

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Физические методы контроля»

# ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

*Методические рекомендации к лабораторным работам  
для студентов направления подготовки  
12.03.04 «Биотехнические системы и технологии»  
дневной формы обучения*



Могилев 2018

УДК 621.3  
ББК 31.2  
О 27

Рекомендовано к изданию  
учебно-методическим отделом  
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Физические методы контроля» «5» октября 2018 г.,  
протокол № 3

Составители: канд. техн. наук, доц. А. Г. Старовойтов;  
ст. преподаватель В. В. Писарик;  
ст. преподаватель И. А. Черкасова

Рецензент канд. техн. наук, доц. М. Н. Миронова

В методических рекомендациях содержатся основные теоретические сведения, необходимые для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Общая электротехника» студентами направления подготовки 12.03.04 «Биотехнические системы и технологии», а также порядок их выполнения, требования к отчетности, вопросы для самоконтроля.

Учебно-методическое издание

**ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА**

Ответственный за выпуск

С. С. Сергеев

Технический редактор

А. А. Подошевка

Компьютерная верстка

Н. П. Полевничая

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

Издатель и полиграфическое исполнение:

Государственное учреждение высшего профессионального образования  
«Белорусско-Российский университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя,  
изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/156 от 24.01.2014.

Пр. Мира, 43, 212000, Могилев.

© ГУ ВПО «Белорусско-Российский  
университет», 2018



## Содержание

1 Краткая характеристика целей и задач лабораторных исследований, ознакомление с оборудованием лаборатории, правилами техники безопасности, рациональными приемами работы и отчетности.....	4
2 Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с одним источником питания .....	5
3 Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с двумя источниками питания .....	10
4 Определение параметров и исследование режимов работы электрической цепи переменного тока с последовательным соединением катушки индуктивности, конденсатора и резистора.....	13
5 Исследование режимов работы линии электропередачи переменного тока при изменении коэффициента мощности нагрузки.....	18
6 Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей звездой.....	21
7 Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей в треугольник.....	26
8 Определение параметров схемы замещения и КПД однофазного трансформатора.....	27
Список литературы.....	34



# 1 Краткая характеристика целей и задач лабораторных исследований, ознакомление с оборудованием лаборатории, правилами техники безопасности, рациональными приемами работы и отчетности

**Цель работы:** изучение комплекта лабораторного оборудования и режимов его работы; изучение вопросов безопасного использования электрооборудования и соблюдения правил охраны труда в лаборатории.

## 1.1 Техника безопасности при работе в лаборатории

Работа в лаборатории электротехники, связанная с эксплуатацией электрооборудования, находящегося под напряжением, требует организации и строгого соблюдения мер безопасности. Вопросы безопасности отражаются в инструкциях по эксплуатации, которыми снабжено поставляемое оборудование. Характерным видом поражения, которым может подвергаться работник, является поражение электрическим током. Во избежание возможности поражения электрическим током при работе с электрооборудованием необходимо соблюдать следующие меры безопасности.

1 К выполнению лабораторной работы допускаются студенты, прошедшие обучение мерам безопасности с последующей проверкой знаний и зарегистрированные в соответствующем протоколе.

2 Студенту разрешается выполнение только той лабораторной работы, задание к которой выдал преподаватель.

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

4 Сборка электрической схемы лабораторной работы, изменение в схеме производятся при отключенном напряжении питания лабораторного стенда и переведении всех выключателей в положение «отключено».

5 Переносное оборудование, необходимое для выполнения лабораторной работы (осциллографы, компьютеры, электроизмерительные приборы) обязательно заземляются согласно требованиям завода-изготовителя, что проверяется преподавателем в обязательном порядке.

6 Включение питания оборудования для выполнения лабораторной работы производится только после разрешения преподавателя.

7 Включение измерительных приборов в цепь следует производить только одной рукой, не касаясь металлических частей.

8 При выполнении лабораторных работ в лаборатории запрещается:

- без разрешения преподавателя перемещать приборы и аппаратуру, выносить их из лаборатории;

- производить какие-либо работы по устранению неисправностей лабораторного оборудования;

- оставлять без присмотра электроприборы, включенные в сеть;



– загромождать посторонними предметами рабочие места, находиться в лаборатории в верхней одежде.

9 При возникновении любой неисправности лабораторного оборудования студент обязан немедленно отключить его от электросети и сообщить об этом преподавателю.

## **1.2 Порядок проведения лабораторных занятий**

Каждое лабораторное занятие должно включать в себя следующие этапы.

