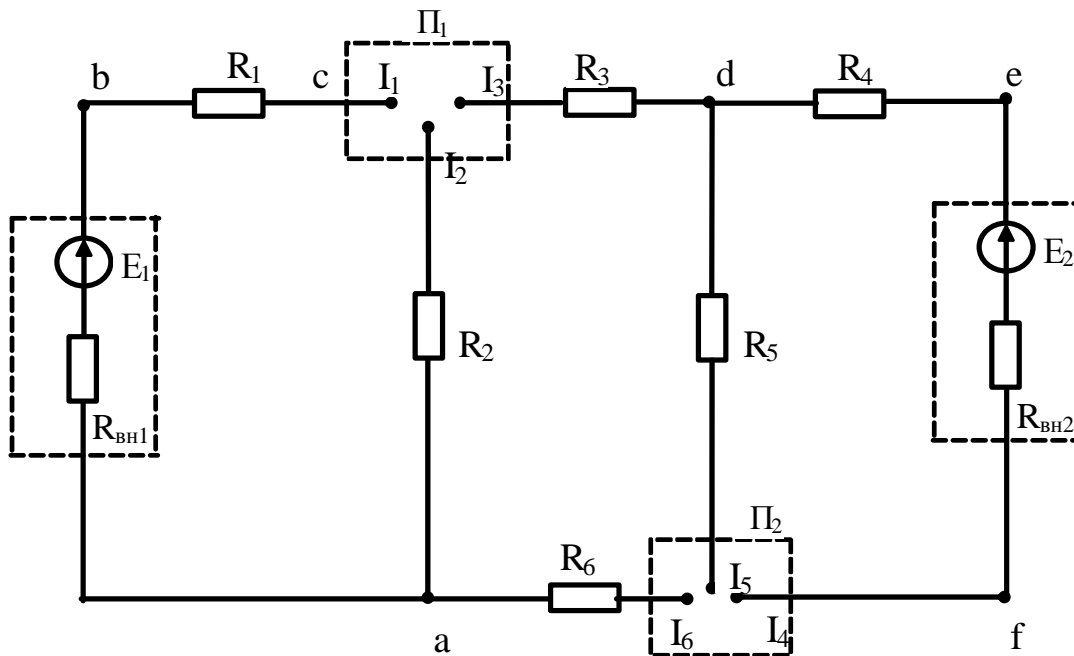


Рисунок 1.1 – Принципиальная схема лабораторной установки

2.2. Включить лабораторный стенд и, пользуясь переключателями  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$ , амперметрами и вольтметром со щупами, измерить токи ветвей и напряжения на элементах схемы. Данные опыта занести в таблицу 1.1. Сравнить измеренные значения с расчетными.

Таблица 1.1 – Распределение токов и напряжений в исследуемой цепи

	Токи, А						Напряжения, В								
	$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$	$U_{ba}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$U_{cd}$	$U_{df}$	$U_{de}$	$U_{ef}$	$U_{fa}$	
Опыт															
Расчет															

3. Составить выражения по закону Ома для участка цепи (пассивной и активной ветвей). Используя данные измерения токов ветвей и напряжений на отдельных участках цепи, а также  $E_{1xx}$  и  $E_{2xx}$ , рассчитать величины сопротивлений  $R_{B1}, R_{B2}$  (внутренние сопротивления источников), а также  $R_1-R_6$ . Сравнить полученные значения сопротивлений резисторов с измеренными омметром (каждый студент рассчитывает

$R_{B1}, R_{B2}$  и свои три сопротивления резисторов).

4. Построение потенциальной диаграммы.

4.1. Приняв одну из точек цепи (например, точку "а") за опорную, измерить вольтметром напряжения между остальными точками схемы и опорной. Потенциал опорной точки принять равным нулю ( $\varphi_a = 0$ ), тогда измеренное напряжение следует рассматривать как потенциал соответствующей точки. Полученные результаты записать в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Распределение потенциалов цепи

$\varphi_a$	$\varphi_b$	$\varphi_c$	$\varphi_d$	$\varphi_e$	$\varphi_f$

4.2. По имеющимся величинам потенциалов точек и сопротивлениям цепи построить в масштабе потенциальную диаграмму замкнутого контура (каждый студент строит потенциальную диаграмму для своего контура).

4.3. Используя результаты измерения токов, сопротивлений, ЭДС, аналитически вычислить потенциалы некоторых точек (каждому студенту две свои точки схемы), сравнить их с потенциалами, полученными на диаграмме.

5. Составить и рассчитать баланс мощностей электрической цепи.

### **Содержание отчета**

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Сформулируйте законы Кирхгофа и правила составления уравнений по этим законам.
2. Сформулируйте закон Ома для пассивной и активной ветвей.
3. Поясните методику построения потенциальной диаграммы.
4. Запишите в общем виде уравнение энергетического баланса и поясните его физический смысл.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

### “ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ МЕТОДОМ НАЛОЖЕНИЯ, ВЗАИМНОСТИ И ЭКВИВАЛЕНТНОГО ГЕНЕРАТОРА”

**Цель работы:** Исследовать принципы наложения и взаимности, а также метод эквивалентного генератора, используемые при расчетах линейных электрических цепей.

#### Программа работы

1. Исследование принципа наложения.
2. Определение тока в ветви методом эквивалентного генератора.
3. Проверка принципа взаимности.

#### Элементы теории

Принцип и метод наложения состоит в том, что ток в любой ветви сложной электрической цепи равен алгебраической сумме (т.е. с учетом направлений) частичных токов в этой ветви от действия каждой ЭДС в отдельности. Иначе говоря, в цепи, содержащей несколько источников ЭДС сначала рассчитывают или измеряют токи во всех ветвях сложной электрической цепи, считая включенной только ЭДС  $E_1$  (остальные ЭДС при этом закорачивают, оставляя в цепи их внутренние сопротивления), затем оставляют в цепи ЭДС  $E_2$  и т.д.

Принцип взаимности гласит: **если ЭДС  $E_1$  включена в ветвь с сопротивлением  $R_1$  и создает в ветви с сопротивлением  $R_2$  ток  $I_2$ , например  $IA$ , то эта же ЭДС  $E_1$ , перенесенная в ветвь с сопротивлением  $R_2$ , создает в ветви с сопротивлением  $R_1$  такой же ток  $IA$ .**

Эти методы используются тогда, когда изъятие ЭДС из схемы или перенос ЭДС из одной ветви в другую упрощает расчет электрической цепи.

Метод эквивалентного генератора используется, когда требуется определить ток только в одной ветви сложной электрической цепи. Эта ветвь выделяется, а остальная часть сложной цепи заменяется эквивалентным активным двухполюсником с ЭДС  $E_{г}$ , равной напряжению холостого хода двухполюсника

$U_{xx}$  и внутренним сопротивлением  $R_э$ , равным входному сопротивлению двухполюсника относительно зажимов выделенной ветви. Тогда ток ветви в соответствии с эквивалентной схемой (рисунок 2.1) равен:

$$I = \frac{E_г}{R_э + R} = \frac{U_{xx}}{R_в + R} \quad (2.1)$$

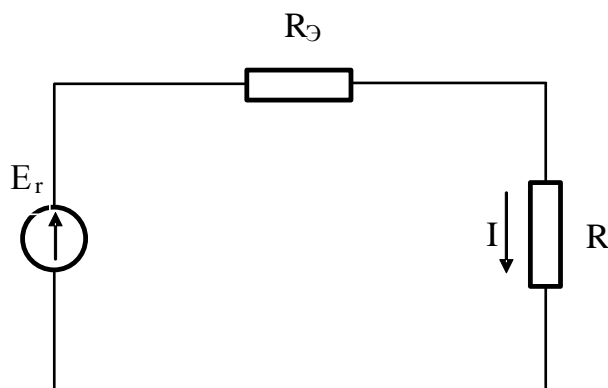


Рисунок 2.1 – Эквивалентная схема активного двухполюсника

ЭДС  $E_г$  определяется как напряжение холостого хода  $U_{xx}$  на зажимах двухполюсника (ветвь с сопротивлением  $R$  размыкается).

### Методические указания по выполнению работы

Измерить омметром сопротивления резисторов  $R_1 - R_6$ .

Измерить вольтметром обе ЭДС в режиме холостого хода. Каждая ЭДС в схеме имеет переключатель, в правом положении которого ЭДС включена в цепь, в левом закорочена, т.е. выключена из цепи.

Собрать электрическую схему согласно рисунку 2.2 и предъявить преподавателю для проверки.

1. Исследование метода наложения.

1.1. Измерить токи во всех ветвях от действия только ЭДС  $E_1$  ( $E_1$ –включена,  $E_2$ –закорочена). Измерение токов осуществляется при помощи галетных переключателей и амперметров, смонтированных на передней панели стенда.

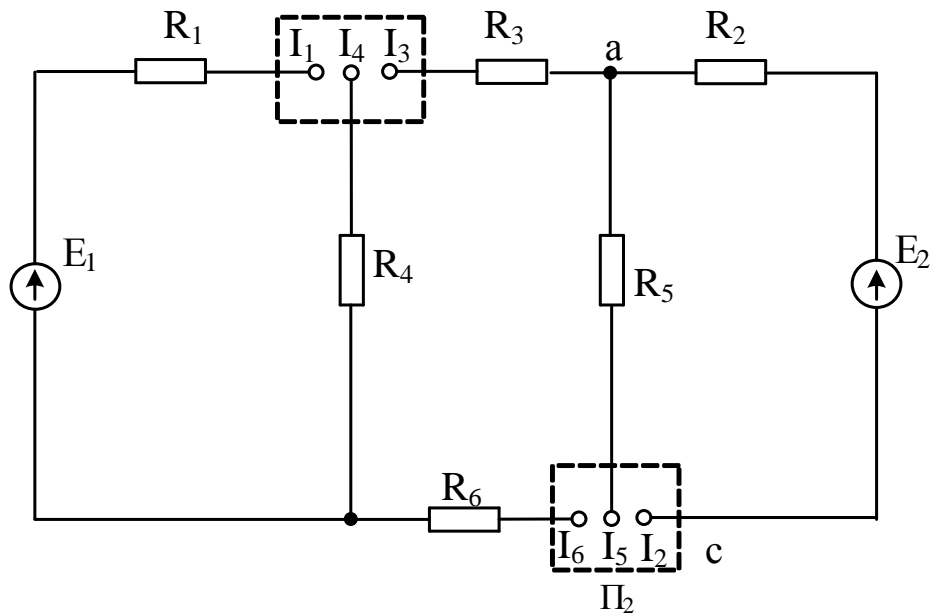


Рисунок 2.2 – Схема лабораторной установки

1.2. Измерить токи во всех ветвях от действия только ЭДС  $E_2$

1.3. Измерить токи ветвей от действия обеих ЭДС.

Данные измерений свести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 – Экспериментальное исследование принципа наложения

$I, A$		$I_1$	$I_2$	$I_3$	$I_4$	$I_5$	$I_6$
Только $E_1$							
Только $E_2$							
$E_1+E_2$	Опыт						
	Расчет						
Абсолютная погрешность							

1.4. Начертить схему исследуемой цепи, обозначить на ней направления токов во всех ветвях, создаваемых отдельно источником ЭДС  $E_1$  и отдельно источником ЭДС  $E_2$ .

Рассчитать токи всех ветвей при одновременном действии ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , используя принцип наложения с учетом направлений токов в ветвях. Сравнить данные расчетов и опытов.

2. Определение тока ветви «ас» методом эквивалентного генератора.

2.1. Включить источники ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ .

2.2. Провести опыт холостого хода ветви «ас», для чего ветвь с резистором  $R_5$  разомкнуть в любой точке и измерить вольтметром со щупами напряжение холостого хода между точками «а» и «с».

2.3. Провести опыт короткого замыкания ветви «ас», для чего резистор  $R_5$  замкнуть при помощи проводника и измерить ток короткого замыкания ветви «ас».

2.4. Измерить при помощи омметра входное сопротивление схемы  $R_{вх}$  относительно зажимов «ас», для чего стенд отключить от сети, замкнуть ЭДС  $E_1, E_2$  и разомкнуть ветвь с резистором  $R_5$ .

2.5. Вычислить входное сопротивление, используя формулу:

$$R_{\hat{a}\hat{o}} = \frac{U_{\hat{a}\hat{n}\hat{o}\hat{o}}}{I_{\hat{e}\zeta}} \quad (2.2)$$

2.6. Нарисовать схему для определения входного сопротивления исследуемой цепи (ЭДС  $E_1$  и  $E_2$  замкнуты, ветвь с резистором  $R_5$  – разомкнута) и, используя правила преобразования пассивных электрических цепей, преобразовать схему с резисторами  $R_1 - R_6$  к эквивалентному сопротивлению  $R_{вх}$ ). Сравнить данные пунктов 2.4, 2.5 и 2.6 по определению входного сопротивления различными способами

2.7. Рассчитать ток  $I_5$ , используя формулу:

$$I_5 = \frac{U_{acxx}}{R_5 + R_{\hat{a}\hat{o}}} \quad (2.3)$$

и сравнить с измеренным значением этого тока в п.1.1

3. Проверка принципа взаимности.

3.1. Замкнуть ЭДС  $E_2$  и измерить ток в ветви с резистором  $R_2$  от действия только ЭДС  $E_1$ .

3.2. Поменять местами ЭДС  $E_1$  и  $E_2$ , т.е. перенести ветвь с резистором  $R_2$  и измерить при этом ток ветви с резистором  $R_1$ .

3.3. По результатам измерений п.п.3.1 и 3.2 убедиться в справедливости принципа взаимности.

## Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

## Контрольные вопросы

1. Сформулируйте принцип наложения.
2. Поясните методику расчета линейных электрических цепей методом наложения.
3. Сформулируйте теорему об активном двухполюснике и эквивалентном генераторе.
4. Поясните методику расчета тока ветви методом эквивалентного генератора.
5. Сформулируйте принцип взаимности.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3

### ”ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА”

**Цель работы:** Изучить основные закономерности электромагнитных явлений в электрической цепи с последовательным соединением резистора, конденсатора и катушки индуктивности. Овладеть методикой построения векторных диаграмм. Изучить условия возникновения и сущность резонанса напряжений.

#### Программа работы

1. Изучение режима работы цепи синусоидального тока при последовательном соединении резистора и катушки индуктивности.
2. Изучение режима работы цепи синусоидального тока при последовательном соединении резистора и конденсатора.
3. Изучение режима работы цепи синусоидального тока при последовательном соединении резистора, катушки индуктивности и конденсатора.

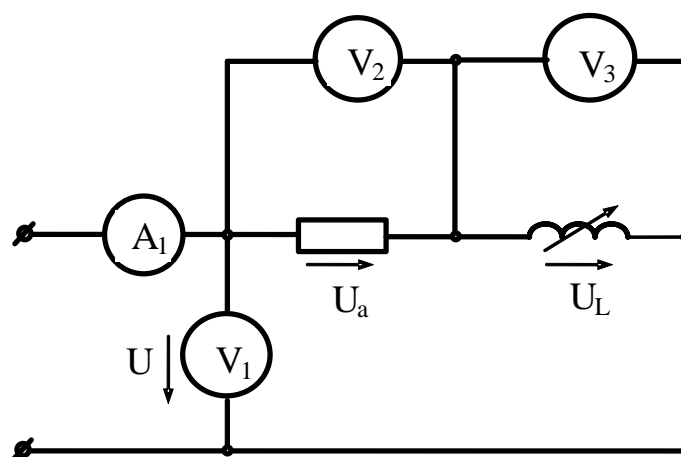
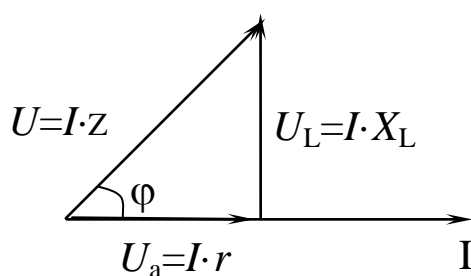
#### Элементы теории

Электрическая цепь с последовательным соединением резистора и катушки индуктивности представлена на рисунок 3.1.

При прохождении по такой цепи синусоидального тока  $i = I_m \sin \omega t$  мгновенное значение напряжения, приложенного к цепи, является суммой двух составляющих:

$$u = i \cdot r + L \frac{di}{dt} = r I_m \sin \omega t + \omega L I_m \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (3.1)$$

Активная составляющая  $u_a = ir$  совпадает по фазе с током  $i$ , а реактивная опережает по фазе ток на угол  $\pi/2$ . На векторной диаграмме действующие значения этих величин должны быть представлены двумя ортогональными векторами  $\bar{U}_a = I \cdot r$  и  $\bar{U}_L = I \cdot x_L$  (рисунок 3.2).

Рисунок 3.1 – Неразветвленная цепь  $RL$ Рисунок 3.2 – Векторная диаграмма цепи  $R,L$ 

Вектор  $U$  определяется в результате геометрического сложения этих векторов:

$$\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L \quad (3.2)$$

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_L^2} = I \sqrt{r^2 + x_L^2} \quad (3.3)$$

откуда

$$I = \frac{U}{\sqrt{r^2 + x_L^2}} = \frac{U}{z}, \quad (3.4)$$

где  $z = \sqrt{r^2 + x_L^2}$  — полное сопротивление цепи.

Вектор тока отстает от вектора напряжения на угол  $\varphi$ , величина которого определяется из треугольника напряжений

$$\cos \varphi = \frac{U_a}{U} = \frac{r}{z} \quad (3.5)$$

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z} \quad (3.6)$$

На рисунке 3.3 приведена электрическая цепь, состоящая из последовательного соединения резистора и конденсатора.

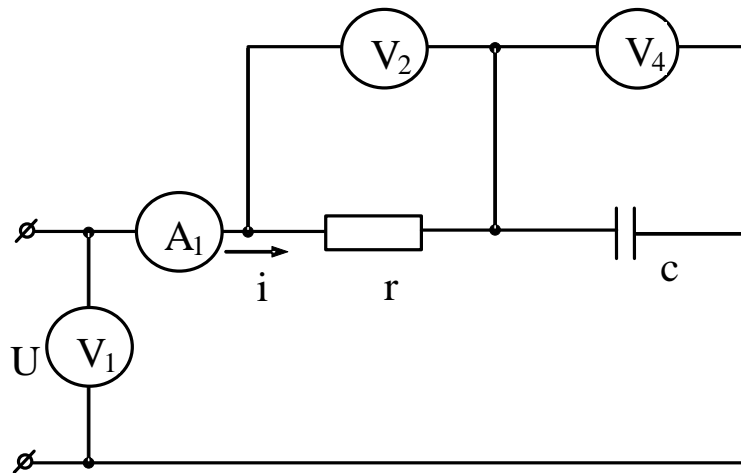


Рисунок 3.3 – Неразветвленная цепь R,C

Здесь напряжение также является векторной суммой двух напряжений:

$$U = \text{Im} \cdot r \cdot \sin \omega t + \text{Im} \cdot x_c \cdot \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (3.7)$$

На векторной диаграмме эти напряжения также изобразятся двумя ортогональными векторами, причем вектор напряжения на конденсаторе отстает от вектора тока по фазе на угол  $\pi/2$  (рисунок 3.4).

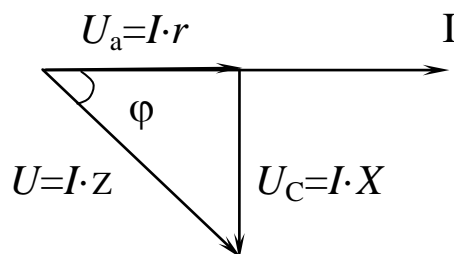


Рисунок 3.4 – Векторная диаграмма цепи RC

Действующее значение общего напряжения:

$$U = \sqrt{U_a^2 + U_c^2} = I \cdot \sqrt{r^2 + x_c^2} = I \cdot z, \quad (3.8)$$

где  $z = \sqrt{r^2 + x_c^2}$

Вектор тока  $I$  опережает вектор напряжения  $U$  на угол

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z} \quad (3.9)$$

Цепь с последовательным соединением резистора, катушки индуктивности и конденсатора представлена на рисунке 3.5.

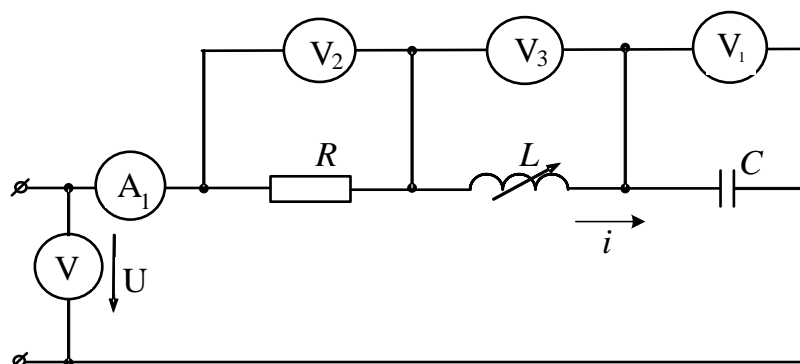


Рисунок 3.3 – Неразветвленная цепь R,L,C

Общее напряжение, приложенное к цепи, является в этом случае векторной суммой трех напряжений  $\bar{U} = \bar{U}_a + \bar{U}_L + \bar{U}_C$ , причем вектор напряжения  $U_L$  опережает, а вектор напряжения  $U_C$  – отстает от вектора тока на угол  $\pi/2$  (рисунок 3.6).

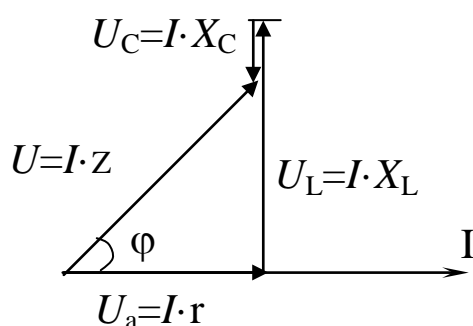


Рисунок 3.6 – Векторная диаграмма цепи R, L, C

Действующее значение общего напряжения:

$$U = I \cdot \sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}, \quad (3.10)$$

а угол  $\varphi$  между вектором напряжения  $U$  и тока  $I$  цепи:

$$\varphi = \arccos \frac{r}{z} = \arccos \frac{r}{\sqrt{r^2 + (x_L - x_C)^2}} \quad (3.11)$$

Если в цепи (рисунок 3.5) выполняется условие  $x_L = x_C$ , то  $z = r$  и ток в цепи максимален и совпадает по фазе с приложенным напряжением. При этом,

если  $x_L = x_c \gg r$ , напряжения на конденсаторе и катушке могут достигать больших значений, в несколько раз превышающих напряжение, приложенное к цепи. Такой режим работы цепи называют резонансом напряжений.

### Порядок выполнения работы

1. Изучение режима работы цепи синусоидального тока при последовательном соединении резистора и катушки.

1.1. Собрать электрическую схему согласно рисунку 3.1 и предъявить преподавателю для проверки.

1.2. Включить стенд переключателем (при этом на стенде загорается сигнальная лампа). Поворачивая штурвал индуктивности из одного положения в другое, записать показания приборов (снимается 5–6 точек). Данные измерений занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Экспериментальные исследования цепи R, L

Измерено				Подсчитано				
Ток цепи, А	Напряжения, В			Сопротивления, Ом			Индуктивность, Гн	Cosφ
	Всей цепи	На резисторе	На катушке	Катушки		резистора		
				полное	индукт.			
$I$	$U$	$U_r$	$U_k$	$Z_k$	$X_L$	$R$	$L$	

Используя полученные данные, рассчитать сопротивление резистора, полное сопротивление катушки, индуктивность и Cosφ.

По полученным данным построить векторные диаграммы напряжений для двух крайних и одного среднего значения индуктивного сопротивления  $X_L$ .

2. Изучение режима работы цепи синусоидального тока при последовательном соединении резистора и конденсатора.

2.1. Собрать электрическую схему согласно рисунку 3.3 и предъявить преподавателю для проверки.

2.2. Включить стенд и изменяя переключателем емкость конденсаторной батареи, измерить ток в цепи и напряжения на элементах. Полученные результаты занести в таблицу 3.2. (При переключении конденсаторов стенд отключать). Измерения провести для трех значений емкости.

Таблица 3.2 – Экспериментальные исследования цепи R, C

Измерено				Подсчитано			
Ток цепи, А	Напряжения, В			Сопротивления, Ом		Емкость конденсатора, Ф	Cosφ
	Всей цепи	На резисторе	На конденсаторе	Резистора	Конденсатора		
$I$	$U$	$U_r$	$U_k$	$Z_k$	$X_c$	$C$	

Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений для двух значений емкости.

3. Изучение режима работы цепи синусоидального тока при последовательном соединении резистора, катушки индуктивности и конденсатора.

3.1. Собрать электрическую схему согласно рисунок 3.5 и предъявить преподавателю для проверки.

3.2. Установить переключателем емкость конденсаторной батареи  $C=50-60$  мкФ. Включить стенд и, изменяя штурвалом индуктивность катушки, записать показания приборов. При этом нужно провести по 3–4 опыта до и после резонанса. Данные измерений занести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Экспериментальные исследования цепи R, L, C

Измерено					Подсчитано					
Ток цепи, А	Напряжение, В				Сопротивление, Ом			Мощность		Cosφ
	всей цепи	на резисторе	на катушке	на конденса- торе	резистора	катушки	конденсатора	полная, ВА	реактивная, ВАр	
$I$	$U$	$U_r$	$U_L$	$U_c$	$R$	$X_L$	$X_c$	$S$	$Q$	

По данным измерений построить в масштабе векторные диаграммы напряжений для трех режимов работы: дорезонансного, резонансного и послерезонансного.

3.3. Используя данные таблицы 3 построить зависимости:  $I=f(X_L)$ ;  $U_c=f(X_L)$ ;  $U_L=f(X_L)$ ;  $S=f(X_L)$ ;  $Cosφ=f(X_L)$ ;  $Q=f(X_L)$ .

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Каковы фазовые соотношения между током и напряжением в цепи с последовательным соединением R и L?
2. Чему равно полное сопротивление цепи с последовательным соединением R и L?

3. Чему равен фазовый сдвиг между напряжением и током в цепи с последовательным соединением  $R$  и  $C$ ?
4. Чему равно полное сопротивление неразветвленной цепи  $RC$ ?
5. Какой режим работы электрической цепи называется резонансным?
6. Каковы особенности работы электрической цепи при резонансе напряжений?
7. Чему равно полное сопротивление неразветвленной цепи  $R,L,C$  в обычном режиме и при резонансе напряжений?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4

### “ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА”

**Цель работы:** Изучить основные закономерности электромагнитных явлений в электрической цепи с параллельным соединением резистора, катушки индуктивности и конденсатора. Научиться определять опытным путем параметры цепи. Овладеть методикой построения векторных диаграмм. Выяснить условия возникновения и сущность резонанса токов.

#### Содержание работы

1. Изучение режима работы цепи при параллельном соединении резистора и катушки индуктивности.
2. Изучение режима работы цепи при параллельном соединении резистора и конденсатора.
3. Изучение режима работы цепи при параллельном соединении резистора, катушки индуктивности и конденсатора.

#### Элементы теории

Цепь с параллельным соединением резистора и катушки индуктивности приведена на рисунке 4.1.

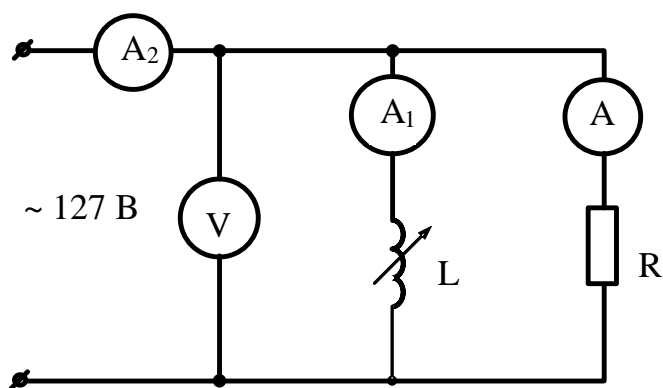


Рисунок 4.1 – Цепь с параллельным соединением  $R, L$

По первому закону Кирхгофа мгновенное значение тока всей цепи:

$$i = i_r + i_L = \frac{u}{r} + \frac{1}{L} \int u dt \quad (4.1)$$

Если напряжение, приложенное к цепи, изменяется по синусоидальному закону, т. е.  $u = U_m \sin \omega t$ , ток всей цепи представляется суммой:

$$I = \frac{U_m}{r} \sin \omega t + \frac{U_m}{\omega L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = \frac{U_m}{r} \sin \omega t + \frac{U_m}{x_L} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

Следовательно, ток всей цепи будет также синусоидальным. Вектор этого тока может быть найден как геометрическая сумма векторов слагаемых синусоид. При этом активный ток (через резистор) совпадает по фазе с приложенным напряжением, а ток через индуктивность отстает на  $\pi/2$ . На векторной диаграмме эти токи изобразятся двумя ортогональными векторами (рисунок 4.2).

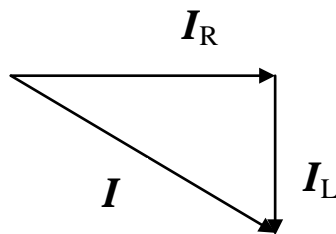


Рисунок 4.2 – Векторная диаграмма токов цепи RL

Если обозначить  $1/r=q$ ;  $1/\omega L = b_L$  – проводимости ветвей, то действующее значение тока всей цепи

$$I = \sqrt{I_r^2 + I_L^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{r}\right)^2 + \left(\frac{U}{\omega L}\right)^2} = U \sqrt{q^2 + b_L^2} \quad (4.2)$$

Сдвиг фаз между напряжением и током цепи

$$\varphi = \arctg \frac{b_L}{q}. \quad (4.3)$$

На рисунке 4.3 представлена цепь с параллельным соединением резистора и конденсатора.

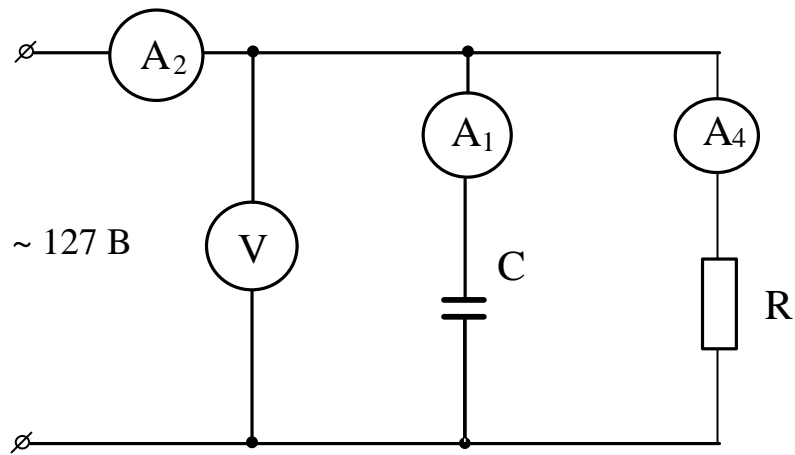


Рисунок 4.3 – Цепь с параллельным соединением резистора и конденсатора

Для этой цепи

$$i = i_r + i_c = \frac{Um}{r} \sin \omega t + Um \cdot \omega C \sin(\omega t + \frac{\pi}{2}) = \frac{Um}{r} \sin \omega t + \frac{Um}{x_c} \sin(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

Таким образом, при синусоидальном напряжении ток всей цепи будет также синусоидальным, а вектор этого тока может быть найден геометрическим сложением вектора активного тока, совпадающего с напряжением, и вектора емкостного тока, опережающего напряжение на  $\pi/2$  (рис.4.4).

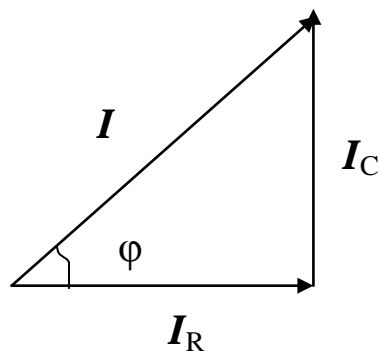


Рисунок 4.4 – Векторная диаграмма цепи RC

Действующее значение тока всей цепи равно:

$$I = \sqrt{I_r^2 + I_{\bar{n}}^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{r}\right)^2 + \left(\frac{U}{x_c}\right)^2} = U \sqrt{q^2 + b_c^2}. \quad (4.4)$$

Сдвиг фаз между напряжением цепи

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b_L}{q} \quad (4.5)$$

Цепь с параллельным соединением R L C изображена на рисунке 4.5.

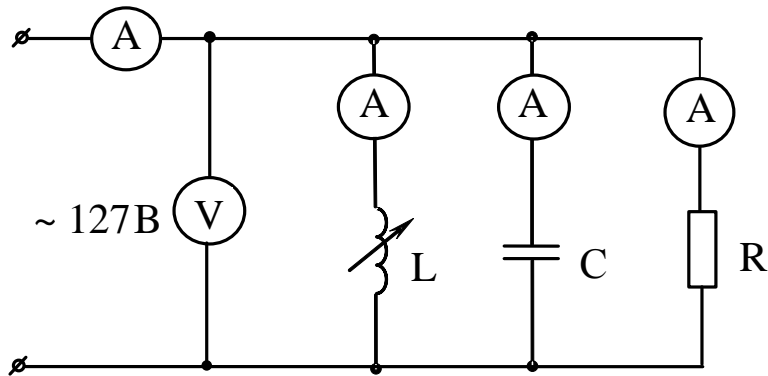


Рисунок 4.5 – Цепь с параллельным соединением  $R, L, C$

Для этой цепи мгновенное значение тока всей цепи:

$$i = i_r + i_L + i_c = \frac{u}{r} + \frac{1}{L} \int u dt + C \frac{du}{dt}$$

или

$$i = \frac{Um}{r} \operatorname{Sin} \omega t + \frac{Um}{\omega L} \operatorname{Sin}(\omega t - \frac{\pi}{2}) + Um \omega C \operatorname{Sin}(\omega t + \frac{\pi}{2})$$

На векторной диаграмме этот ток изобразится суммой трех векторов (рисунок 4.6).

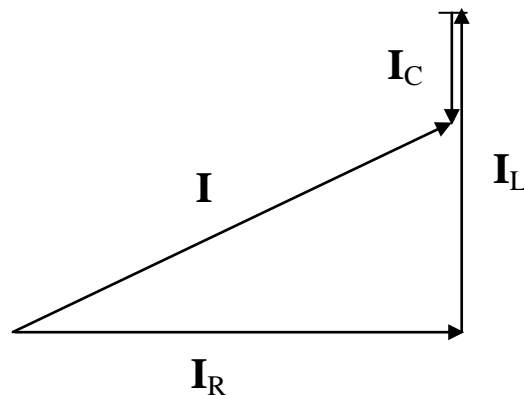


Рисунок 4.6 – Векторная диаграмма токов цепи  $RLC$

Действующее значение тока цепи равно:

$$I = \sqrt{I_r^2 + (I_L - I_c)^2} = \sqrt{\left(\frac{U}{r}\right)^2 + \left(\frac{U}{\omega L} - \omega C U\right)^2} = U \sqrt{q^2 + (b_L - b_c)^2} = UY, \quad (4.6)$$

где  $Y$  - полная проводимость цепи.

Сдвиг фаз между током и напряжением

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{b_L - b_c}{q} \quad (4.7)$$

Активная, реактивная и полная мощности могут быть найдены из выражений:

$$P = I_r \cdot U = U \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (Bm) \quad (4.8)$$

$$Q = I_p \cdot U = U \cdot I \cdot \sin \varphi \quad (BAp) \quad (4.9)$$

$$S = U \cdot I \quad (BA) \quad (4.10)$$

При равенстве реактивных проводимостей в цепи с параллельным соединением  $R L C$  наблюдается резонанс токов.

При  $b_L = b_c$  ток в цепи  $I = U \cdot q$  минимален.

При резонансе токов реактивный ток замыкается в контуре  $LC$ , а провода, соединяющие контур с источником энергии, и сам источник полностью разгружаются от реактивного тока.

### Порядок выполнения работы

1. Изучение режима работы цепи при параллельном соединении резистора и катушки индуктивности.

1.1. Собрать электрическую схему согласно рисунку 4.1 и предъявить ее преподавателю для проверки.

1.2. После проверки схемы преподавателем включить стенд (при этом загорается сигнальная лампа). Поворачивая штурвал индуктивной катушки из одного крайнего положения в другое, записать 6 - 7 показаний приборов и занести их в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Экспериментальные исследования цепи  $R, L$ 

Измерено				Вычислено				
Напряжение цепи, U, В	Токи, А			Сопротивления, Ом				Cosφ
	всей цепи I	резистора, I <sub>r</sub>	катушки, I <sub>r</sub>	Резистора, R	Всей це- пи, Z	катушки		
						Полное Z <sub>к</sub>	Индуктивное X <sub>L</sub>	

По полученным данным построить векторные диаграммы токов для двух крайних и одного среднего значения индуктивного сопротивления катушки.

2. Изучение режима работы цепи при параллельном соединении резистора и конденсатора.

2.1. Собрать электрическую цепь согласно рисунку 4.3.

Порядок выполнения работы такой же, как и в пункте 1.2., но вместо катушки включается батарея конденсаторов, емкость которой изменяется переключателем. Данные измерений для двух крайних и одного среднего значения емкости батареи записать в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Экспериментальные исследования цепи  $R, C$ 

Измерено				Вычислено		
напряжение цепи, U, В	Токи, А			Емкостное сопротив- ление, X <sub>c</sub> , Ом	Емкость конденса- тора, С, Ф	Cosφ
	всей цепи, I	резистора, I <sub>r</sub>	конденса- тора, I <sub>c</sub>			

По данным проделанных опытов построить в масштабе векторные диаграммы токов.

3. Изучение режима работы цепи при параллельном соединении резистора, катушки индуктивности и конденсатора.

3.1. Собрать схему согласно рисунок 4.5, установить переключателем конденсаторной батареи емкость  $C=50-60$  мкФ.

3.2. Включить стенд и, изменяя штурвалом индуктивность катушки, проследить за показаниями приборов, записывая их в таблицу 4.3. При этом должно быть по 3–4 опыта до резонанса и после резонанса токов.

Таблица 4.3 – Экспериментальные исследования цепи R, L, C

Измерено				Вычислено				
Напряжение цепи, В, $U$	Токи, А				Сопротивления, Ом			Cosφ
	$I$	$I_r$	$I_L$	$I_c$	$Z_k$	$X_L$	$X_c$	

Для последней схемы построить векторные диаграммы для 3-х режимов: дорезонансного, резонансного и послерезонансного.

3.3. Вычислить значения  $X_L$  и  $X_c$  при резонансе.

3.4. Построить зависимости:  $I=f(X_L)$ ;  $Cosφ=f(X_L)$ .

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Каковы фазовые соотношения между током и напряжением цепи с параллельным соединением резистора и катушки индуктивности?
2. Чему равна полная проводимость цепи с параллельным соединением резистора и катушки индуктивности?

3. Каковы фазовые соотношения между током и напряжением цепи с параллельным соединением резистора и конденсатора?
4. Чему равна полная проводимость цепи с параллельным соединением резистора и конденсатора?
5. Какой режим электрической цепи называется резонансным?
6. Каковы особенности работы электрической цепи при резонансе токов?
7. Чему равна полная проводимость цепи с параллельным соединением R,L и C в режиме резонанса токов?
8. Сформулируйте связь между параметрами электрической цепи и частотой собственных колебаний контура при резонансе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5

### “ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ”

**Цель работы:** Изучить основные закономерности электромагнитных явлений в электрической цепи с взаимной индуктивностью. Овладеть методикой составления уравнений по законам Кирхгофа и опытного определения взаимной индуктивности.

#### Содержание работы

1. Изучение режимов цепи при последовательном соединении двух индуктивно связанных катушек.
2. Изучение режимов цепи при параллельном соединении двух индуктивно связанных катушек.
3. Исследование работы воздушного трансформатора.

#### Элементы теории

В состав электрических цепей могут входить катушки, магнитносвязанные с другими катушками. Поток одной из них пронизывает другие и наводит в них ЭДС взаимной индукции, которые должны быть учтены в расчете. При составлении уравнений по законам Кирхгофа для магнитносвязанных цепей необходимо знать, согласно или встречно направлены потоки самоиндукции и взаимной индукции. Правильное заключение об этом можно сделать, если известно направление намотки катушек на сердечник и выбрано положительное направление токов в них.

Чтобы не загромождать чертеж, сердечники катушек на электрических схемах обычно не изображают, ограничиваясь тем, что одноименные зажимы помечают одинаковыми значками.

**Если на электрической схеме токи двух магнитносвязанных катушек одинаково ориентированы относительно одноименных зажимов катушек, то имеет место согласное включение, в противном случае – встречное.**

### Последовательное соединение магнитно связанных катушек.

На рисунке 5.1 изображена схема последовательного согласного включения магнитно связанных катушек, а на рисунке 5.2—последовательного встречного включения тех же катушек.

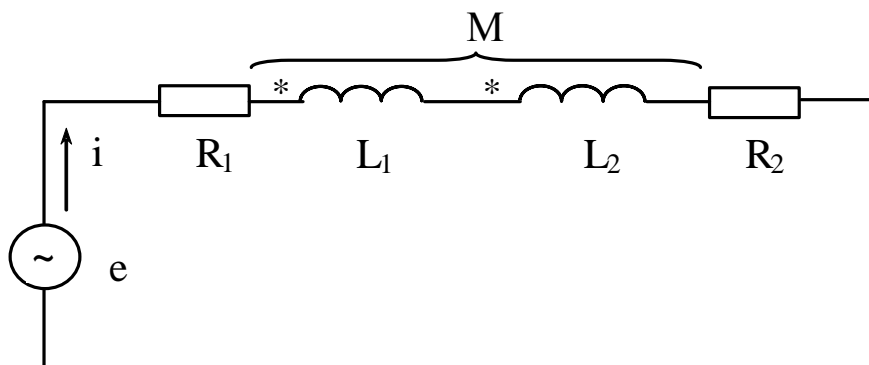


Рисунок 5.1 – Последовательное согласное включение магнитно связанных катушек

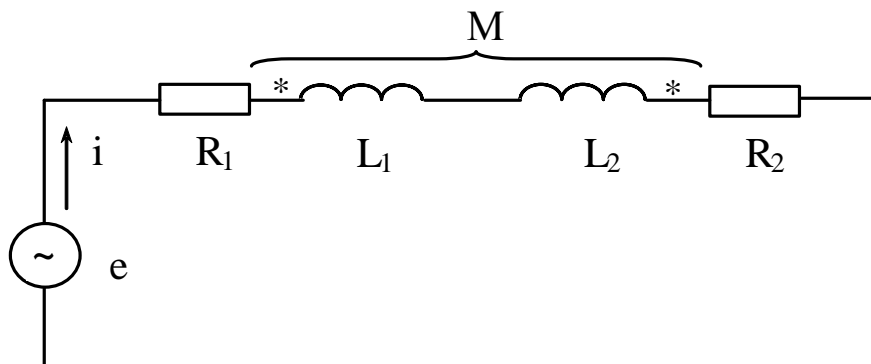


Рисунок 5.2 – Последовательное встречное включение магнитно связанных катушек

При согласном включении

$$i \cdot R_1 + L_1 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} + M \frac{di}{dt} + i \cdot R_2 = e . \quad (5.1)$$

При встречном включении

$$i \cdot R_1 + L_1 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} + L_2 \frac{di}{dt} - M \frac{di}{dt} + i \cdot R_2 = e . \quad (5.2)$$

## Определение взаимной индуктивности опытным путем

### Первый способ

Проделаем два опыта. В первом, включим катушки последовательно и согласно. Измерим ток и напряжение на входе, и активное сопротивление каждой катушки. Во втором, те же катушки включим последовательно и встречно и также измерим  $I$ ,  $U$ ,  $R$ . По результатам измерений найдем:

$$X_{\text{согл.}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M) \quad (5.3)$$

$$X_{\text{встр.}} = \omega(L_1 + L_2 - 2M) \quad (5.4)$$

Разность  $X_{\text{согл.}} - X_{\text{встр.}} = 4\omega M$ , откуда

$$M = \frac{X_{\text{согл.}} - X_{\text{встр.}}}{4\omega} \quad (5.5)$$

### Второй способ

Подключим первую катушку к источнику синусоидальной ЭДС (рисунок 5.3), а к зажимам второй катушки подключим вольтметр с большим внутренним сопротивлением. Измерим ток  $I_1$  и напряжение  $U_2$ .