1 Подготовка к работе (проводится студентом до начала лабораторного занятия).

1.1 Изучение теоретических сведений и примеров решения задач по теме занятия.

1.2 Подготовка необходимых материалов (заготовки отчета, таблиц, графиков и т. д.)

2 Допуск к лабораторной работе.

Проводится преподавателем после личной беседы с каждым студентом. Если в результате опроса выяснится неподготовленность студента по теме, он не допускается к работе и направляется на доработку материала. До окончания занятий студент должен находиться в лаборатории.

3 Выполнение лабораторной работы.

После допуска студенты приступают к выполнению лабораторной работы в соответствии с методическими рекомендациями. При выполнении работы следует обязательно соблюдать правила техники безопасности, с которыми должен ознакомиться каждый студент.

По окончании работы студент должен сообщить об этом преподавателю, после чего приступить к составлению отчета.

4 Оформление отчета и защита.

Отчет оформляется студентом индивидуально. Он должен содержать цель работы, задание, чертежи использованных и отработанных схем, расчетные формулы и результаты измерений, анализ результатов и полученных экспериментально зависимостей.

## **2 Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с одним источником питания**

**Цель работы:** закрепление навыков расчета и моделирования работы линейных электрических цепей с одним источником питания; исследование мостовой цепи постоянного тока.

### **2.1 Основные теоретические сведения**

Мост постоянного тока – это сложная электрическая цепь, в которой четыре резистора  $R_{20}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{23}$ ,  $R_1$ , называемых плечами, образуют замкнутый че-

тырехугольник, в одну диагональ которого включается нагрузка  $R_{24}$ , а в другую – источник постоянного тока (рисунок 2.1).

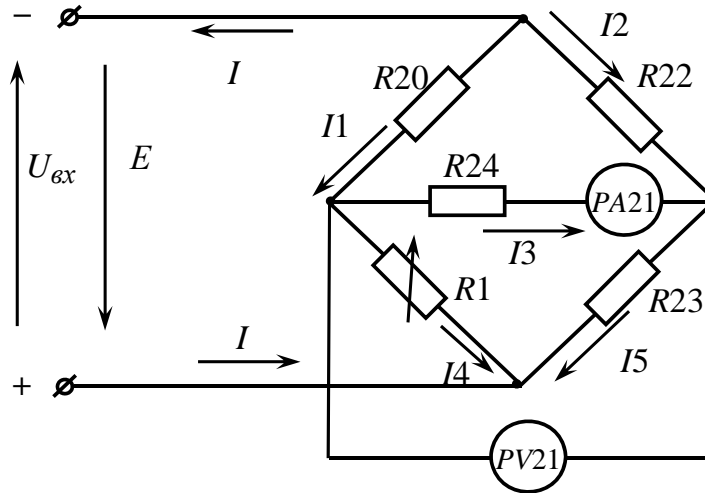


Рисунок 2.1 – Мост постоянного тока

Мостовая схема – это два делителя напряжения  $R_{20}$ ,  $R_1$  и  $R_{22}$ ,  $R_{23}$ , параллельно подключенные к источнику питания. Выходной сигнал снимается между двумя выходами делителей напряжения.

Основное нейтральное состояние в мостовой схеме называется *равновесием моста*. Уравновешенный мост – это такой мост, выходное напряжение которого равно нулю. Такое состояние имеет место в том случае, когда выходное напряжение одного делителя напряжения равно выходному напряжению другого делителя напряжения относительно минуса источника питания. Если ввести в мостовую схему резистивный элемент  $R_1$  с варьируемым сопротивлением, можно легко привести мост к такому уравновешенному состоянию.

Мосты постоянного тока широко применяют для измерения электрических и неэлектрических величин, т. к. вместо резистора  $R_1$  может использоваться элемент, изменяющий сопротивление под действием температуры (терморезистор), деформаций (тензорезистор), освещённости (фоторезистор).

Преимущества мостовых схем в большей, чем присуща потенциометрическим измерительным схемам, точности и меньшей чувствительности к шумам и дрейфу параметров источника питания.

Условие равновесия моста постоянного тока – равенство произведений сопротивлений противоположных плеч, определяемое из соотношения

$$R_1 \cdot R_{22} = R_{20} \cdot R_{23}.$$

Откуда

$$R_1 = \frac{R_{20} \cdot R_{23}}{R_{22}}$$

при значении тока  $I_3 = 0$ .