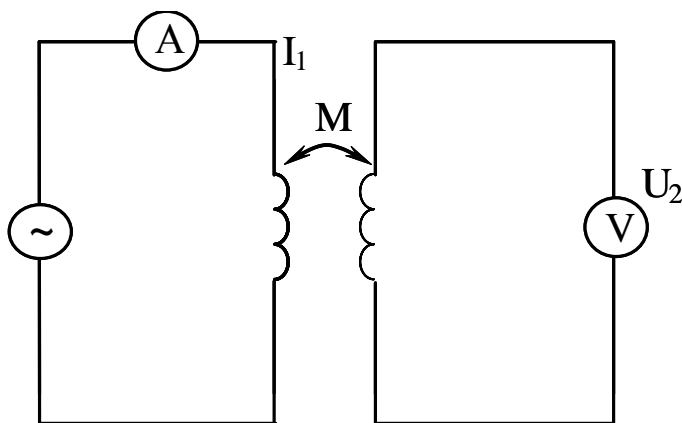


Рисунок 5.3 – Схема включения катушек для определения  $M$

Мгновенное значение напряжения

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} \quad (5.6)$$

Его действующее значение

$$U_2 = \omega \cdot M \cdot I_1, \quad (5.7)$$

Следовательно

$$M = \frac{U_2}{\omega \cdot I_1} \quad (5.8)$$

### Порядок выполнения работы

1. Изучение режимов цепи при последовательном соединении двух индуктивно связанных катушек.

1.1. Измерить омметром активные сопротивления катушек  $R_1$  и  $R_2$ .

1.2. Собрать схему (рисунок 5.4) для определения параметров  $X_{L1}$  и  $X_{L2}$  катушек.

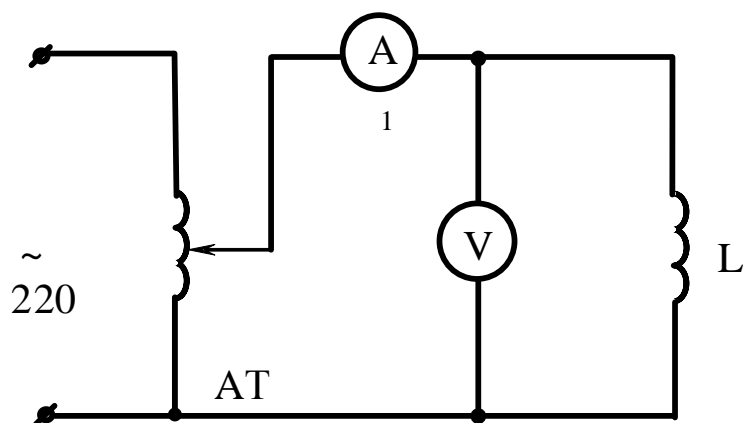


Рисунок 5.4 – Схема для определения индуктивного сопротивления катушки

1.3. После проверки схемы преподавателем включить стенд, и установить, при помощи автотрансформатора напряжение на входе цепи 80–100 В. Измеряя напряжение и ток поочередно в каждой катушке, вычислить сначала полные  $Z_{k1}$  и  $Z_{k2}$ , а затем индуктивные  $X_{L1}$  и  $X_{L2}$  сопротивления катушек.

1.4. Собрать схему с последовательным соединением катушек (рисунок 5.5).

После проверки схемы преподавателем включить стенд и, установив на входе схемы напряжение 80–100В, измерить ток и напряжение. Затем переключить зажимы одной из катушек и снова измерить ток и напряжение. Вычислить полные сопротивления цепи в обоих случаях;

установить, какой из опытов соответствует согласному и какой встречно-

му включению катушек.

1.5. По данным проделанных выше опытов вычислить взаимную индуктивность катушек.

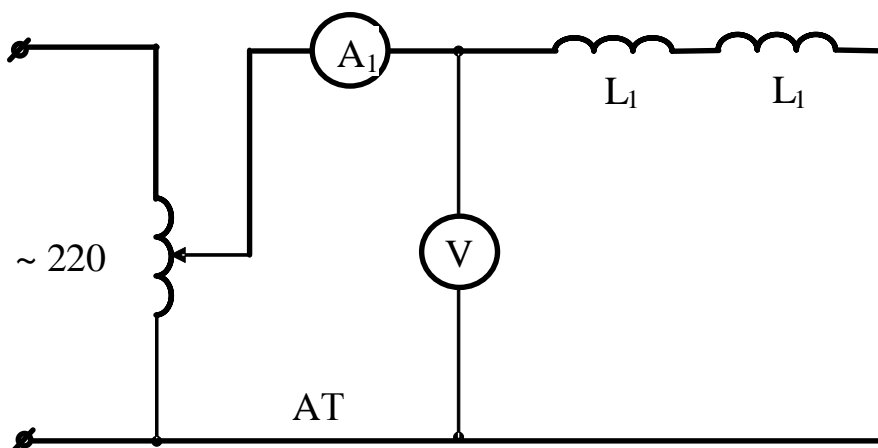


Рисунок 5.5 – Схема последовательного соединения катушек

2. Изучение режимов цепи при параллельном соединении двух магнитно-связанных катушек.

2.1. Собрать электрическую схему (рисунок 5.6) и предъявить преподавателю для проверки

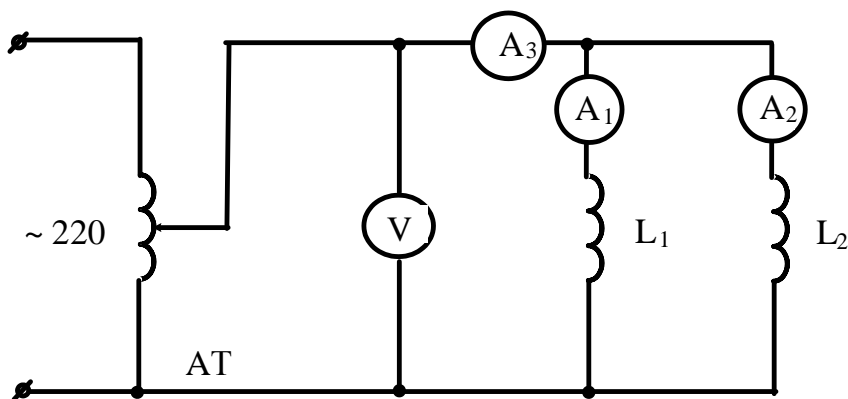


Рисунок 5.6 – Схема параллельного соединения катушек

2.2. После проверки схемы преподавателем включить стенд и, установив при помощи автотрансформатора напряжение 80–100 В, произвести измерение напряжения и токов  $I$ ;  $I_1$ ;  $I_2$ .

2.3. Записать уравнение по второму закону Кирхгофа в комплексной форме. По известным значениям  $R_1$ ;  $R_2$ ;  $X_{L1}$ ;  $X_{L2}$ ;  $X_M = \omega M$ ; действующим значениям токов  $I$ ;  $I_1$ ;  $I_2$  и напряжения на входе построить в масштабе векторную диаграмму токов и напряжений.

### 3. Исследование работы трансформатора без стального сердечника

3.1. Собрать электрическую схему (рисунок 5.7) и предъявить преподавателю для проверки

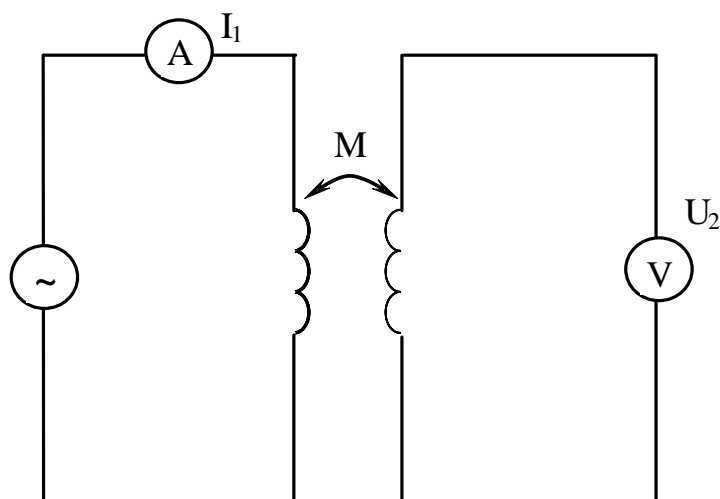


Рисунок 5.7 – Схема воздушного трансформатора

3.2. Включить стенд и установить на входе напряжение 80–100 В. Измерить токи и напряжения в первичной и вторичной цепях при холостом ходе и 3-х–4-х нагрузочных режимах воздушного трансформатора (нагрузка изменяется резистором  $R_H$ ).

3.3. По данным холостого хода вычислить значение взаимной индуктивности и сравнить полученное значение со значением  $M$ , найденным в п. 1.5.

#### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

#### Контрольные вопросы

1. Какая связь называется индуктивной?

2. В каком случае имеет место согласное, а в каком – встречное включение магнитносвязанных катушек?
3. Как учитывается наличие индуктивной связи при составлении уравнений по законам Кирхгофа?
4. Какие способы опытного определения взаимной индуктивности вы знаете? Поясните эти способы.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6

### "ИССЛЕДОВАНИЯ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА"

**Цель работы:** Изучить основные характеристики четырехполюсника. Овладеть методикой экспериментального определения постоянных четырехполюсника и расчета параметров схем замещения.

#### Содержание работы

1. Экспериментальное определение постоянных четырехполюсника.
2. Замена пассивного четырехполюсника T- и П-образными схемами замещения.

#### Элементы теории

Четырехполюсником называют электрическую цепь, имеющую два входных и два выходных зажима (трансформатор, ЛЭП, усилитель и т.п.).

Четырехполюсник принято изображать в виде прямоугольника с выходящими из него концами (полюсами), (рисунок 6.1).



Рисунок 6.1 – Графическое изображение четырехполюсника

Если внутри четырехполюсника отсутствуют источники электрической энергии, он считается пассивным. Если же внутри четырехполюсника имеются источники электрической энергии, он считается активным, и внутри прямоугольника ставят букву А.

Четырехполюсник является передаточным звеном между источником и нагрузкой и реализует вполне определенную передаточную функцию.

Для любого пассивного четырехполюсника напряжение и ток на входе  $U_1$  и  $I_1$  связаны с напряжением и током на выходе  $U_2$  и  $I_2$  двумя основными уравнениями:

$$U_1 = AU_2 + BI_2 \quad (6.1)$$

$$I_1 = CU_2 + DI_2, \quad (6.2)$$

где  $A, B, C, D$  - комплексные коэффициенты, называемые постоянными четырехполюсника. Они связаны соотношением

$$AD - BC = 1 \quad (6.3)$$

При помощи этих уравнений можно определять нагрузочный режим, т.е. найти  $I_1$  и  $U_1$  для заданных  $I_2$  и  $U_2$ . Любой пассивный четырехполюсник выполняет функцию передаточного звена между источником и нагрузкой. Эту же функцию могут выполнять простейшие электрические схемы – схемы замещения Т и П - образные (рисунок 6.2)

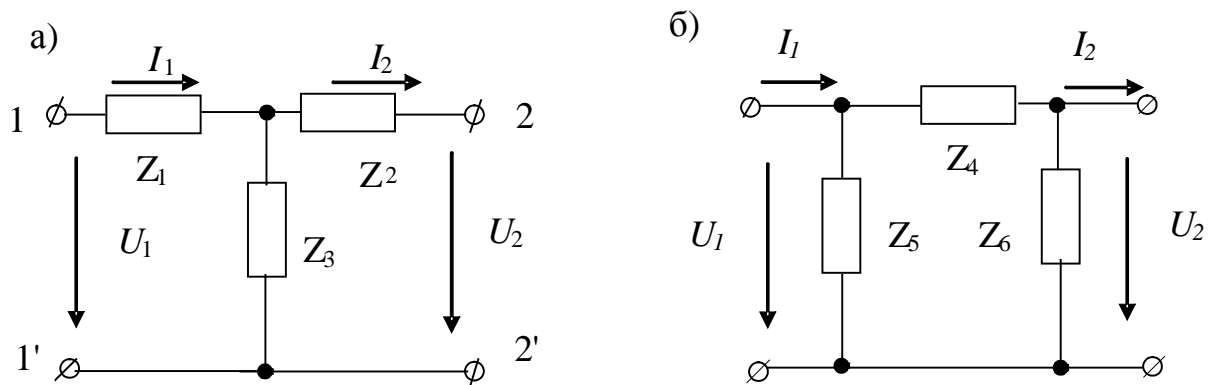


Рисунок 6.2 – Т- и П- образная схемы замещения четырехполюсника

Сопротивления схем замещения связаны с постоянными четырехполюсника следующими соотношениями:

Для Т-образной схемы

$$Z_1 = \frac{A-1}{C}; Z_2 = \frac{D-1}{C}; Z_3 = \frac{1}{C} \quad (6.4)$$

Для П-образной схемы

$$Z_4 = B; Z_5 = \frac{B}{A-1}; Z_6 = \frac{B}{D-1} \quad (6.5)$$

### Определение постоянных четырехполюсника.

Для определения постоянных четырехполюсника опытным путем находят комплексы входных сопротивлений по схеме (рисунок 6.3).

Определим комплексы входного сопротивления четырехполюсника для трех различных режимов:

1. Со стороны зажимов **mn** при разомкнутых зажимах **pq** (холостой ход)

$$Z_{10} = z_{10}e^{j\varphi_{10}}, \text{ где } \varphi_{10} = \arccos \frac{P_{10}}{U_{10}I_{10}} \quad (6.6)$$

Т.к. ветвь **pq** была разомкнута, ( $I_2 = 0$ )

$$U_{10} = AU_{20} \quad (6.7)$$

$$I_{10} = CU_{20}, \quad (6.8)$$

откуда

$$Z_{10} = \frac{A}{C} \quad (6.9)$$

2. Со стороны зажимов **mn** при КЗ ветви **pq**

$$Z_{1к} = z_{1к}e^{j\varphi_{1к}}, \text{ где } \varphi_{1к} = \arccos \frac{P_{1к}}{U_{1к}I_{1к}} \quad (6.10)$$

Т.к. в этом режиме  $U_2 = 0$ , то

$$U_{1к} = BI_{2к} \quad (6.11)$$

$$I_{1к} = DI_{2к}, \quad (6.12)$$

откуда

$$Z_{1к} = \frac{B}{D} \quad (6.13)$$

3. Со стороны зажимов **pq** при КЗ зажимов **mn**

$$Z_{2к} = z_{2к}e^{j\varphi_{2к}} \quad (6.14)$$

При этом

$$U_1 = DU_2 + BI_2 \quad (6.15)$$

$$I_1 = CU_2 + AI_2$$

При  $U_2 = 0$

$$Z_{2к} = \frac{B}{A} \quad (6.16)$$

Таким образом, имеем четыре уравнения:

$$AD - BC = 1 \quad (6.17)$$

$$Z_{10} = A/C \quad (6.18)$$

$$Z_{1к} = B/D \quad (6.19)$$

$$Z_{2к} = B/A \quad (6.20)$$

Решая совместно эти уравнения, находим:

$$A = \sqrt{\frac{Z_{10} Z_{1к}}{(Z_{10} - Z_{1к}) Z_{2к}}} \quad (6.21)$$

Аналогично можно найти  $C$  из (6.18);  $B$  из (6.20) и  $D$  из (6.19)

### Порядок выполнения работы

1. Определение постоянных четырехполюсника.

1.1. Провести опыт холостого хода со стороны зажимов **pg** для чего собрать электрическую схему согласно рисунку 6.3, используя в качестве пассивного четырехполюсника физическую модель линии передачи, а в качестве источника лабораторный автотрансформатор.

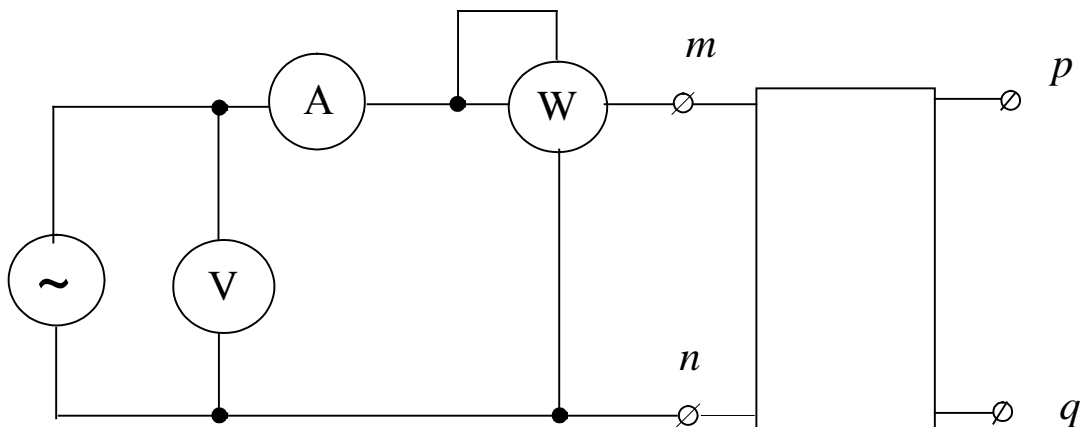


Рисунок 6.3 – Схема определения входных сопротивлений четырехполюсника

1.2. Установить при помощи ЛАТРа напряжение на входе четырехполюсника порядка 250В и снять показания приборов.

1.3. Рассчитать по данным опыта  $Z_{10}$

1.4. Провести опыт короткого замыкания четырехполюсника со стороны зажимов рq, для чего выход четырехполюсника нагрузить на амперметр, установить ток короткого замыкания порядка 2А и записать показания приборов.

1.5. Рассчитать по данным опыта  $Z_{1к}$

1.6. Провести опыт короткого замыкания со стороны зажимов mп, для чего вход четырехполюсника нагрузить на амперметр, запитать четырехполюсник со стороны выходных зажимов от ЛАТРа, установить ток короткого замыкания порядка 2А и записать показания приборов.

1.7. Рассчитать по данным опыта  $Z_{2к}$ .

По полученным из проведенных опытов данным рассчитать постоянные четырехполюсника А, В, С, D. Данные свести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Постоянные четырехполюсника

А	В	С	Д

2. Замена пассивного четырехполюсника Т-образной и П-образной эквивалентными схемами замещения.

2.1. По рассчитанным значениям постоянных четырехполюсника вычислить значения сопротивлений для Т и П-образной схемы замещения.

Данные представить таблицами 6.2 и 6.3.

Таблица 6.2 – Т-образная схема замещения

$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$

Таблица 6.3 – П-образная схема замещения

$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что называют четырехполюсником? Приведите примеры.
2. Какой четырехполюсник называют пассивным?
3. Какую функцию выполняет пассивный четырехполюсник?
4. Напишите уравнения, связывающие напряжение и ток на входе с напряжением и током на выходе четырехполюсника.
5. Нарисуйте Т и П-образные схемы замещения.
6. Какие опыты необходимо провести, чтобы экспериментально определить постоянные четырехполюсника?
7. Какими уравнениями связаны напряжения и токи на входе и выходе четырехполюсника?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 7

### “ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СОЕДИНЕНИИ НАГРУЗКИ ЗВЕЗДОЙ”

**Цель работы:** Экспериментальная проверка основных закономерностей и соотношений в цепи трехфазного тока при соединении нагрузки в звезду для симметричного и несимметричного режимов. Овладение методикой построения векторных диаграмм.

#### Содержание работы

1. Исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении активной нагрузки в звезду без нулевого провода.
2. Исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении активной нагрузки в звезду с нулевым проводом.
3. Исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении активно-реактивной нагрузки в звезду.

#### Элементы теории

Под симметричной трехфазной системой ЭДС понимают совокупность трех синусоидальных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе относительно друг друга на  $120^\circ$ . Мгновенные значения этих ЭДС можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} e_A &= E_m \sin \omega t; \\ e_B &= E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_C &= E_m \sin(\omega t + 120^\circ). \end{aligned} \quad (7.1)$$

Комплексы фазовых ЭДС соответственно можно записать как

$$\dot{E}_A = E_\phi; \quad \dot{E}_B = E_\phi e^{-j120^\circ}; \quad \dot{E}_C = E_\phi e^{j120^\circ}. \quad (7.2)$$

Существуют различные способы соединения фаз генератора с нагрузкой. На рисунке 7.1 представлена схема соединения трехфазного генератора и нагрузки по схеме «звезда – звезда» с нулевым проводом.

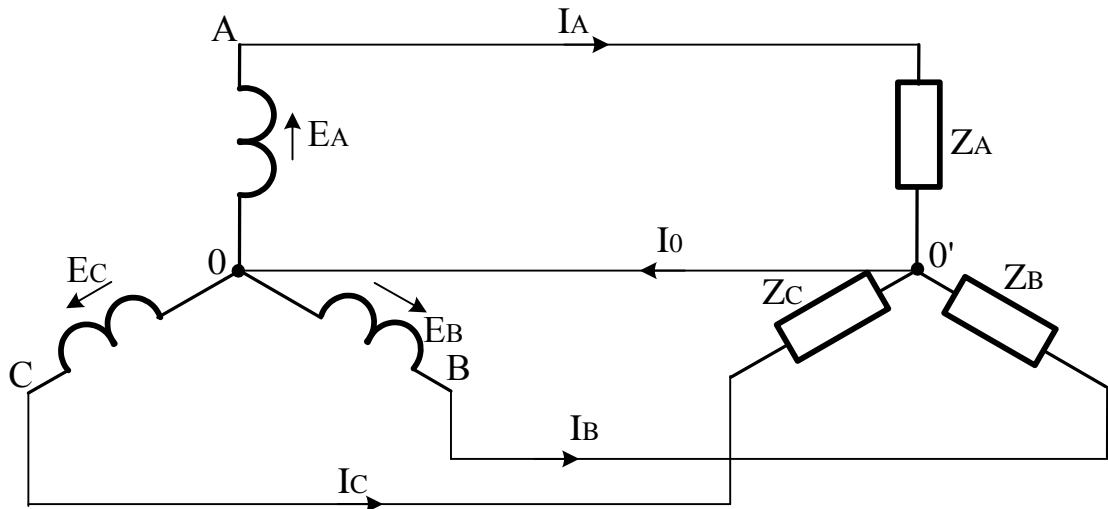


Рисунок 7.1 – схема соединения трехфазного генератора и нагрузки по схеме «звезда – звезда» с нулевым проводом

Провода, соединяющие точки А, В, С генератора с нагрузкой образуют трехфазную линию и называются линейными. Токи, текущие по линейным проводам называют линейными токами, а напряжения между линейными проводами – линейными напряжениями.

Токи, текущие по фазам нагрузки называют фазовыми токами, а напряжения на фазах нагрузки – фазовыми напряжениями.

При соединении потребителя в звезду:

- а) Фазовый ток равен линейному;
- б) Линейное напряжение по модулю в  $\sqrt{3}$  раз больше фазового.

Если нулевой провод обладает весьма малым сопротивлением, то потенциал точки 0 практически равен потенциалу точки 0'. При этом в схеме образуется три обособленных контура однофазного синусоидального тока. Токи в них соответственно равны:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A}{Z_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B}{Z_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C}{Z_C}. \quad (7,3)$$

По первому закону Кирхгофа ток в нулевом проводе равен геометрической сумме фазовых токов:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C. \quad (7.4)$$

Если нагрузочные сопротивления равны по величине и одинаковы по характеру, то такая нагрузка называется симметричной.

При симметричной нагрузке ток нулевого провода равен нулю и этот провод может быть изъят из схемы без изменения режима ее работы.

При несимметричной нагрузке ток нулевого провода в общем случае не равен нулю.

При несимметричной нагрузке и наличии сопротивления в нулевом проводе между точками 0 и 0' возникает напряжение  $\dot{U}_{00'} = \dot{I}_0 \cdot Z_0$ , называемое напряжением смещения нейтрали. На векторной диаграмме это напряжение вызывает смещение точки 0' относительно точки 0.

Это напряжение может быть найдено по методу двух узлов

$$\dot{U}_{0-0'} = \frac{\dot{E}_A Y_A + \dot{E}_B Y_B + \dot{E}_C Y_C}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_0}. \quad (7.5)$$

С учетом этого напряжения фазовые напряжения на нагрузке

$$\begin{aligned} \dot{U}'_A &= \dot{E}_A - \dot{U}_{0-0'}; \\ \dot{U}'_B &= \dot{E}_B - \dot{U}_{0-0'}; \\ \dot{U}'_C &= \dot{E}_C - \dot{U}_{0-0'}; \end{aligned} \quad (7.6)$$

Токи в фазах нагрузки

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{U}'_A / Z_A; \\ \dot{I}_B &= \dot{U}'_B / Z_B; \\ \dot{I}_C &= \dot{U}'_C / Z_C; \end{aligned} \quad (7.7)$$

Отсюда видно, что при изменении любого из сопротивлений нагрузки изменяются все фазовые напряжения и токи.

### Описание лабораторного стенда

Источник трехфазного напряжения расположен внутри стенда. Его напряжения выведены на клеммы и соответственно обозначены 0, А, В, С.

Активной нагрузкой фаз является ламповый реостат. Количество включаемых в фазу нагрузки ламп выбирается переключателями, имеющими три положения (1, 2 или три лампы).

Напряжения измеряются вольтметром со щупами. Для измерения токов используется амперметр с изменяющимися пределами измерения. Выбор нужного предела осуществляется переключателем, который расположен рядом с амперметром. Измерение фазовых токов осуществляется этим амперметром при помощи переключателя 0,А,В,С.

### **Порядок выполнения работы**

**Внимание! Перед началом работы установить на амперметре предел измерения – 5А.**

1. Исследование трехфазной цепи при соединении приемников в звезду без нулевого провода и активной нагрузке фаз.

1.1 Собрать электрическую схему согласно рисунку 1 без нулевого провода с активной нагрузкой фаз. После проверки схемы преподавателем включить стенд.

Провести опыты:

а) При симметричной нагрузке фаз (ламповая нагрузка 1,2,3 лампы устанавливается переключателями соответственно в каждой фазе).

б) При несимметричной нагрузке фаз (в одной из фаз изменить количество включенных ламп).

с) При обрыве одной фазы.

**Примечание:** Во всех опытах измерить линейные и фазовые напряжения, токи фаз, напряжение смещения нейтрали.

Опытные данные записать в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Опытные данные

Режим цепи	Напряжения, В					Токи, А			
	$U_{л}$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_{00'}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_0$
1.1a									
1.1b									
1.1c									
2.1a									
2.1b									
2.1c									
3.									

2. Исследование трехфазной цепи при соединении приемников в звезду с нулевым проводом и активной нагрузке фаз.

2.1 Собрать схему включения ламповой нагрузки с нулевым проводом и проделать два опыта

а) При симметричной нагрузке фаз.

б) При несимметричной нагрузке фаз.

2.2 Измерить фазовые и линейные напряжения, фазовые токи и ток в нулевом проводе. Результаты измерений занести в таблицу 1.

2.3 Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов для всех проделанных опытов. Установить соотношение между линейными и фазовыми напряжениями и выяснить роль нулевого провода.

3. Исследование режимов трехфазной цепи при соединении приемников в звезду с нулевым проводом и активно-реактивной нагрузке фаз.

3.1 Измерить омметром активное сопротивление индуктивной катушки и собрать схему с нулевым проводом и включением в фазу А – активной нагрузки, фазу В – индуктивной и фазу С – емкостной.

3.2 После проверки схемы преподавателем включить стенд и измерить линейные и фазовые напряжения, фазовые токи и ток в нулевом проводе. Результаты измерений занести в таблицу 7.1.

3.3 Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и токов, предварительно вычислив фазовый сдвиг между напряжением и током в фазе В.

### **Содержание отчета**

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что называют трехфазной системой ЭДС?
2. В чем основные преимущества трехфазных систем по сравнению с другими многофазными и однофазной?
3. Как соединить фазы трехфазного генератора в звезду?
4. Каковы соотношения между линейными и фазовыми напряжениями и токами при соединении приемников в звезду?
5. Поясните роль нулевого провода.
6. Как рассчитать токи фаз при наличии несимметрии и отсутствии нулевого провода?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 8

### “ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКОВ ТРЕУГОЛЬНИКОМ”

**Цель работы:** Опытная проверка основных закономерностей и соотношений в цепи трехфазного тока при соединении приемников треугольником для симметричного и несимметричного режима работы цепи. Овладение методикой построения векторных диаграмм.

#### Содержание работы

1. Исследование режимов трехфазной цепи при соединении приемников треугольником и активной нагрузке фаз.
2. Исследование режимов трехфазной цепи при соединении приемников треугольником и смешанной нагрузке (активно-реактивной) фаз.

#### Элементы теории

Под симметричной трехфазной системой ЭДС понимают совокупность трех синусоидальных ЭДС одинаковой частоты и амплитуды, сдвинутых по фазе на 120 градусов.

Существуют различные способы соединения обмоток генератора с нагрузкой. Для соединения фаз трехфазного генератора в треугольник нужно конец каждой предыдущей фазы соединить с началом последующей. При соединении нагрузки в треугольник (рисунок 8.1) линейные токи не равны фазовым токам нагрузки, а линейные напряжения одновременно являются фазовыми.

Величина и фаза тока по отношению к напряжению фазы определяется величиной и характером нагрузки.

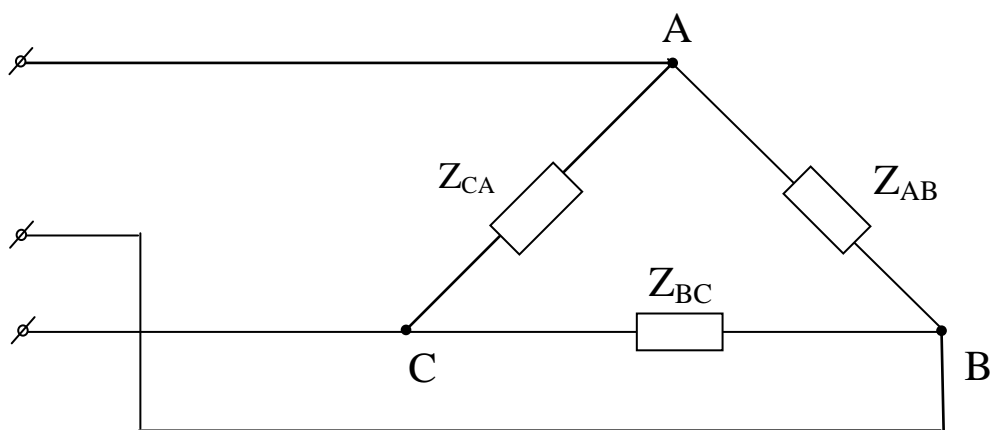


Рисунок 8.1 – Соединение трехфазной нагрузки в треугольник

Линейные токи определяются через фазовые по первому закону Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc} \end{aligned} \right\} \quad (8.1)$$

При равномерной нагрузке фаз линейные токи по модулю в  $\sqrt{3}$  раза больше фазовых токов нагрузки. При несимметричной нагрузке линейные токи могут быть и больше и меньше фазовых токов нагрузки.

### Описание лабораторного стенда

Источник трехфазного напряжения расположен внутри стенда. Его напряжения выведены на клеммы и соответственно обозначены 0, А, В, С.

Активной нагрузкой фаз является ламповый реостат. Количество включаемых в фазу нагрузки ламп выбирается переключателями, имеющими три положения (1, 2 или три лампы).

Напряжения измеряются вольтметром со щупами, имеющим предел измерения 250В. Для измерения токов используется амперметр с изменяющимися пределами измерения. Выбор нужного предела осуществляется переключателем, который расположен рядом с амперметром. Измерение токов осуществля-

ется этим амперметром при помощи переключателя, расположенного на стенде ( $I_{AB}; I_{BC}; I_{CA}; I_A; I_B; I_C$ ).

**Внимание! Перед началом работы установить на амперметре предел измерения – 5А.**

### Порядок выполнения работы

1. Исследование режимов трехфазной цепи при соединении приемников треугольником и активной нагрузке фаз.

1.1. Собрать электрическую цепь в соответствии с рисунком 8.2. Переключатель П установить в положение "нагрузка активная". После проверки схемы преподавателем включить стенд.

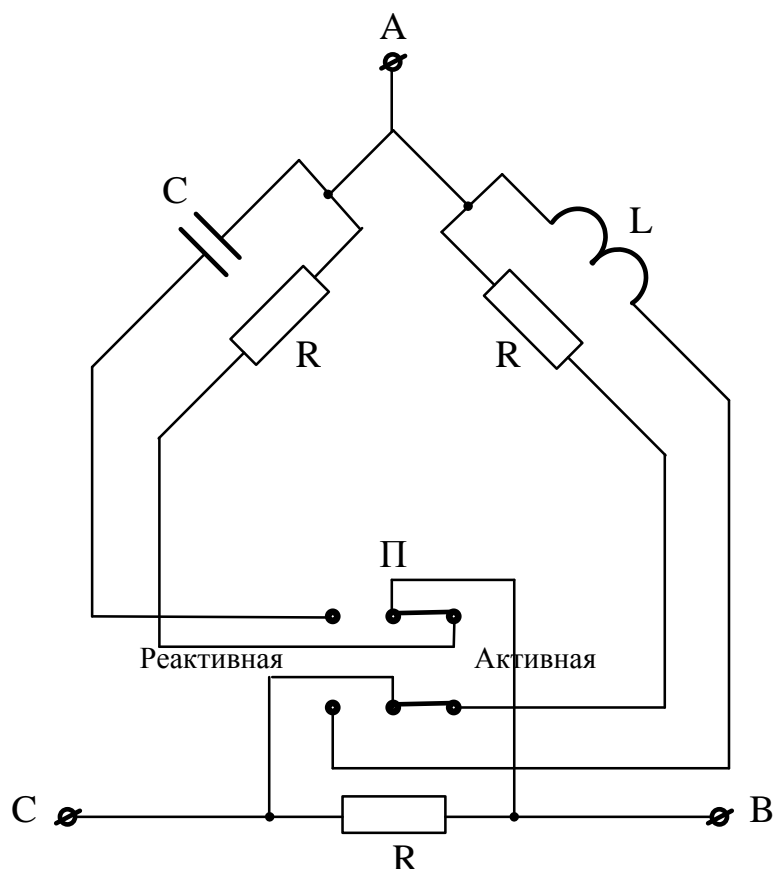


Рисунок 8.2 – Схема исследование режимов трехфазной цепи при соединении приемников треугольником и активной нагрузке фаз

1.2. Провести опыты:

а) При равномерной нагрузке фаз (ламповая нагрузка 1,2,3 лампы устанавливаются тумблерами Т1, Т2, Т3 соответственно в каждой фазе).

б) При неравномерной нагрузке фаз.

в) При одинаковой нагрузке фаз и обрыве одного линейного провода.

Во всех опытах измерить линейные напряжения, линейные и фазовые токи (вольтметр со щупами, амперметр с переключателем). Опытные данные занести в таблицу 1.

Построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов для всех опытов. Установить соотношения между линейными и фазными токами.

г) Подсчитать мощности фаз и всей цепи.

2. Исследование режимов трехфазной цепи при соединении приемников треугольником и активно-реактивной нагрузке фаз.

2.1. Переключатель П установить в положение "нагрузка реактивная". При этом в фазу АВ включается индуктивность, в фазу ВС активная нагрузка, а в фазу СА - емкостная.

2.2. Измерить напряжения, линейные и фазные токи. Результаты измерений занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Экспериментальные исследования схемы "треугольник–треугольник"

Режим	Измерено									Вычислено		
	Напряжения, В			Токи, А						Мощность		
	$U_{ав}$	$U_{вс}$	$U_{са}$	$I_{ав}$	$I_{вс}$	$I_{са}$	$I_a$	$I_b$	$I_c$	$P,$ Вт	$Q,$ ВАр	$S,$ ВА
1												
2												
3												

2.3. Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений и токов, считая индуктивность и емкость идеальными (т.е. токи и напряжения на этих элементах считать смещенными относительно друг друга на угол 90 градусов).

2.4. Рассчитать активную и реактивную мощность фаз, а также полную мощность всей цепи.

### **Содержание отчета**

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое трехфазная система ЭДС?
2. В чем преимущества 3-х фазных систем передачи электрической энергии по сравнению с другими многофазными и однофазной системой?
3. Как соединить обмотки генератора в треугольник?
4. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при соединении приемников в треугольник?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 9

### «ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ, СОДЕРЖАЩЕЙ РЕЗИСТОР И КОНДЕНСАТОР»

**Цель работы:** Изучить влияние параметров RC-цепи на характер и длительность переходного процесса. Овладеть методикой графического определения постоянной времени переходного процесса.

#### Содержание работы

1. Изучение процесса разряда конденсатора через резистор.
2. Изучение влияния параметров цепи на характер и длительность переходного процесса.

#### Элементы теории

Процессы, возникающие при переходе от одного установившегося режима работы к другому установившемуся режиму, носят название переходных процессов. Переходные процессы возникают при включении, выключении, изменении величины напряжения или самих параметров цепи, коротком замыкании ее элементов и других изменениях.

Эти процессы возникают вследствие несоответствия запасов энергии в электрических полях конденсаторов и магнитных полях катушек индуктивности (включенных в цепь) в момент начала переходного процесса этим же величинам при новом установившемся режиме цепи и невозможности мгновенного изменения энергии этих полей. Для изменения этой энергии требуется некоторое время, которое и определяет продолжительность переходного процесса. Характер и продолжительность переходного режима зависит от параметров цепи ( $R, L, C$ ).

Включение конденсатора в сеть постоянного напряжения вызывает появление переходного процесса, в течение которого конденсатор заряжается. Если заряженный конденсатор замкнуть на резистор, то он будет разряжаться и этот

процесс тоже будет протекать некоторое время, в течении которого напряжение на конденсаторе и ток изменяются по законам:

$$U_c = U_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad ; \quad i = \frac{U_0}{R} e^{-t/\tau} = I_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (9.1)$$

где  $U_0$  – значение напряжения, до которого был заряжен конденсатор;

$I_0$  – начальный ток разряда конденсатора,

$\tau = RC$  – постоянная времени.

Из этих уравнений видно, что разрядный ток и напряжение на конденсаторе максимальны в начальный момент ( $t = 0$ ) переходного процесса, а затем с течением времени спадают по экспоненциальному закону. Скорость изменения этих величин зависит от постоянной времени  $\tau = RC$ . Под постоянной времени переходного процесса понимают время, за которое переходный ток или напряжение изменяется в  $e$  раз. Чем больше  $\tau$ , тем медленнее изменяется ток.

Постоянная времени может быть определена несколькими способами:

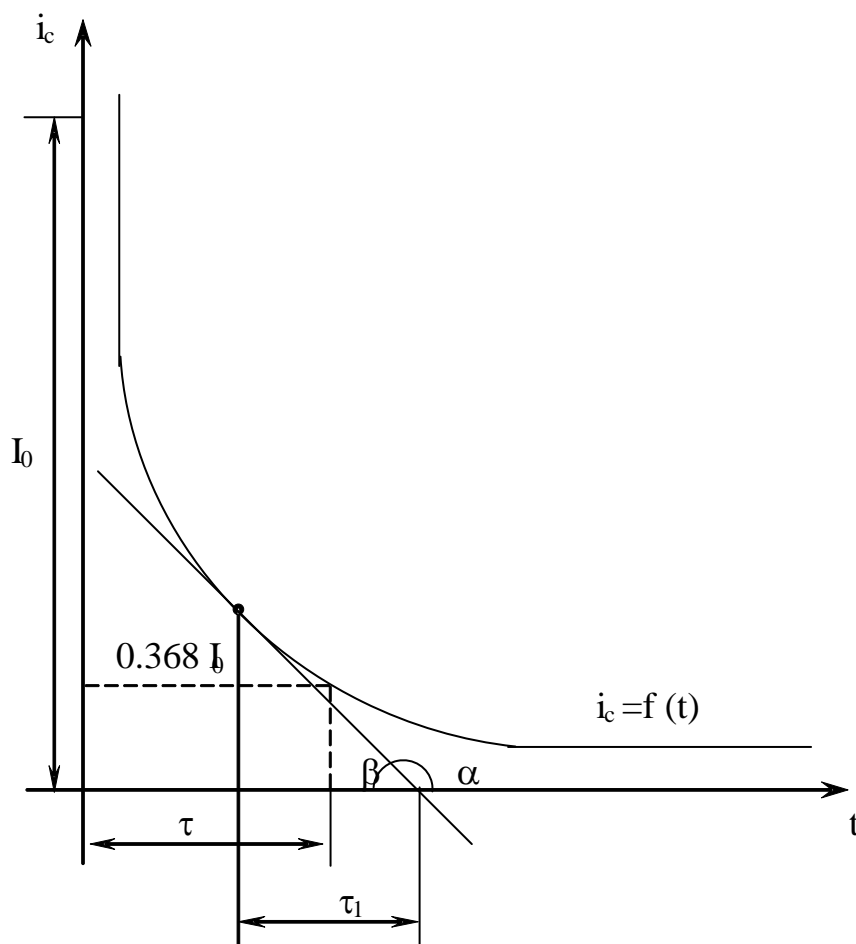
1. Аналитический, если известны параметры  $R$  и  $C$  цепи.
2. Графический, по экспериментально полученной кривой  $i = f(t)$ .

Заметим, что при  $t = \tau$ ,  $i_0 = I_0 \cdot e^{-1} = 0.368 \cdot I_0$ .

Для определения  $\tau$  на опытной кривой  $i_c = f(t)$  отыскивают точку  $i = 0,368 I_0$  (рис. 9.1), из которой опускают перпендикуляр на ось времени. Полученный отрезок между основанием перпендикуляра и началом координат в принятом масштабе выражает численное значение.

3. Графический по касательной к опытной кривой  $i = f(t)$ .

Скорость изменения разрядного тока:

Рисунок 9.1 – Графический способ определения  $\tau$ 

$$\frac{di_C}{dt} = -\frac{1}{\tau} I_0 \cdot e^{-t/\tau} = -\frac{1}{\tau} \cdot i_C, \text{ откуда}$$

$$\tau = -\frac{i_C}{di_C/dt} = -\frac{i_C}{\text{tg}\alpha} = \frac{i_C}{\text{tg}\beta}, \text{ (рис. 9.1)}$$

Таким образом, для определения  $\tau$  нужно провести касательную к кривой  $i_C = f(t)$  до пересечения с осью времени. Отрезок, заключенный между перпендикуляром из точки касания на ось времени и точкой пересечения касательной с этой же осью равен постоянной времени  $\tau$ . Для точного определения пользуются средним из трех его значений, полученных для точек  $i_C = I_0$ ;  $i_C = 0,7 I_0$ ;  $i_C = 0,4 I_0$ .

### Порядок выполнения работы

1. Изучение процесса разряда конденсатора через резистор.

а) Принципиальная схема лабораторной работы представлена на рисунке 9.2 и смонтирована внутри стенда.

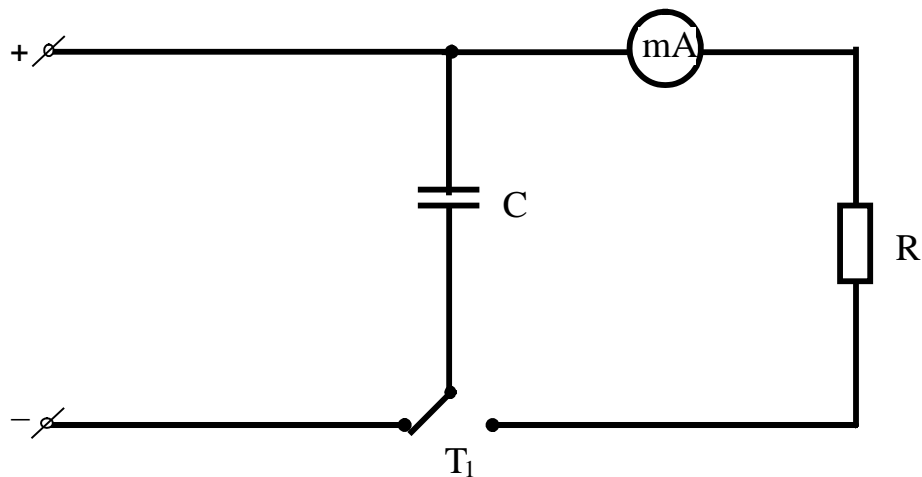


Рисунок 9.2 – Принципиальная схема лабораторной работы

б) Включить стенд, для чего переключатель УП поставить в левое положение. Произвести предварительный заряд конденсатора, для чего тумблер  $T_1$  поставить в положение "Заряд".