Величина сопротивления резистора  $R_{24}$  (нагрузки) определяется по закону Ома:

$$R_{24} = \frac{U_{PV21}}{I_3}.$$

Рассчитать значение выходного напряжения  $U_{вых}$  моста постоянного тока можно, используя метод эквивалентного генератора (рисунок 2.2):

$$U_{вых} = I_3 \cdot R_{24},$$

где  $I_3 = \frac{U_{xx}}{R_{24} + R_{кз}}$ ;

$U_{xx}$  – напряжение холостого хода при разомкнутом резисторе  $R_{24}$  (SA13 в положении «3», рисунок 2.3);

$R_{кз}$  – сопротивление относительно точек разрыва моста при замкнутым источнике входного напряжения.

Сопротивление  $R_{кз}$  можно определить экспериментально.

$$R_{кз} = \frac{U_{xx}}{I_{кз}}.$$

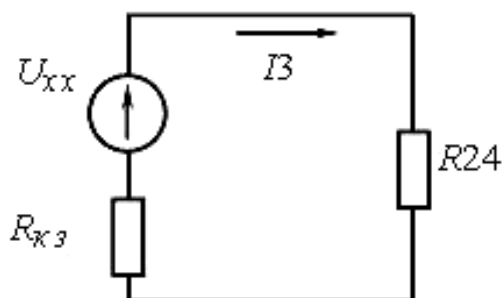


Рисунок 2.2 – Эквивалентная схема электрической цепи постоянного тока для расчёта тока  $I_3$

## 2.2 Исследуемые схемы

Для выполнения лабораторной работы собирается исследуемая мостовая схема (см. рисунок 2.3).

*При выполнении данной и всех последующих работ все выключатели, не используемые в работе, должны быть выключены.*

Измерительный мост включается тумблером SA7.

Технические данные измерительного моста:  $R_{20} = 4,7 \text{ кОм}$ ;  $R_{22} = 10,0 \text{ кОм}$ ;  $R_{23} = 4,7 \text{ кОм}$ .

Для исследования моста постоянного тока в среде Multisim устанавливаются в диалоговых окнах компонентов их параметры (рисунок 2.4). Источник напряжения  $E$  считается идеальным ( $R_{вн} = 0$ ). Вольтметр PV21: род тока (mode) – постоянный (DC), внутреннее сопротивление (Resistance)  $R_V = 1 \text{ Мом}$ ;

амперметр PA21: род тока (mode) – постоянный (DC), внутреннее сопротивление (Resistance)  $R_A = 1 \text{ нОм}$ .

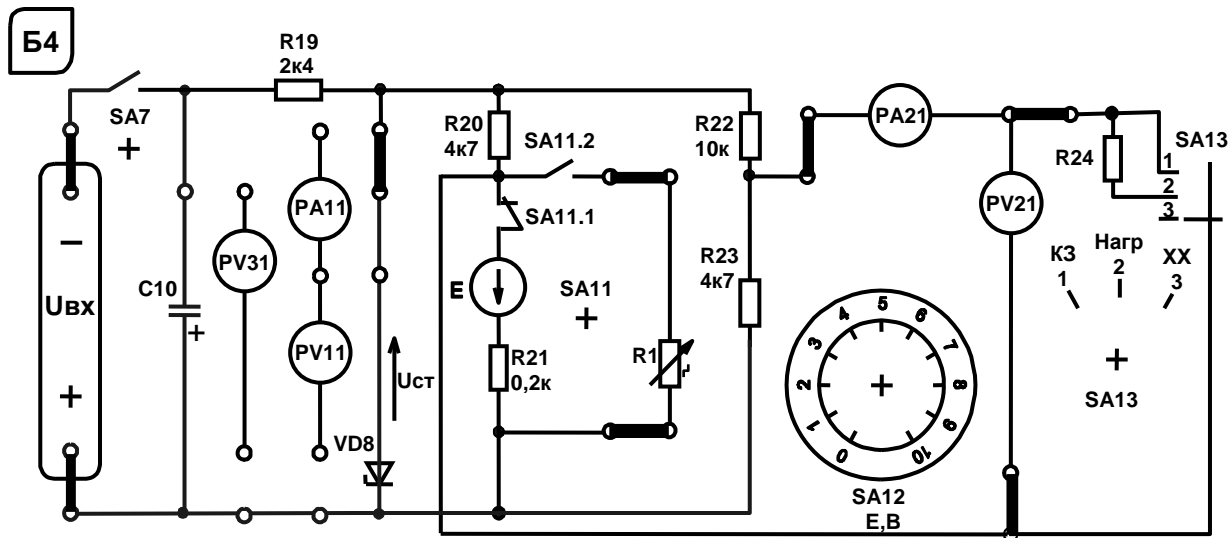


Рисунок 2.3 – Схема для экспериментального исследования электрической цепи постоянного тока с одним источником питания