в) Переведя тумблер  $T_1$  в положения "Разряд", добиться (изменением сопротивления резистора  $R$ ), чтобы в начальный момент стрелка микроамперметра отклонилась на 80 - 90 % от предела измерения прибора.

г) Снова зарядить конденсатор и, переключив его на разряд, зафиксировать в начальный момент  $t=0$  максимальное значение разрядного тока  $I_0$ . При уменьшении тока на каждые 10 мкА фиксировать по секундомеру время, прошедшее с момента начала разряда конденсатора. Данные измерений свести в таблицу.

д) По полученным опытными данным построить в масштабе зависимость  $i_C=f(t)$ .

е) По полученной кривой графически рассчитать постоянную времени тремя способами, описанными выше; вычислить ее среднее значение.

ж) Рассчитать величину сопротивления  $R$ , на которое разряжался конденсатор, если  $C = 1000 \text{ мкФ}$ .

з) Вычислить значения напряжения на конденсаторе  $U_C$  для различных моментов времени переходного процесса, принимая  $t = 0$ ,  $t = \tau$ ,  $t = 2\tau$  и т.д. и построить график зависимости  $U_C = f(t)$ .

2. Изучение влияния параметров RC-цепи на характер и длительность переходного процесса.

Повторить эксперимент при уменьшенном значении сопротивления  $R$ , построить график  $i_C = f(t)$ , сравнить с полученным в п. 1д и вычислить новое значение постоянной времени  $\tau$  и сопротивления  $R$ .

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Какой процесс в электрической цепи называется переходным?
2. В чем заключаются отличия установившегося и переходного процессов в электрической цепи?
3. Что такое постоянная времени переходного процесса?
4. Как вычисляется постоянная времени электрической цепи, содержащей резистор и конденсатор?
5. Чем определяется характер и длительность переходного процесса?
6. Пояснить графический способ определения постоянной времени переходного процесса.
7. Сформулировать законы коммутации.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 10

### «ИЗУЧЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНОЙ НЕРАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ»

**Цель работы:** Исследовать характер переходных процессов в линейной неразветвленной электрической цепи при различных соотношениях ее параметров.

#### Содержание работы

1. Исследование переходного процесса в неразветвленной электрической цепи, содержащей резистор, катушку индуктивности и конденсатор.
2. Исследование переходного процесса в цепи, состоящей из катушки индуктивности и резистора.

#### Элементы теории

При включении под постоянное напряжение  $U_0$  электрической цепи, состоящей из последовательного соединения резистора  $R$  и катушки индуктивности  $L$ , возникает переходный процесс, при котором ток  $i$  в цепи постепенно нарастает, а напряжение на катушке  $U_L$  уменьшается по экспоненциальному закону

$$i = \frac{U_0}{R}(1 - e^{-t/\tau}); \quad U_L = U_0 e^{-t/\tau} \quad (10.1)$$

где  $\tau = L/R$  – постоянная времени, характеризующая скорость протекания переходного процесса.

При этом происходит накопление энергии в магнитном поле катушки:

$$W_i = \frac{1}{2} Li^2 \quad (10.2)$$

Если катушку индуктивности отключить от сети и замкнуть на сопротивление  $R$ , то запасенная в магнитном поле энергия будет постепенно расходоваться, выделяясь в виде тепла в резисторе  $R$ ; напряжение на катушке и ток цепи будут уменьшаться по экспоненциальному закону:

$$U_L = U_0 e^{-t/\tau}; \quad i = \frac{U_0}{R} e^{-t/\tau} \quad (10.3)$$

В данной работе кривая напряжения на катушке отображается на экране осциллографа. Переключение катушки производится с помощью электронного переключателя П, который коммутирует данную цепь с частотой необходимой для завершения переходного процесса (рисунок 10.1).

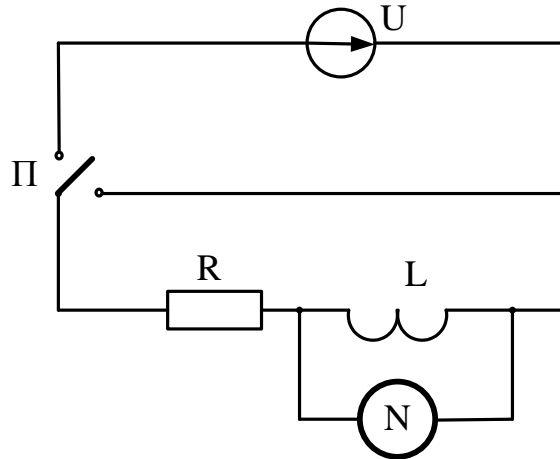


Рисунок 10.1 – Схема для исследования переходного процесса в цепи  $RL$

Если разрядная цепь, кроме резистора и катушки индуктивности содержит конденсатор (рисунок 10.2), то энергия электрического поля конденсатора при его разряде переходит в тепло в резисторе и запасается в магнитном поле катушки индуктивности.

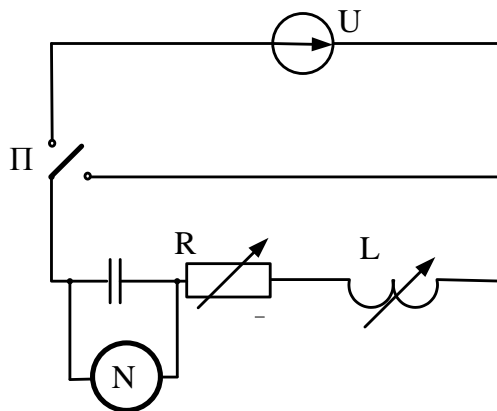


Рисунок 10.2 – Схема для исследования переходного процесса в цепи  $RLC$

Как известно, характер разряда определяется соотношением параметров  $R, L, C$ .

При  $R > 2\sqrt{L/C}$  разряд носит аperiодический характер, когда напряжение на конденсаторе  $U_c$  монотонно спадает до нуля, т.е. энергия, запасенная в электрическом поле конденсатора, полностью выделяется в виде тепла в резисторе  $R$ .

При  $R < 2\sqrt{L/C}$  наступает колебательный (периодический) разряд, когда напряжение на конденсаторе имеет вид затухающей косинусоиды

$$u_c = U_0 e^{-\delta t} \cos \omega t \quad (10.4)$$

При этом происходит обмен энергией между электрическим полем конденсатора и магнитным полем катушки, и только часть энергии выделяется в виде тепла в резисторе.

Циклическая частота затухающих колебаний

$$\omega = \sqrt{1/LC + \delta^2} \quad (10.5)$$

где  $\delta = R/2L$  – коэффициент затухания.

С изменением параметров цепи  $R, L, C$  изменяются значения  $\omega$  и  $\delta$ .

При  $R = 2\sqrt{L/C}$  разряд конденсатора носит предельно аperiодический характер. В этом случае сопротивление цепи является критическим  $R_{кр}$ .

В данной работе на экране осциллографа фиксируется как процесс заряда, конденсатора, так и процесс его разряда через катушку и резистор

### **Порядок выполнения работы**

1. Исследование переходного процесса в неразветвленной электрической цепи, содержащей  $R, L, C$ .

1.1. Исследуемая схема выполнена в виде отдельного макета. Включением переключателя "Сеть" схема подготавливается к работе. Включить электронный осциллограф, подключить его вход к макету. Выбор исследуемой схемы осуществляется тумблером  $T_3$ . Включение макета осуществляется тумблером  $T_4$ .

1.2. Поставить тумблер  $T_3$  в положение "LC", тумблер  $T_2$  в положение  $C_1$ . Установить рукоятку резистора  $R$  в правое положение. Регулируя частоту развертки и амплитуду синхронизации осциллографа добиться на экране неподвижного изображения кривой разряда.

1.3. Зарисовать осциллограмму и подсчитать на 25 мм длины экрана количество затухающих синусоид.

1.4. Подсчитать величину коэффициента затухания  $\delta$  и циклической частоты затухающих колебаний  $\omega$ , если активное сопротивление, индуктивность и емкость данной цепи соответственно равны:

1) Макет №1 :

$R = 1$  Ом (в крайнем правом положении);  $L = 0,8$  Гн; в верхнем положении:  $C_1 = 30$  нФ., в среднем:  $C_2 = 10$  нФ

2) Макет №2:

$R = 1$  Ом (в крайнем правом положении);  $L = 0,12$  Гн; в левом положении  $C_1 = 0,15$  мкФ., в среднем:  $C_2 = 0,05$  мкФ.

1.5. Изменяя емкость цепи тумблером  $T_2$  убедиться в изменении частоты затухающих колебаний  $\omega$  и постоянстве коэффициента затухания  $\delta$ . Зарисовать осциллограмму для емкости  $C_2$ .

1.6 Подсчитать сопротивление цепи  $R$ , при котором разряд носит предельно апериодический характер; снять кривую этого разряда.

Убедиться в изменении  $\delta$  и  $\omega$ , при переходе от периодического разряда конденсатора к апериодическому.

2. Исследование переходного процесса в цепи  $RL$ .

2.1. Поставить тумблер  $T_3$  в положение "L".

2.2. Зарисовать осциллограмму кривой переходного процесса.

2.3 Изменяя сопротивление цепи резистором "R", убедиться в изменении постоянной времени  $\tau = L/R$ . Зарисовать еще одну осциллограмму. ( $R_1 = 1$  ом;  $R_2$  взять из пункта 1.6).

**Содержание отчета**

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой процесс называют переходным?
2. Чем обусловлены переходные процессы в электрических цепях?
3. Сформулировать законы коммутации.
4. Чем определяется характер и длительность переходного процесса?
5. Как вычисляется постоянная времени цепи, содержащая катушку индуктивности и резистор?

## “МАГНИТНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ”

**Цель работы:** Ознакомиться с устройством и принципом действия простейшего магнитного усилителя, как нелинейного управляемого элемента электрической цепи переменного тока. Изучить его основные свойства и характеристики.

### Содержание работы

1. Изучение работы магнитного усилителя без подмагничивания постоянным полем.
2. Исследование влияния тока подмагничивания на режим работы магнитного усилителя.

### Элементы теории

Усилителем мощности называется такое устройство, в котором с помощью малых мощностей в управляющих цепях можно изменять большие мощности в рабочих цепях переменного тока.

В основе работы магнитного усилителя лежит явление изменения степени насыщения стального сердечника путем подмагничивания его постоянным током. Простейший магнитный усилитель представляет трехстержневой магнитопровод с тремя обмотками (рис.11.1).

Две обмотки  $W_P$  помещаются на крайних стержнях магнитопровода, включаются последовательно с сопротивлением нагрузки  $R_H$  и питаются от источника переменного тока. Третья обмотка  $W_U$  располагается на среднем стержне и подключается к источнику постоянного тока.

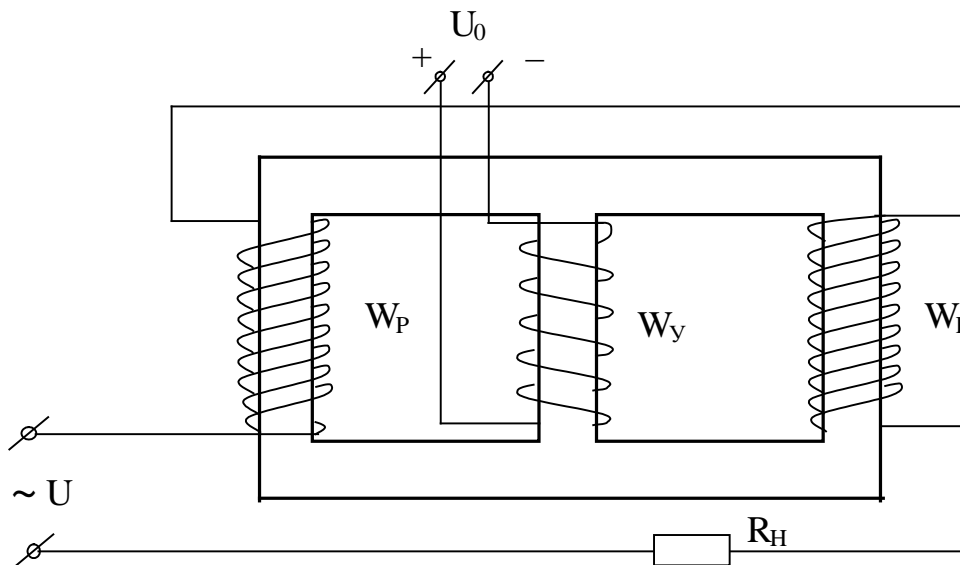


Рисунок 11.1 – Устройство магнитного усилителя мощности

Цепь, в которую включена нагрузка, называют рабочей или управляемой, а цепь, питаемую постоянным током - управляющей цепью усилителя. Обмотки рабочей цепи соединены так, что потоки, создаваемые ими в среднем стержне взаимно компенсируются, вследствие чего в управляющей обмотке не наводится ЭДС.

Если в управляющую обмотку  $W_U$  подать постоянный ток, то он создает магнитный поток во всех трех стержнях. Вследствие нелинейного характера намагничивания сердечников происходит уменьшение индуктивности, и, следовательно, уменьшение реактивного сопротивления рабочих обмоток.

Изменяя ток подмагничивания, представляется возможным управлять мощностью нагрузки. Так как между рабочей и управляющей цепями отсутствует гальваническая связь, то данный усилитель представляет пример бесконтактного управления мощностью нагрузки.

Основной характеристикой усилителя является зависимость между мощностью, отдаваемой приемнику, и мощностью, расходуемой в управляющей цепи. Коэффициентом усиления по мощности  $K_P$  называется отношение изменения мощности нагрузки, полученной при подмагничивании, к мощности, расходуемой в цепи управления

$$K_p = \frac{\Delta P_H}{P_y} = \frac{P_2 - P_1}{P_y} = \frac{(I_2^2 - I_1^2) \cdot Z_H}{I_y \cdot U_0}, \quad (11.1)$$

где  $Z_H = \frac{U_H}{I_H}$

$I_y, U_0$  - ток и напряжение цепи управления,

$I_2, I_1$  - ток нагрузки при подмагничивании и без него.

Другой не менее важной характеристикой усилителя является кратность

регулирования по току  $\lambda = \frac{I_2}{I_1}$ .

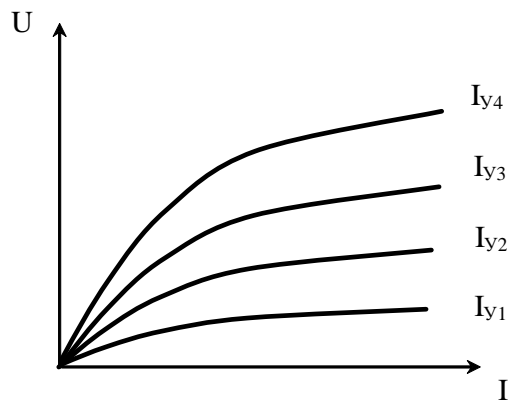


Рисунок 11.2 – Семейство рабочих характеристик усилителя

Чтобы получить наглядную картину зависимостей между напряжением на зажимах рабочей цепи усилителя и током нагрузки при различных значениях тока управляющей цепи  $I_y$ , строят семейство характеристик (рис.11.2).

Магнитные усилители применяются в устройствах автоматического регулирования, управления и контроля. Они используются для автоматического управления двигателями, нагревателями, освещением. Они также входят в устройства автоматики, когда слабые сигналы от тахогенераторов, термопар и других маломощных датчиков преобразуются в более мощные сигналы в цепях регулирующих устройств.

### Порядок выполнения работы

1. Изучение работы магнитного усилителя без подмагничивания.
  - а) Собрать электрическую схему (рис.11.3)

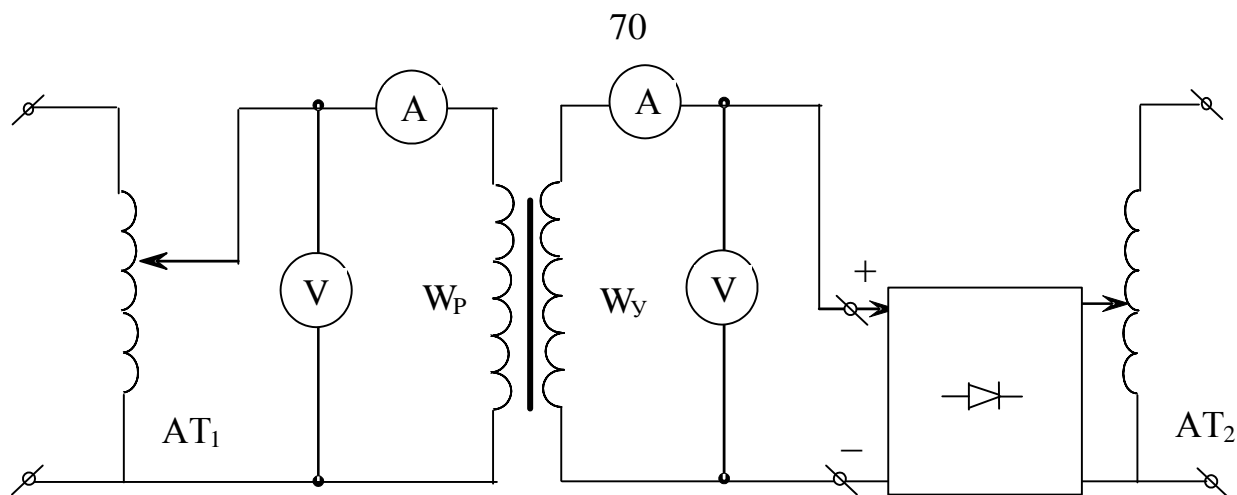


Рисунок 11.3 – Схема для исследования магнитного усилителя

б) После проверки схемы преподавателем включить стенд. Изменяя автотрансформатором  $AT_1$  напряжение в цепи рабочей обмотки, снять зависимость  $U_p = f(I_p)$  при отсутствии подмагничивания. Данные опыта занести в таблицу 11.1.

Таблица 11.1 – Данные опыта

$I_Y=0$	$U_p$ (В)								
	$I_p$ (А)								
$I_Y=I_1$	$U_p$ (В)								
	$I_p$ (А)								
$I_Y=I_2$	$U_p$ (В)								
	$I_p$ (А)								
$I_Y=I_3$	$U_p$ (В)								
	$I_p$ (А)								

2. Исследование влияния тока подмагничивания на режим работы магнитного усилителя.

а) Снять зависимость  $U_p = f(I_p)$  при различных значениях тока подмагничивания ( $I_Y = 0,1; 0,2; 0,3A$ ).

б) Для установления влияния тока подмагничивания на изменение мощности приемника, коэффициента усиления по мощности и коэффициента крат-

ности тока необходимо проделать серию опытов при постоянном напряжении сети  $U_p=220\text{В}$  и разных значениях тока подмагничивания. Данные измерений и вычислений занести в таблицу 11.2.

Таблица 11.2 – Данные измерений и вычислений

№ п/п	Измерено			Вычислено		
	$I_Y$	$I_P$	$U_O$	$S_P$	$P_Y$	$K_P$
1.						
2.						
3.						

в) По данным таблиц построить семейство характеристик магнитного усилителя  $U_p = f(U_Y)$  при различных значениях  $I_Y$  и графики зависимостей  $S_P=f(I_Y)$ ,  $I_P=f(I_Y)$ .

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### Контрольные вопросы

1. Что называют магнитным усилителем?
2. Поясните принцип действия магнитного усилителя.
3. Как влияет ток подмагничивания на характеристики магнитного усилителя?
4. Что понимают под коэффициентом усиления магнитного усилителя по мощности?
5. Что понимают под кратностью регулирования по току?
6. Назовите области применения магнитных усилителей.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12

### “НЕЛИНЕЙНАЯ УПРАВЛЯЕМАЯ ИНДУКТИВНОСТЬ”

**Цель работы:** Изучить свойства катушки со стальным сердечником. Ознакомиться с устройством, принципом действия, характеристиками нелинейной управляемой индуктивности.

#### Содержание работы

1. Изучение режима работы нелинейной индуктивности на переменном токе без подмагничивания постоянным полем.
2. Изучение режима работы управляемой нелинейной индуктивности при разных токах подмагничивания.

#### Элементы теории

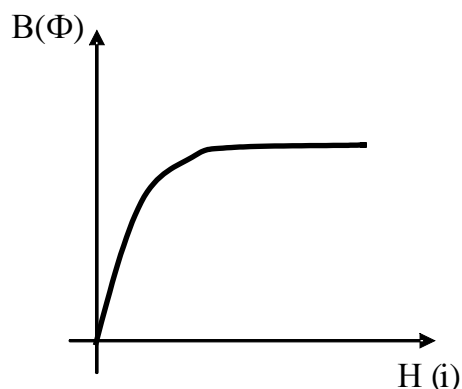
Под нелинейным индуктивным сопротивлением или нелинейной индуктивностью понимают катушку с обмоткой, помещенной на замкнутом сердечнике из ферромагнитного материала. Индуктивное сопротивление такой катушки, оказываемое прохождению переменного тока не постоянно, оно зависит от величины приложенного напряжения.

Нелинейность катушки со стальным сердечником обусловлена следующим. Протекающий ток  $i$  создает в сердечнике магнитный поток  $\Phi$  с индукцией  $B = \Phi/S$ , где  $S$  - сечение магнитопровода. Поскольку  $S = \text{Const}$ , то  $\Phi \equiv B$ . По закону полного тока

$H \cdot l = I \cdot \varpi$ , где  $l$  – длина средней силовой линии, а  $\varpi$  - число витков катушки. Так как  $l = \text{Const}$  и  $\varpi = \text{Const}$ , то  $H \equiv i$ . Следовательно, кривая  $\Phi = f(i)$  катушки будет подобна кривой намагничивания стали  $B = f(H)$  (рис.12.1).

При малых токах, т.е. на начальном участке кривой намагничивания (линейная область) можно считать, что магнитный поток растет пропорционально току  $\Phi \equiv i$ . По мере увеличения тока наступает магнитное насыщение и хотя

ток  $i$  увеличивается значительно, магнитный поток увеличивается мало, т.е. отношение  $\Phi/i$  становится меньше.



Индуктивность катушки  $L = \psi / i = \varpi \Phi / i$  ( $\psi$  - потокосцепление) - перестает быть постоянной, она теперь зависит от величины намагничивающего тока, который, в свою очередь, является функцией приложенного напряжения.

Рисунок 12.1

Чем больше магнитное насыщение, тем меньше индуктивность катушки  $L$ , а значит меньше ее индуктивное сопротивление  $X_L$ .

Итак, изменением величины приложенного напряжения можно изменять индуктивное сопротивление катушки, т.е. имеем управляемую нелинейную индуктивность.

Управляемую нелинейную индуктивность можно также получить при постоянном по величине приложенном к катушке напряжении и изменении магнитного потока  $\Phi$ , а, следовательно, и степени насыщения стального сердечника за счет подмагничивающей катушки, питаемой постоянным током (рис. 12.2).

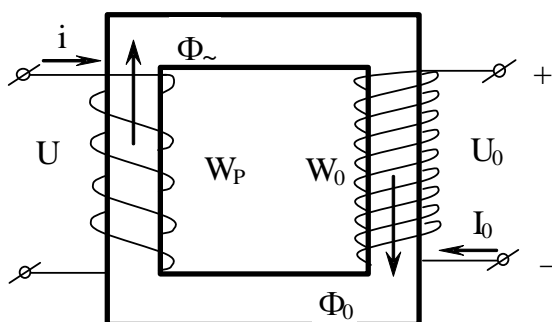


Рисунок 12.2 – Неуправляемая нелинейная индуктивность

В этом случае управляемая нелинейная индуктивность состоит из двух обмоток: рабочей  $\varpi_p$  и управляющей  $\varpi_0$ . Обмотка  $\varpi_p$  включена в цепь переменного тока и по ней проходит ток  $i$ . Обмотка управления или подмагничи-

вания  $\varpi_0$  - к источнику постоянного тока  $U_0$ , по ней проходит постоянный ток  $I_0$ .

Переменный ток  $i$  создает переменный магнитный поток  $\Phi_{\sim}$ , а постоянный ток  $I_0$  создает в магнитопроводе постоянный магнитный поток  $\Phi_0$ .

Общий магнитный поток в сердечнике  $\Phi = \Phi_{\sim} + \Phi_0$  равен сумме потоков, создаваемых обеими катушками. В режиме, близком к насыщению магнитопровода, незначительное увеличение потока  $\Phi_0$  приведет к уменьшению индуктивности  $L$  и индуктивного сопротивления  $X_L$  рабочей катушки.

Уменьшение индуктивного сопротивления в цепи переменного тока приведет к увеличению тока  $i$  при неизменном приложенном напряжении  $U_{\sim}$ . Таким образом, нелинейная индуктивность позволяет путем изменения величины постоянного тока  $I_0$  в обмотке  $\varpi_0$  управлять величиной тока  $i$  в рабочей обмотке  $\varpi_p$  через изменение индуктивного сопротивления этой обмотки.

Индуктивное сопротивление катушки можно регулировать также изменением воздушного зазора магнитопровода. В этом случае за счет уменьшения воздушного зазора уменьшается магнитное сопротивление и увеличивается магнитный поток, что приводит к увеличению индуктивности катушки.

### Порядок выполнения работы

1. Изучение режима работы нелинейной индуктивности на переменном токе без подмагничивания постоянным полем.

а) Измерить омметром активное сопротивление рабочей катушки.

б) Собрать электрическую схему (рис. 12.3) для снятия вольтамперной характеристики катушки со стальным сердечником.

в) После проверки схемы преподавателем включить стенд и, изменяя автотрансформатором подводимое напряжение от 0 до 250В через каждые 20В измерить токи.

г) Подсчитать для каждого опыта полное сопротивление, индуктивное сопротивление и индуктивность катушки. Данные пунктов "в" и "г" свести в таблицу 12.1.

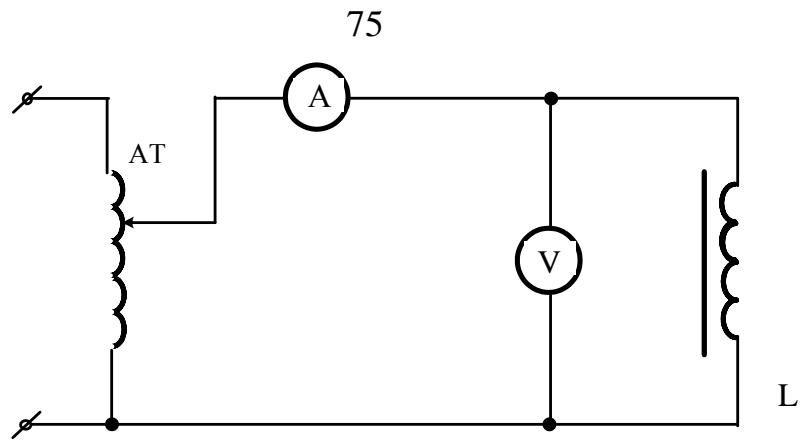


Рисунок 12.3 – Электрическая схема для снятия вольтамперной характеристики катушки со стальным сердечником

Таблица 12.1 – Данные пунктов "в" и "г"

$U, В$								
$I, А$								
$Z, Ом$								
$X_L, Ом$								
$L, Гн$								

2. Изучение режима работы управляемой нелинейной индуктивности при разных токах подмагничивания.

а) Собрать электрическую схему для исследования управляемой индуктивности (рис.12.4).

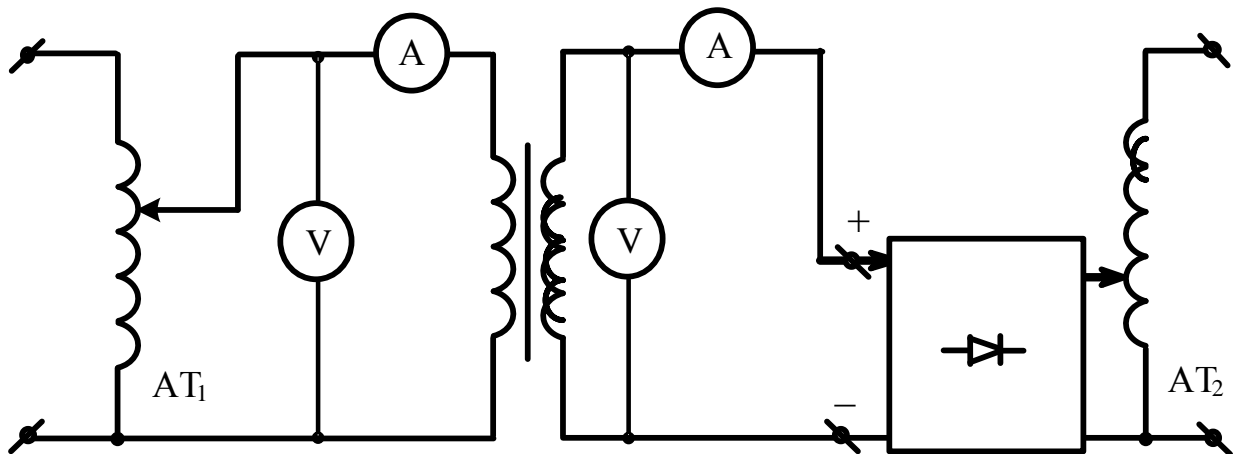


Рисунок 12.4 – Электрическая схема для исследования управляемой индуктивности

После проверки схемы преподавателем включить стенд. Установить на рабочей катушке  $\varpi_p$  напряжение  $U_{\sim} = 220\text{В}$ , затем, изменяя другим автотрансформатором напряжение  $U_o$ , подводимое от выпрямителя к обмотке подмагничивания  $\varpi_o$  в пределах 0 до 180В через каждые 20В, записать показания амперметров и вольтметров в цепях переменного и постоянного тока.

Данные измерений занести в таблицу 2.

б) Подсчитать для каждого опыта и занести в таблицу 12.2 значение индуктивности рабочей катушки.

Таблица 12.2 – Данные измерений

$U_{\sim}, \text{В}$	220	220	220	220	220	220	220
$I_{\sim}, \text{А}$							
$U_o, \text{В}$							
$I_o, \text{А}$							
$L, \text{Гн}$							

в) Эксперимент по п.п. а, б повторить при напряжении на рабочей катушке 100 – 150 В.

г) Построить вольтамперную характеристику рабочей катушки  $U_L = f(I)$  без подмагничивания.

д) Построить зависимость индуктивности рабочей катушки от величины подмагничивающего тока  $L = f(I_o)$ .

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

**Контрольные вопросы**

1. Почему катушка с ферромагнитным сердечником является нелинейным элементом?
2. Нарисуйте вольтамперную характеристику нелинейной индуктивности и поясните ее.
3. Почему индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником зависит от приложенного к ней напряжения?
4. Как осуществляется управление индуктивностью?
5. Где применяют управляемые нелинейные индуктивности?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 13 “ФЕРРОРЕЗОНАНС ТОКОВ”

**Цель работы:** Изучить работу нелинейной индуктивности в цепи переменного тока. Ознакомиться с явлением феррорезонанса токов.

### Содержание работы

1. Изучение режима работы катушки со стальным сердечником в цепи переменного тока.
2. Исследование явления феррорезонанса токов.

### Элементы теории

Катушка со стальным сердечником является нелинейной индуктивностью. При увеличении приложенного напряжения происходит насыщение магнитопровода и изменение индуктивности (а, следовательно, и индуктивного сопротивления) катушки. Вольтамперная характеристика катушки со стальным сердечником  $U_L = f(I)$  на переменном токе (рис. 13.1) почти полностью повторяет кривую намагничивания стали  $\hat{O} = f(I\varpi)$ .

Обычные конденсаторы относятся к линейным элементам и их вольтамперная характеристика  $U_C = f(I)$  на переменном токе представляет прямую линию, выходящую из начала координат.

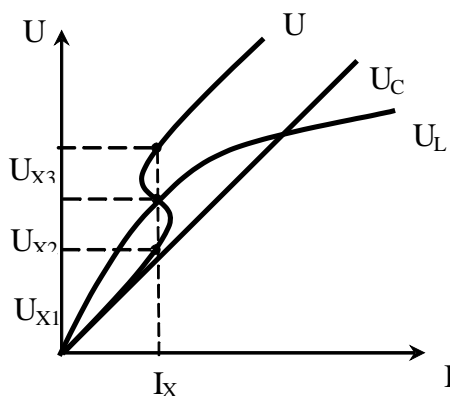


Рисунок 13.1 – Вольтамперная характеристика катушки со стальным сердечником  $U_L = f(I)$  на переменном токе

При параллельном включении катушки со стальным сердечником и конденсатора токи катушки  $I_L$  и конденсатора  $I_C$  сдвинуты по фазе на 180 градусов (в идеальном случае). Поэтому результирующий (общий) ток  $I$ , равный геометрической сумме токов  $I = I_L + I_C$  по абсолютной величине будет равен их разности. При малых напряжениях, т.е. при малом насыщении сердечника катушки преобладает опережающий ток емкости  $I_C$ , но с увеличением напряжения из-за насыщения ток катушки  $I_L$  будет расти быстрее. При некотором значении напряжения токи  $I_L$  и  $I_C$  сравниваются по величине и при дальнейшем увеличении напряжения в цепи начнет преобладать отстающий ток. Режим, при котором токи катушки и конденсатора равны, т.е. взаимно скомпенсированы, соответствуют феррорезонансу токов. Из-за наличия активных потерь и высших гармоник в режиме феррорезонанса общий ток не равен нулю.

Вольтамперная характеристика всей цепи  $U = f(I)$  представляет сложную кривую: одно и то же значение тока  $I_X$  может быть получено при трех различных значениях напряжения  $U_{X1}$ ,  $U_{X2}$ ,  $U_{X3}$ .

Эта особенность может быть использована в цепях автоматики и управления.

### **Порядок выполнения работы**

1. Изучение режима работы катушки со стальным сердечником.
  - а) Измерить омметром активное сопротивление катушки.
  - б) Собрать электрическую схему для снятия вольтамперной характеристики катушки со стальным сердечником (рис.13.2).

После проверки схемы преподавателем включить стенд и, изменяя автотрансформатором подводимое напряжение от 0 до 250В через каждые 20В, записать показания амперметра и вольтметра.

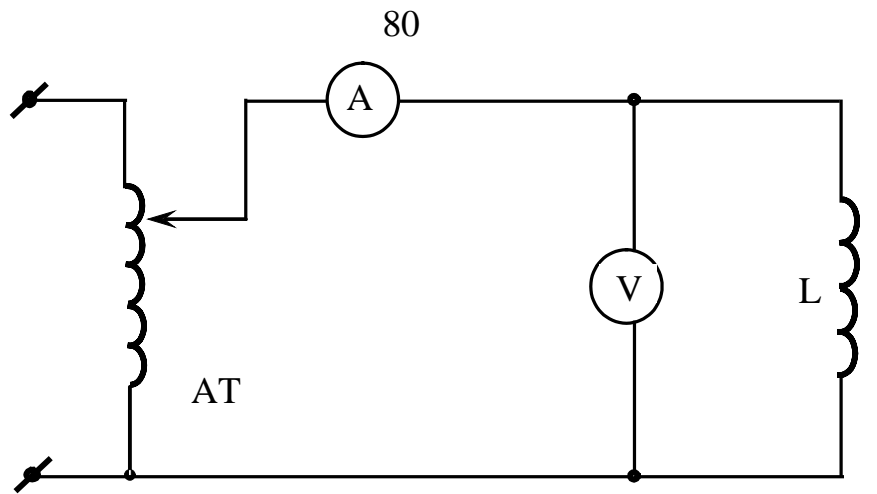


Рисунок 13.2 – Электрическая схема для снятия вольтамперной характеристики катушки со стальным сердечником

Данные опыта свести в таблицу 13.1

Таблица 13.1 – Данные опыта

$I, A$									
$U, B$									

в) Вместо катушки подключить конденсатор емкостью  $C = 30 \text{ мкФ}$  и снять его вольтамперную характеристику (достаточно двух точек).

Построить в масштабе вольтамперные характеристики катушки, конденсатора и всей цепи (путем суммирования двух первых).

## 2. Исследование феррорезонанса токов.

а) Собрать электрическую цепь с параллельным соединением катушки и конденсатора (рис.13.3).

После проверки схемы преподавателем включить стенд и снять вольтамперную характеристику всей цепи. Для этого автотрансформатором изменять подводимое напряжение от 0 до 250В через каждые 20В и записать в таблицу 2 показания амперметра и вольтметра.

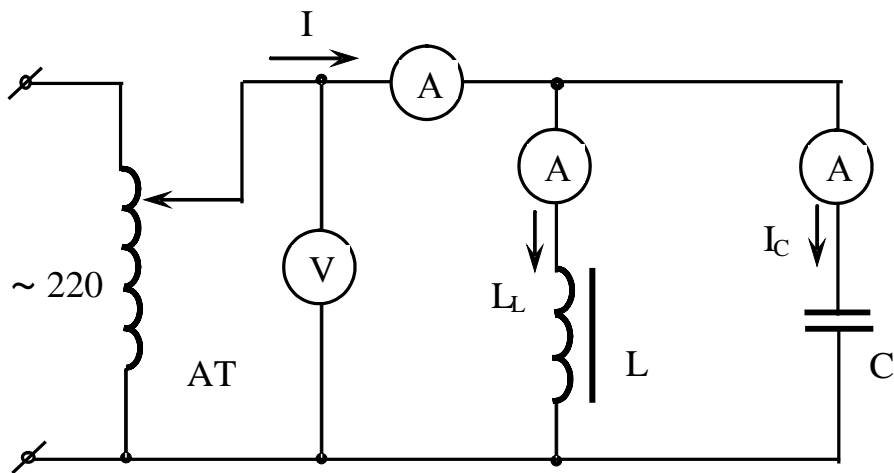


Рисунок 13.3 – Электрическая цепь с параллельным соединением катушки и конденсатора

Данные опыта свести в таблицу 13.2.

Таблица 13.2 – Данные опыта

$I, A$					
$U, B$					

Особо выделить режим феррорезонанса токов.

б) на графике с расчетной вольтамперной характеристикой всей цепи построить вольтамперную характеристику всей цепи, полученную экспериментально.

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

**Контрольные вопросы**

1. Какой вид имеет вольтамперная характеристика катушки со стальным сердечником?
2. Чем объясняется наличие горизонтального участка вольтамперной характеристики?
3. Почему для снятия вольтамперной характеристики конденсатора достаточно двух точек?
4. В чем суть явления феррорезонанса токов?
5. Объясните вольтамперную характеристику всей цепи.
6. Где находит применение явление феррорезонанса?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14 “ФЕРРОРЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ”

**Цель работы:** Изучить влияние изменения приложенного напряжения на индуктивное сопротивление катушки с ферромагнитным сердечником. Ознакомиться с явлением феррорезонанса напряжений.

### Содержание работы

1. Исследование режима работы катушки с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока.
2. Исследование работы электрической цепи с последовательным соединением нелинейной индуктивности и линейной емкости в режиме феррорезонанса напряжений.

### Элементы теории

Индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником, а следовательно, и ее реактивное сопротивление на переменном токе не остается постоянной при изменении приложенного напряжения. Это связано с насыщением сердечника при намагничивании.

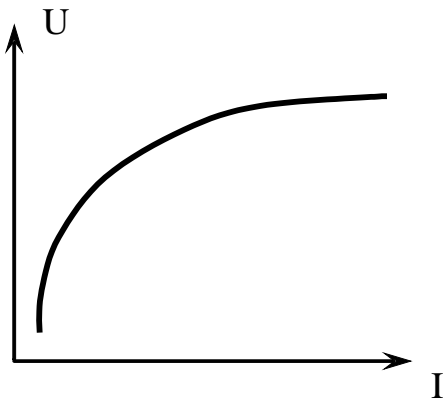


Рисунок 14.1

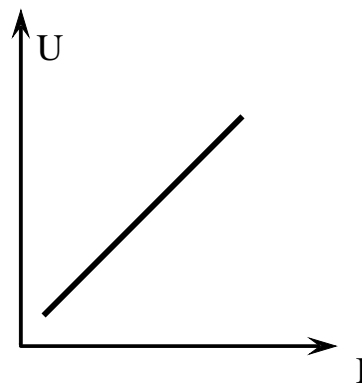


Рисунок 14.2

Вольтамперная характеристика (рис. 14.1) катушки с ферромагнитным сердечником  $U_L=f(I)$  подобна кривой намагничивания стали  $\hat{O} = f(I\varpi)$ .

Конденсатор, включенный в цепь переменного тока, является линейным элементом, и его вольтамперная характеристика представляет собой прямую линию, выходящую из начала координат (рис.14.2).

В цепи с последовательным соединением катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора, напряжение на зажимах катушки  $U_L$  и конденсатора  $U_C$  сдвинуты по фазе на 180 градусов (в идеальном случае, пренебрегая потерями мощности в активном сопротивлении самой катушки). Поэтому результирующее (общее) напряжение, равное геометрической сумме напряжений

$$\bar{U} = \bar{U}_L + \bar{U}_C \quad (14.1)$$

по абсолютной величине равно алгебраической сумме.

$$|U| = |U_L| + |U_C| \quad (14.2)$$

Вольтамперные характеристики  $U_L = f(I)$ ,  $U_C = f(I)$  и  $U = U_L - U_C = f(I)$  представлены на рисунке 14.3.

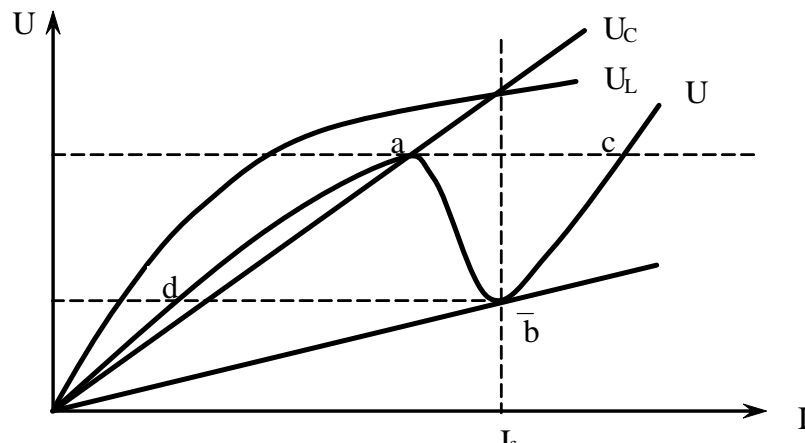


Рисунок 14.3 – Вольтамперные характеристики  $U_L = f(I)$ ,  $U_C = f(I)$  и  $U = U_L - U_C = f(I)$

Если магнитопровод катушки находится в ненасыщенном состоянии, то напряжение на катушке с увеличением тока растет быстрее, чем напряжение на конденсаторе, но с наступлением насыщения величина  $U_L$  начинает расти медленнее, чем  $U_C$ .

В точке  $f$  при значении тока  $I_f$  вольтамперные характеристики катушки и конденсатора пересекаются. При этом значении тока, напряжение на катушке и на конденсаторе взаимно компенсируются. Наступает феррорезонанс напряже-

ний. При дальнейшем увеличении тока можно добиться, чтобы напряжение на конденсаторе  $U_C$  стало больше напряжения на зажимах катушки  $U_L$ .

Практически из-за наличия активных потерь и высших гармоник вольт-амперная характеристика всей цепи  $U = f(I)$  располагается несколько выше, не касаясь при токе  $I_f$  оси токов.

При плавном увеличении приложенного напряжения ток постепенно увеличивается до точки "А". Затем происходит резкое скачкообразное увеличение тока - переход в точку "С". Если теперь уменьшать напряжение, то ток будет плавно уменьшаться до точки "В". Затем снова происходит скачкообразное уменьшение тока - переход в точку "Д". Участок характеристики "АВ" соответствует неустойчивому состоянию цепи. Скачкообразное изменение тока в цепи называют триггерным эффектом.

### Порядок выполнения работы

1. Изучение режима работы катушки с ферромагнитным сердечником в цепи переменного тока.