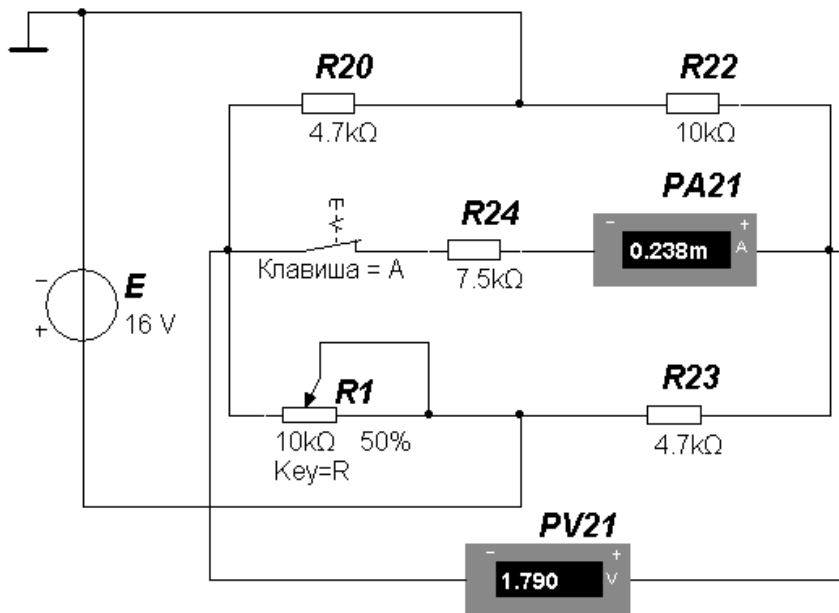


Рисунок 2.4 – Модель моста постоянного тока

### 2.3 Порядок выполнения лабораторной работы

2.3.1 Изучить схему измерительного моста. Рассчитать величину сопротивления резистора  $R_1$  из условия равновесия моста постоянного тока.

2.3.2 Построить зависимости  $U_{\text{вых}} = f(R_1)$  экспериментально и по результатам моделирования (на одном графике), заполнив таблицу 2.1. Сравнить полученные результаты.



Таблица 2.1 – Результаты измерений выходного напряжения

$R1$ , кОм	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Эксперимент											
$U_{вых}$ , В											
Моделирование											
$U_{вых}$ , В											

2.3.3 При максимальном рассогласовании моста (максимальном  $U_{вых}$ ) с помощью показаний вольтметра и амперметра рассчитать величину сопротивления резистора  $R_{24}$ .

2.3.4 Методом эквивалентного генератора рассчитать величину выходного напряжения моста при значении сопротивления  $R1$ , заданном преподавателем, и сопоставить с экспериментальными данными и результатом моделирования.

2.3.4.1 Определить  $U_{xx}$  в результате моделирования, разомкнув ключ (клавиша «А», см. рисунок 2.4), и сравнить с результатом экспериментального измерения при заданных значениях  $R1$  и  $U_{вх}$ .

2.3.4.2 Экспериментально измерить ток  $I_{кз}$  и рассчитать сопротивление  $R_{кз}$ .

2.3.4.3 Смоделировать схему для расчета  $R_{кз}$  (рисунок 2.5), замкнув накоротко источник питания и подключив к выводам мультиметр в режиме измерения сопротивления.

2.3.4.4 Определить величины тока  $I3$ . Сравнить результаты расчётов, моделирования и экспериментальные данные. Заполнить таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты применения метода эквивалентного генератора

Задано		Результат					
$R1$ , кОм	$U_{вх}$ , В	$R_{24}$ , кОм	$U_{xx}$ , В	$I_{кз}$ , А	$R_{кз}$ , кОм	$I3$ , А	$U_{вых}$ , В
		Расчёт					
		Моделирование					
		Эксперимент					

2.3.4.5 Сделать выводы по результатам работы.

### Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схему моста постоянного тока, основные расчётные формулы, результаты эксперимента и моделирования (зависимости  $U_{вых} = f(R1)$ , см. таблицы 2.1 и 2.2), выводы по работе.