а) Измерить при помощи омметра активное сопротивление катушки.

б) Собрать электрическую схему для снятия вольтамперной характеристики катушки с сердечником.

После проверки схемы преподавателем включить стенд и, изменяя автотрансформатором подводимое напряжение от 0 до 250В через каждые 20В зафиксировать показания амперметра и вольтметра. Данные опыта занести в таблицу 14.1.

Таблица 14.1 – Вольтамперная характеристика катушки с сердечником

$I, A$				
$U, B$				

в) Вместо катушки подключить конденсатор емкостью  $C = 30 \mu F$  и снять его вольтамперную характеристику (достаточно 2 точек).

г) По известной величине активного сопротивления катушки  $R_k$  рассчитать его вольтамперную характеристику  $U_{Rk} = f(I)$ .

д) Построить в масштабе вольтамперные характеристики:  $U_L = f(I)$ ,  $U_C = f(I)$ ,  $U_{Rk} = f(I)$ .

е) По данным п. "д" рассчитать и построить результирующую вольтамперную характеристику всей цепи  $U = f(I)$ .

2. Изучение работы электрической цепи с последовательным соединением нелинейной индуктивности и линейной емкости в режиме феррорезонанса напряжений.

а) Собрать электрическую цепь с последовательным соединением катушки и конденсатора согласно рисунку 14.4, рисунку 14.5.

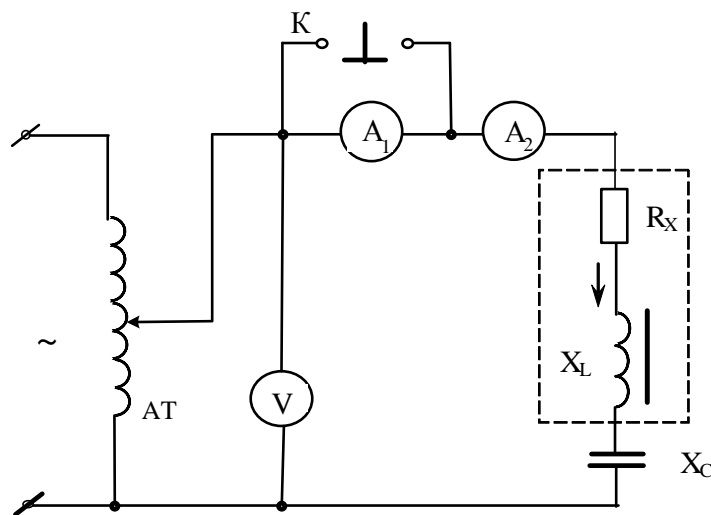


Рисунок 14.4 – Электрическая цепь с последовательным соединением катушки и конденсатора

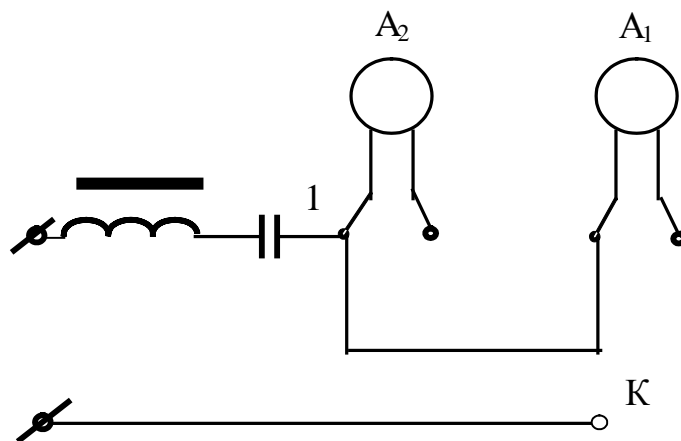


Рисунок 14.5 – Монтажная схема электрической цепи с последовательным соединением катушки и конденсатора

После проверки схемы преподавателем включить стенд и снять устойчивую часть вольтамперной характеристики всей цепи, для чего через каждые 10В записать показания амперметра и вольтметра. Данные опыта занести в таблицу 14.2.

Таблица 14.2 – Вольтамперная характеристика нелинейной индуктивности и линейной емкости в режиме феррорезонанса напряжений

$I, A$				
$U, B$				

**ВНИМАНИЕ!** Ток в цепи измерять амперметром  $A_1$  при нажатой кнопке "К". В момент возникновения феррорезонанса напряжений, т.е. резкого увеличения тока, кнопку "К" мгновенно отпустить и далее измерять ток амперметром  $A_2$ .

Особо выделить режим феррорезонанса напряжений, записав величину напряжения цепи, при котором возник этот режим и величину тока до и после скачка.

б) Уменьшая (от максимума) автотрансформатором подводимое к цепи напряжение, снять падающую часть вольтамперной характеристики "cb", особо выделив режим резкого уменьшения тока (значение тока до и после скачка и величину напряжения, при котором происходит скачок).

Построить на том же графике снятую вольтамперную характеристику, достроив пунктиром неустойчивую ее часть. Сравнить рассчитанную графически и снятую экспериментально характеристики всей цепи. Объяснить их различие.

### Содержание отчета

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работ.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.

6. Диаграммы, графики.

7. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Какой вид имеет вольтамперная характеристика катушки с ферромагнитным сердечником?
2. Чем объясняется наличие горизонтального участка вольтамперной характеристики?
3. Какой вид имеет вольтамперная характеристика линейного конденсатора?
4. Как рассчитать вольтамперную характеристику линейного резистора?
5. В чем суть явления феррорезонанса напряжений?
6. Объясните вольтамперную характеристику всей цепи.
7. Что такое триггерный эффект?
8. Где находит применение явление феррорезонанса?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 15

### “ХАРАКТЕРИСТИКИ ОДНОРОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ”

**Цель работы:** Овладеть методикой опытного определения основных характеристик линии: волнового сопротивления и коэффициента распространения.

#### Содержание работы.

1. Изучение режима холостого хода линии передачи.
2. Изучение режима короткого замыкания линии передачи.

#### Элементы теории

При рассмотрении электромагнитных процессов в высоковольтных линиях электропередачи, а также в высокочастотных линиях связи учитываются не только сопротивление и индуктивность линии, но и токи смещения и утечки, обусловленные емкостью линии и несовершенством изоляции.

Цепи, параметры которых - сопротивление  $R$ , индуктивность  $L$ , емкость  $C$  и проводимость изоляции  $g$  - непрерывно распределены вдоль линии, называют цепями с распределенными параметрами. Если эти величины (отнесенные к единице длины линии  $R_0, L_0, C_0$  и  $g_0$ ) не изменяются вдоль линии, то такую линию называют однородной (рис.15.1).

Связь между напряжениями и токами вначале  $(\dot{U}_1, \dot{I}_1)$  и в конце  $(\dot{U}_2, \dot{I}_2)$  линии устанавливают основные уравнения для однородной линии передачи

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{U}_2 \cdot ch\gamma l + \dot{I}_2 \cdot Z_c \cdot sh\gamma l \\ \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}_2}{Z_c} \cdot sh\gamma l + \dot{I}_2 \cdot ch\gamma l \end{aligned} \right\} \quad (15.1)$$

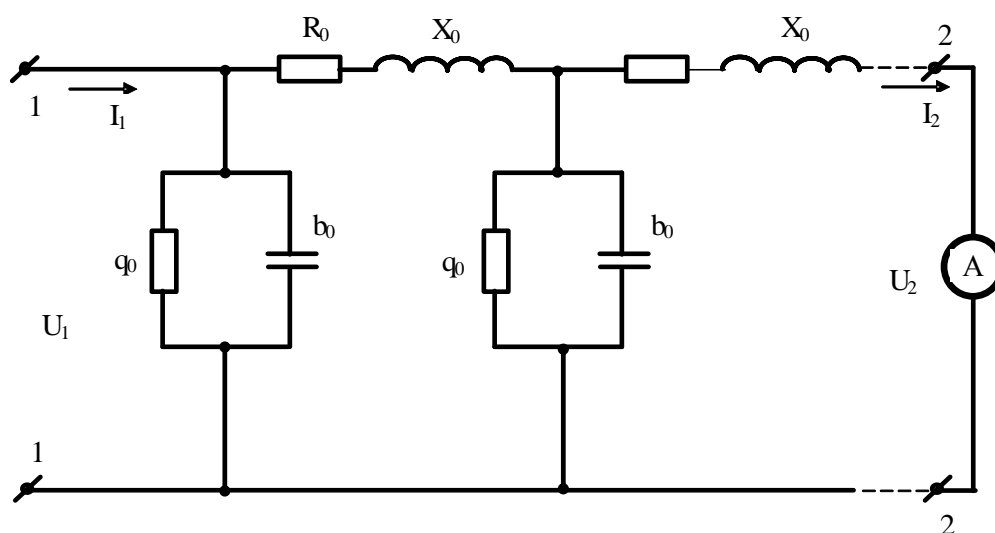


Рисунок 15.1 – Эквивалентная схема линии электропередачи

В это уравнение входят характеристики линии: волновое сопротивление  $Z_C$  и коэффициент распространения  $\gamma$ , а также длина линии  $l$ .

Волновым сопротивлением называется отношение бегущей волны напряжения к бегущей волне тока. Волновое сопротивление определяется параметрами линии и не зависит от ее длины.

$$Z_C = \sqrt{\frac{R_0 + jX_0}{g_0 + jb_0}} = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{g_0 + j\omega C_0}} \quad (15.2)$$

где  $R_0$  и  $X_0$  – продольные активное и индуктивное сопротивления единицы длины линии;  $g_0$  и  $b_0$  – поперечные активная проводимость изоляции и емкостная проводимость единицы длины линии.

Коэффициент распространения характеризует изменение модуля и аргумента комплексной амплитуды, бегущей вдоль линии синусоидальной волны напряжения или тока. Этот комплекс зависит от параметров линии и рассчитывается по формуле:

$$\gamma = \sqrt{(R_0 + jX_0)(g_0 + jb_0)} = \alpha + j\beta, \quad (15.3)$$

где  $\alpha$  - коэффициент затухания;  $\beta$  - коэффициент фазы.

Волновое сопротивление  $Z_C$  и коэффициент распространения можно найти, если провести два опыта, опыт холостого хода и короткого замыкания линии.

При опыте холостого хода  $I_2=0$ , в этом случае система уравнений (15. 1) принимает вид:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{10} &= U_2 ch\gamma l \\ \dot{I}_{10} &= \frac{U_2}{Z_c} sh\gamma l \end{aligned} \right\} \quad (15.4)$$

Входное сопротивление в этом режиме:

$$Z_{10} = \frac{\dot{U}_{10}}{\dot{I}_{10}} = \frac{Z_c}{th\gamma l} \quad (15.5)$$

При опыте короткого замыкания  $U_2=0$ , а входное сопротивление линий:

$$Z_{1k} = \frac{\dot{U}_{1k}}{\dot{I}_{1k}} = Z_c th\gamma l \quad (15.6)$$

Из уравнений (15.5) и (15.6) находим:

$$\begin{aligned} Z_c &= \sqrt{Z_{10} \cdot Z_{1k}} \\ th\gamma l &= \sqrt{\frac{Z_{1k}}{Z_{10}}} e^{j(\phi_{1k}-\phi_{10})/2} = A \cdot e^{j\varphi} \end{aligned} \quad (15.7)$$

По найденному модулю  $A$  и аргументу определяем расчетным путем (см. приложение):

$$\gamma_1 = \alpha_1 + j\beta_1$$

Зная длину линии  $l$ , находим коэффициенты  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\alpha$ .

Параметры линии  $R_0$ ,  $X_0$ ,  $g_0$ ,  $b_0$  определяются из формул (2) и (3).

$$\begin{aligned} \frac{\gamma}{Z_c} &= g_0 + jb_0 \\ \gamma Z_c &= R_0 + jX_0 \end{aligned} \quad (15.8)$$

При решении некоторых практических задач и исследовании длинных линий в лабораторных условиях обычно пользуются однородными цепными схемами, представляющими физическую модель линии.

## Порядок выполнения работы

1. Изучение режима холостого хода линии передачи.

а) Физическую модель линии включить в сеть по схеме, изображенной на рисунке 15.2.

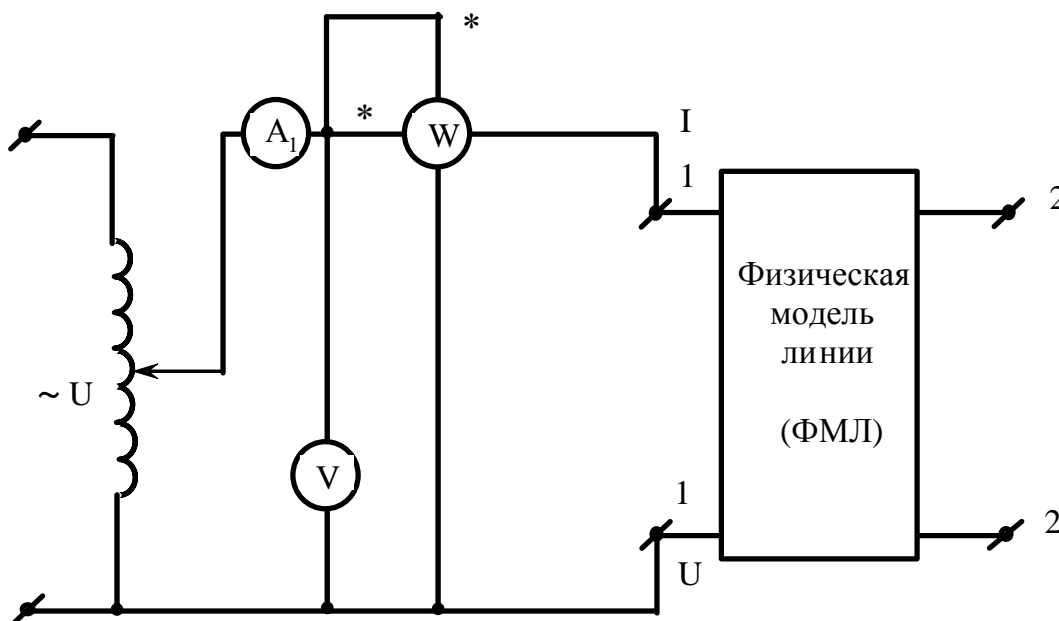


Рисунок 15.2 – Электрическая схема для исследования физической модели линии

После проверки схемы преподавателем включить стенд и подать с выхода автотрансформатора напряжение  $U_{10} = 150\text{В}$ . Записать показания амперметра, вольтметра и ваттметра.

б) Вычислить комплекс входного сопротивления в режиме холостого хода (для вычисления  $\phi_{10}$  использовать показания ваттметра).

$$Z_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}} \cdot e^{j\phi_{10}} \quad (15.9)$$

2. Изучение режима короткого замыкания линии передачи.

а) Замкнуть выходные зажимы схемы на амперметр  $A_2$ . С помощью автотрансформатора подать ток  $I_2 = 2\text{А}$ . Записать показания амперметра  $A_1$ , вольтметра и ваттметра.

б) Вычислить комплекс входного сопротивления в режиме короткого замыкания

$$Z_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}} \cdot e^{j\phi_k} \quad (15.10)$$

в) Рассчитать в соответствии с формулами волновое сопротивление  $Z_c$ , коэффициент распространения  $\gamma$ , коэффициент затухания  $\beta$  и коэффициент фазы  $\alpha$ , приняв длину линии  $l = 10$  км.

г) Найти параметры линии  $R_0, g_0, L_0, C_0$ .

### РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ

1. Выражение (15.7) для  $\text{th } \gamma l$  получают сначала в показательной форме  $A \cdot e^{j\alpha}$ , а затем переводят в алгебраическую форму.

Итак,  $\text{th } \gamma l = a + jb$  - это комплексное число.

2. Составляют выражение  $\frac{1 + (a + jb)}{1 - (a + jb)}$  и вычисляют это комплексное число, записав его в показательной форме.

Итак:

$$\frac{1 + (a + jb)}{1 - (a + jb)} = B \cdot e^{j\theta}$$

3. По величине  $B$  и  $\theta$  из последнего выражения находим:

$$\alpha l = \frac{1}{2} \ln B \quad \text{и} \quad \beta l = \theta \quad (\text{угол } \theta \text{ в градусах необходимо перевести в ради-}$$

аны).

4. Записав выражение  $\gamma l = \alpha l + j\beta l$ , затем, разделив почленно на длину линии  $l = 10$  км, получим значение коэффициентов  $\gamma, \beta, \alpha$ .

### Содержание отчета.

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.

5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Какие цепи называют цепями с распределенными параметрами?
2. Чем обусловлены параметры  $R_0$ ,  $L_0$ ,  $C_0$  и  $g_0$  линии с распределенными параметрами?
3. Что такое коэффициент распространения, коэффициент затухания и коэффициент фазы?
4. Из каких режимов и как определяют основные параметры линии передачи?

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 16

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ПРОВОДЯЩИХ ЛИСТАХ

**Цель работы:** Получить опытным путём картину равного электрического потенциала, построить на ней линии тока плоскопараллельного поля и рассчитать сопротивление между точками подвода и отвода тока.

#### Программа работы

1. Исследование картины поля в однородном листе.
2. Исследование картины поля в неоднородном листе.

#### Элементы теории

Любое электростатическое поле характеризуется основными величинами: напряженность поля  $E$  и потенциал  $\varphi$ . Напряженность электростатического поля – величина векторная, определяемая в каждой точке величиной и направлением. Потенциал является величиной скалярной, значение потенциала определяется в каждой точке поля некоторым числом.

Электростатическое поле определено, если известен закон изменения напряженности поля или потенциала во всех его точках. Электростатическое поле можно охарактеризовать совокупностью силовых и эквипотенциальных линий. Силовая линия – это мысленно проведенная в поле линия, начинающаяся на положительно заряженном теле и оканчивающаяся на отрицательно заряженном теле. Касательная к ней в любой точке совпадает по направлению с вектором напряженности. Эквипотенциальная поверхность – совокупность точек поля, имеющих одинаковый потенциал. Проекция эквипотенциальной поверхности на секущую плоскость дает эквипотенциальную линию.

Эквипотенциальные и силовые линии пересекаются под прямым углом.

Силовые линии всегда разомкнуты, эквипотенциальные всегда замкнуты.

Напряженность и потенциал электростатического поля связаны выражением:

$$\bar{E} = -grad\varphi \quad (16.1)$$

т.е напряженность в какой-либо точке поля равна скорости изменения потенциала в этой точке, взятой с обратным знаком.

В электростатике часто встречаются задачи, когда по известным значениям потенциалов (или полных зарядов) и геометрии тел, создающих поле, требуется найти закон изменения напряженности поля или потенциала во всех точках поля. В простых случаях задачи на аналитический расчет решают путем использования теоремы Гаусса в интегральной форме. В более сложных случаях используют уравнение Лапласа, либо интегрируя его непосредственно без вспомогательных приемов, либо используя метод зеркальных изображений (в случае неоднородной среды).

Уравнения Пуассона и Лапласа являются основными дифференциальными уравнениями электростатики. Они вытекают из теоремы Гаусса в дифференциальной форме.

$$\nabla^2\varphi = -\rho_{св} / \varepsilon_a \quad (16.2)$$

Уравнение называют уравнением Пуассона:  $\nabla^2 = div grad$  – оператор Лапласа или лапласиан;  $\varphi$  – потенциал в точке;  $\rho_{св}$  – объемная плотность свободного заряда;  $\varepsilon_a$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вещества.

Свободными называются заряды, которые под воздействием сил поля могут свободно перемещаться в веществе, их перемещение не ограничивается внутримолекулярными силами.

Частный вид уравнения Пуассона, когда  $\rho_{св} = 0$ , называют уравнением Лапласа и записывают так:

$$\nabla^2\varphi = 0 \quad (16.3)$$

Уравнения Пуассона и Лапласа являются уравнениями в частных производных, которые в отличие от обыкновенных дифференциальных уравнений имеют в общем случае множество линейно независимых друг от друга реше-

ний. Выбор единственного, удовлетворяющего конкретной задаче, производят с помощью граничных условий.

Если есть некоторая функция, удовлетворяющая уравнению Лапласа – Пуассона и граничным условиям в данном поле, то эта функция и представляет собой единственное решение конкретной задачи, которое ищут.

Нахождение решения для сложной системы заряженных тел может представлять неразрешимую задачу при аналитическом расчете. В этих случаях пользуются числовыми методами. Например, числовым методом интегрирования дифференциальных уравнений в частных производных путем сведения их к уравнениям в конечных разностях.

Для нахождения решения необходимо знать значения величин, закон распределения которых отыскивается в ходе решения задачи, на границах рассчитываемых областей. Различают задачу Неймана, когда известны значения производной от потенциала по нормали к каждой граничной поверхности во всех точках, и задачу Дирихле, когда известны значения потенциалов граничных поверхностей. Возможны комбинированные типы задач, когда для одной части граничных поверхностей известны значения потенциалов, а для другой – значения нормальной производной от потенциала.

Если среда неоднородна, то ее делят на однородные области и решение уравнения Лапласа ищется для каждой области отдельно.

Таким образом, электростатическое поле в области, где нет свободных зарядов, а также постоянное магнитное поле в области, где нет токов, описывается такими же уравнениями, как и поле постоянного тока в проводящей среде вне источников энергии, в частности, уравнением Лапласа (16.3).

Поскольку уравнение Лапласа имеет единственное решение при заданных граничных условиях, то при подобных граничных условиях в диэлектрике и в проводящей среде распределение потенциала будет одинаковым в обеих средах. Это подобие позволяет моделировать как электростатические, так и магнитные поля полем электрического тока в проводящей среде. Соблюдение по-

добных граничных условий сводится к геометрическому подобию областей, в которых исследуется поле.

Плоский проводящий лист позволяет моделировать распределение электрического потенциала или магнитных силовых линий в сечении плоскопараллельного поля, перпендикулярном длинным заряженным проводникам или проводникам с током. Эквипотенциальные линии в проводящем листе соответствуют эквипотенциальным линиям в электростатическом поле между заряженными проводниками. При моделировании магнитного поля эквипотенциальные линии в проводящем листе соответствуют магнитным силовым линиям при протекании тока в проводниках.

Собранная установка для моделирования с однородным проводящим листом показана на рисунке 16.1. Неоднородное поле моделируется при помощи проводящего листа, имеющего впаянную вставку.

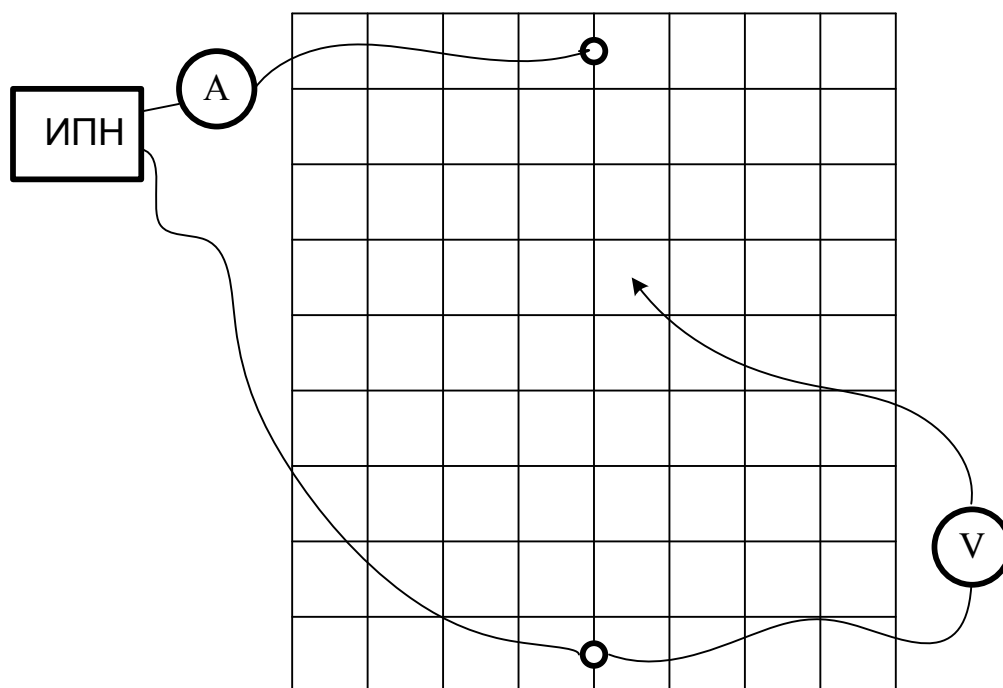


Рисунок 16.1 – Установка для моделирования с однородным проводящим листом

Электрическое поле в проводящих листах создаётся электрическим током, растекающимся по листу между точками подвода и отвода тока.

Так как толщина листа незначительна и одинакова для всего листа, то уже на малом расстоянии от места подвода и отвода тока можно считать, что линии тока по всей толщине листа параллельны поверхности листа. Следовательно, поле можно считать плоскопараллельным.

На листах экспериментальным путём, а в некоторых случаях и по результатам расчёта, можно построить линии равного потенциала и линии тока. Последние совпадают с линиями напряжённости электрического поля, поскольку векторы плотности тока ( $\vec{\delta}$ ) и напряжённости электрического поля ( $\vec{E}$ ) пропорциональны:  $\vec{\delta} = \gamma \vec{E}$ ,  $\gamma$  [1/(Ом. м)] – удельная проводимость среды.

Совокупность линий равного потенциала (эквипотенциалей) и линий напряжённости поля (силовых линий) образует картину поля, ячейка картины поля показана на рисунке 16.2.

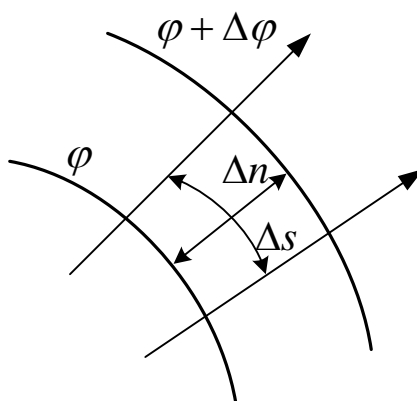


Рисунок 16.2 – Ячейка картины поля

При построении картины плоскопараллельного поля придерживаются следующих правил.

1. Разность потенциалов соседних линий равного потенциала должна быть одинаковой,  $\Delta\varphi = const$ .
2. Линии напряжённости поля проводятся перпендикулярно эквипотенциалам.
3. Отношение средней длины к средней ширине ячейки поля сохраняют одинаковым. Обычно принимают равными,  $\Delta s = \Delta n$ .

Если картина поля построена с соблюдением этих правил, то в трубках потока вектора напряженности поля (в трубках тока), ограниченных соседними силовыми линиями, будет одинаковый поток вектора напряжённости (ток).

В этом случае по картине поля можно определить среднюю напряжённость поля в пределах ячейки поля.

$$E_{cp} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta n}, \quad (16.4)$$

среднюю плотность тока и сопротивление листа между точками подвода и отвода тока

$$\delta_{cp} = \gamma E_{cp} \quad (16.5)$$

Поскольку длина ячейки равна ширине, то сопротивление ячейки не зависит от её размеров

$$r_n = \frac{l}{\gamma S} = \frac{\Delta n}{\gamma \Delta s d} = \frac{1}{\gamma d} \quad (16.6)$$

где  $d$  – толщина листа.

Сопротивление листа между точками подвода и отвода тока можно выразить через сопротивление ячейки

$$r = r_n \frac{N}{M}, \quad (16.7)$$

подсчитав число  $N$  последовательных ячеек между крайними линиями равного потенциала в одной трубке тока и число  $M$  параллельных трубок в листе ( $M$  может быть и не целым числом).

Сопротивление листа можно определить по закону Ома, измерив ток  $I$  и напряжение  $U$  между точками подвода и отвода тока (рис. 16.1):

$$r = \frac{U}{I}. \quad (16.8)$$

Из формул (16.6–16.8) при заданной толщине листа  $d$  нетрудно определить удельную проводимость  $\gamma$  материала листов.

Схема электрической цепи приведена на рисунке 16.1. Для питания цепи используется источник постоянного напряжения, смонтированный внутри стенда. Включение источника осуществляется тумблером  $T_1$ . Для измерения потенциалов и подводимого тока к листу используются вольтметр со щупом и амперметр. Выбор листа осуществляется переключателем  $T_2$  и светодиодными индикаторами.

### Порядок выполнения работы

1. Включить источник постоянного напряжения тумблером  $T_1$ . О включении сигнализирует лампа, расположенная на стенде. Подключить к источнику постоянного напряжения однородный лист (переключателем  $T_2$ ).

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

3. Убедиться, что один из электродов имеет потенциал, равный нулю, а другой – потенциал, равный напряжению источника питания.

4. Измерить при помощи амперметра величину тока  $I$ . Выбрать шаг изменения потенциала  $\Delta\varphi$  так, чтобы на картине поля получилось 5 эквипотенциальных линий. Величины  $U, I, \Delta\varphi$  записать в отчет.

5. Перемещая зонд от точки нулевого потенциала по оси симметрии к другому электроду, найти точки с потенциалами  $\Delta\varphi, 2\Delta\varphi, 3\Delta\varphi$  и т.д.

4. Найденные точки отметить на подготовленном рисунке с координатной сеткой.

6. Перемещая зонд из точки с потенциалом  $\varphi_i$  вокруг электрода (слегка приближаясь или удаляясь от него), найти точки равного потенциала и отметить их на рисунке. Точки равного потенциала соединить плавной кривой. Аналогично построить другие эквипотенциальные линии.

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

7. Пользуясь известными правилами графического построения картины поля, построить силовые линии напряжённости поля.

8. Определить сопротивление  $r$  между точками подвода и отвода тока по закону Ома и при толщине листа  $d = 0,02 \text{ мм} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ м}$  по формуле п.3, рассчитать удельную проводимость материала листа  $\gamma$ . Величины и записать в отчет.

9. Определить среднюю напряжённость электрического поля по формуле (16.4) в одной из ячеек картины поля и среднюю плотность тока (16.5). Покажите направление вектора напряженности в этой точке на рисунке. Найденные значения записать в отчет.

10. Проанализировать полученные результаты и сформулировать общие выводы по работе.

### **Содержание отчета**

1. Фамилия, имя, отчество студента, номер группы, дата выполнения работы.
2. Наименование и цель работы.
3. Программа работы.
4. Принципиальные схемы исследуемых цепей.
5. Таблицы измерений и вычислений, примеры расчетов.
6. Диаграммы, графики.
7. Выводы.

### **Контрольные вопросы**

1. Написать уравнение линии равного потенциала.
2. Написать уравнение линии напряжённости электрического поля.
3. На основании формул (6–8) при заданной толщине листа  $d$  записать соотношение для расчета удельной проводимости  $\gamma$  материала листов

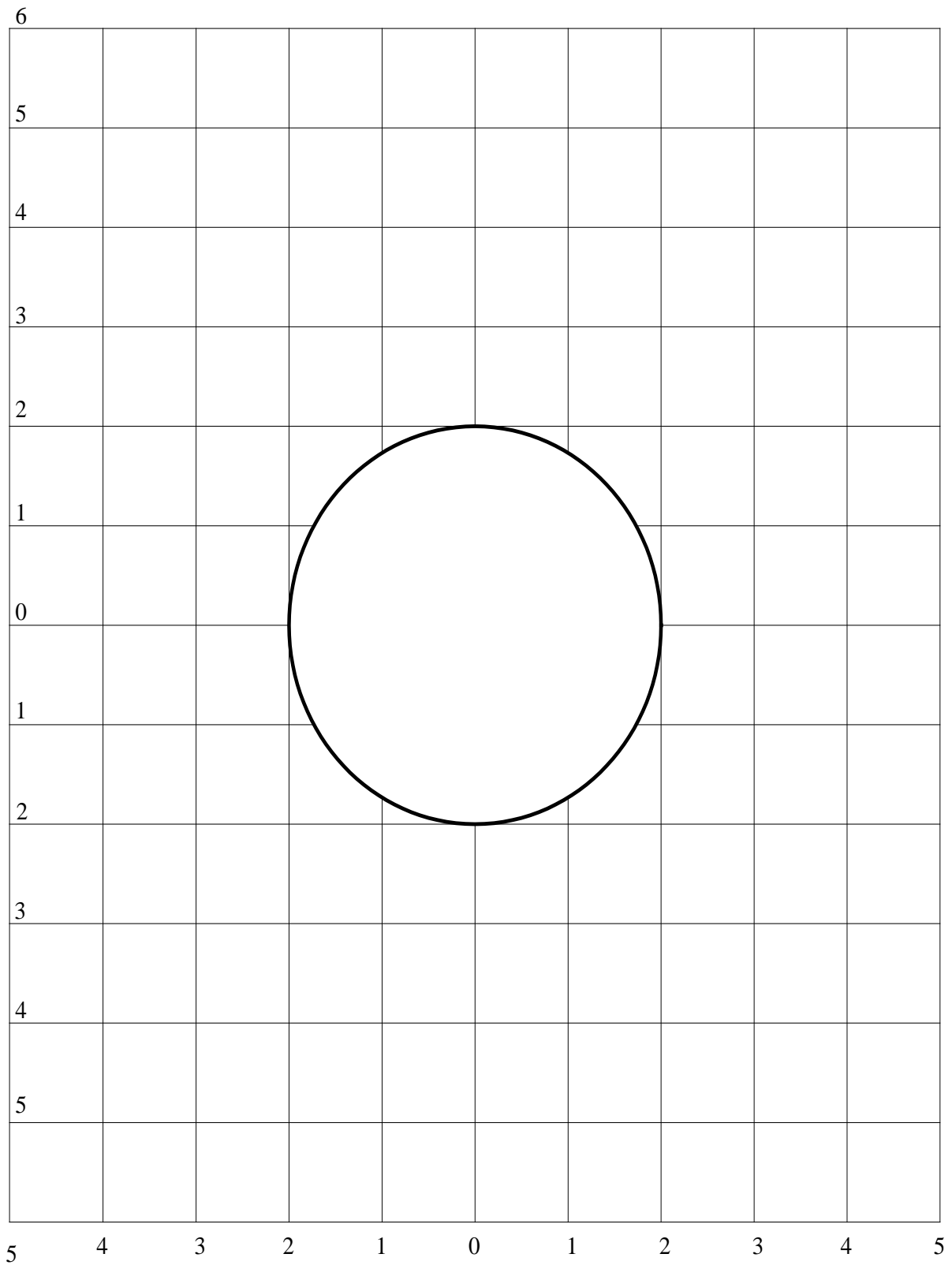


Рисунок 16.3 – Планшет для исследования неоднородного листа

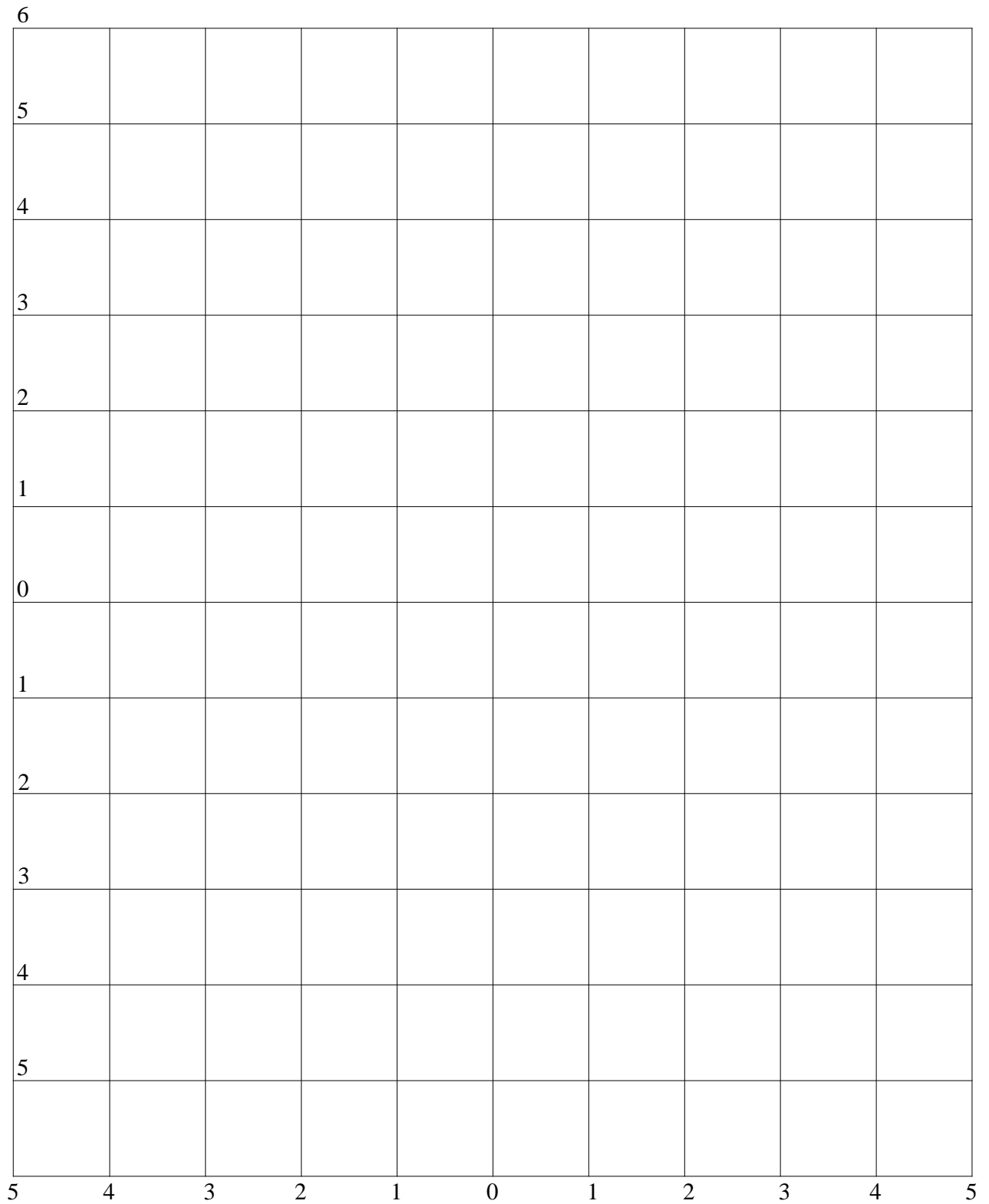


Рисунок 16.4 – Планшет для исследования однородного листа

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : [учебник] / Л. А. Бессонов. - 10-е изд. - М. : Гардарики, 2002. - 638 с. : ил. - ISBN 5-8297-0026-3
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник / Л. А. Бессонов. - Изд. 10-е. - М. : ГАРДАРИКИ, 2003. - 317 с. : ил. - ISBN 5-8297-0158-8
3. Евдокимов, Ф. Е. Теоретические основы электротехники: Учебник. Рек. МО РФ. - 9-е изд., стереотип. - М.:Изд. центр Академия, 2004. - 560с. - (Среднее профессиональное образование). - с556
4. Прянишников, В. А. Электротехника и ТОЭ в примерах и задачах : практ. пособие / В. А. Прянишников, Е. А. Петров, Ю. М. Осипов ; под ред. В. А. Прянишникова. - СПб. : Корона-Век, 2008. - 336 с. : ил. - Прил.: с. 323-332. - Библиогр.: с. 333-334. - ISBN 97
5. Сборник задач по теоретическим основам электротехники : учеб. пособие / [Л. А. Бессонов, И. Г. Демидова, М. Е. Заруди и др.] ; под ред. Л. А. Бессонова. - Изд. 4-е, перераб. - М. : Высшая школа, 2000. - 528 с. - Библиогр.: с. 523. - ISBN 5-06-003795-9
6. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники : учебник для вузов : в 2 т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян, Т. 1. - 3-е изд., перераб. и доп. - Л. : Энергоиздат, 1981. - 536 с. : ил. - (Для студентов вузов). - Предм. указ.: с. 523-527
7. Шебес, М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей.: Учеб. пособие. Доп. Госуд. Ком. СССР по народн. образ./ М.В. Каблукова. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1990. - 544с.: ил. - с540
8. Электротехника и электроника : учеб. пособие / В.В. Кононенко, В.И. Мишкович, В.В. Муханов и др. ; под ред. В.В. Кононенко. - 5-е изд. - Ростов-на-Дону : Феникс, 2008. - 778 с. : ил. - (Высшее образование). - Библиогр.: с. 764-766. - ISBN 978-5-222-1283

9. Электротехника : в 3-х кн. : учеб. пособие / под ред. П. А. Бутырина, Р. Х. Гафиятуллина, А. Л. Шестакова ; Мин-во образов. и науки РФ, Южно-Уральский гос. ун-т, Мос. энергет. ин-т (тех. ун-т), Кн. 1, Теория электрических и магнитных цепей.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 1. ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ В ЛАБОРАТОРИИ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ ОСНОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ**

1. До выполнения лабораторных работ каждый студент должен изучить правила техники безопасности.

2. Лабораторные работы выполняются бригадами из 2—3 студентов.

3. Состав бригад, названия лабораторных работ сообщаются студентам на первом лабораторном занятии.

4. Для проведения каждой работы студент обязан дома:

а) подготовить теоретический материал;

б) подготовить протокол – отчет по лабораторной работе с вычерченными схемами, таблицами для записи показаний приборов и результатов вычислений;

в) ответить на контрольные вопросы. Если на некоторые вопросы не будет найден ответ до проведения работы, его нужно получить самостоятельно или при помощи преподавателя в лаборатории.

Без предварительной домашней подготовки студенты к проведению лабораторной работы не допускаются.

5. Перед сборкой электрической цепи нужно ознакомиться с приборами, аппаратами, и макетами, записать их краткие характеристики и убедиться в соответствии их рабочих напряжений напряжению сети.

6. Перед выполнением лабораторной работы необходимо распределить обязанности между членами бригады.

При выполнении работы запрещается вносить в нее какие-либо изменения без разрешения преподавателя.

7. Сборку схемы следует начинать с главных силовых цепей, а подключение их к клеммам питания лабораторного щита производить только после разрешения преподавателя или лаборанта. Для силовых цепей нужно применять провода большего сечения, чем для цепей управления.

8. После проверки собранной цепи всеми членами бригады и преподавателем ее необходимо подключить к питанию лабораторного стенда, после чего

стенд может быть включен.

9. Показания приборов следует записывать четко и аккуратно, предварительно вычислив цену деления измерительного прибора.

10. Если электрическая цепь подключена к стенду, отходить от лабораторного стола запрещается.

11. По окончании работы рекомендуется выключить пусковой аппарат на лабораторном щите, но цепь не разбирать до проверки преподавателем полученных результатов.

12. Прежде чем начать следующую лабораторную работу, нужно предъявить отчет о предыдущей. В отчете, кроме записей, произведенных дома при подготовке к работе, должны быть вычерчены графики в масштабе и сделаны краткие выводы. Если не предъявлен отчет о проделанной работе, студент не допускается к выполнению следующей работы.

13. Студенты защищают лабораторные работы по графику, составленному преподавателем. При защите могут быть использованы специальные программы – тесты, либо преподаватель принимает защиту устно.

## **ПРИЛОЖЕНИЕ 2. ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СБОРКЕ СХЕМЫ И ВЫПОЛНЕНИИ РАБОТ**

1. Перед сборкой схемы нужно убедиться в том, что лабораторный стенд отключен от питающей сети. Подсоединение схемы к клеммам питания лабораторного стенда производить только после проверки ее преподавателем.

2. После включения лабораторного стенда нельзя производить какие-либо изменения в схеме, а также прикасаться к клеммам на стенде.

3. Лабораторные столы не должны загромождаться посторонними предметами. Проходы должны быть свободны от стульев и других предметов.

4. Во время сборки схемы нужно прокладывать провода так, чтобы было меньше пересечений. Нельзя допускать свертывания проводов и подсоединения их в натянутом состоянии. Неиспользованные, а также поврежденные соединительные провода следует убирать с лабораторного стола.

5. Собранные схемы подключаются к питанию лабораторного стенда только после разрешения преподавателя и предупреждения об этом всех членов бригады, совместно выполняющих эту работу.

6. После окончания испытания или перерыва в работе схему отключают от сети.

7. Во время выполнения работы запрещается:

- а) производить пересоединения в схеме, находящейся под напряжением;
- б) прикасаться к оголенным токоведущим частям.

8. При неисправностях в аппаратах, приборах и проводах нужно отключить схему и известить об этом преподавателя.