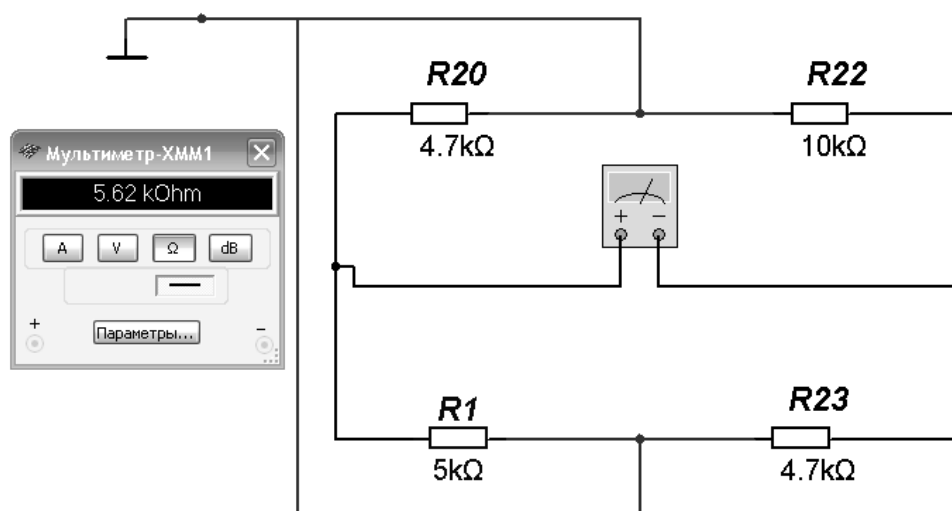


Рисунок 2.5 – Модель для измерения  $R_{k3}$

### **Контрольные вопросы**

- 1 Охарактеризуйте мостовую схему постоянного тока.
- 2 Порядок расчёта электрических цепей методом эквивалентного генератора напряжения.
- 3 Опишите моделирование моста постоянного тока в среде Multisim.

## **3 Исследование режимов работы и методов расчета линейных цепей постоянного тока с двумя источниками питания**

**Цель работы:** закрепление на практике основных методов расчета и моделирования работы цепей постоянного тока с несколькими источниками постоянного напряжения; исследование моста постоянного тока с генераторным датчиком.

### **3.1 Основные теоретические сведения**

Для расчёта цепей постоянного тока с несколькими источниками напряжения широко используют метод контурных токов.

Этот метод заключается в том, что вместо токов в ветвях определяются на основании второго закона Кирхгофа так называемые контурные токи (рисунок 3.1), замыкающиеся в контурах. Число уравнений, записываемых для контурных токов по второму закону Кирхгофа, равно числу независимых контуров.

$I_{11}, I_{22}, I_{33}$  – контурные токи;

$I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I$  – токи ветвей.

Система уравнений для расчета контурных токов:

$$\begin{aligned}
 I_{11} \cdot (R_{20} + R_{21}) - I_{22} \cdot R_{20} - I_{33} \cdot R_{21} &= E_1 - E; \\
 -I_{11} \cdot R_{20} + I_{22} \cdot (R_{20} + R_{24} + R_{22}) - I_{33} \cdot R_{24} &= 0; \\
 -I_{11} \cdot R_{21} - I_{22} \cdot R_{24} + I_{33} \cdot (R_{21} + R_{23} + R_{24}) &= E_1.
 \end{aligned}$$

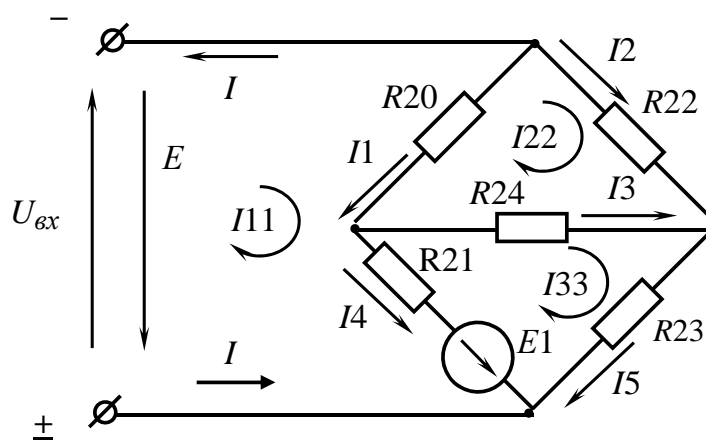


Рисунок 3.1 – Электрическая цепь постоянного тока с двумя источниками питания

Решив систему уравнений и определив значение контурных токов, находят значение тока  $I_3$ :

$$I_3 = I_{33} - I_{22}.$$

Выходное напряжение моста

$$U_{\text{вых}} = I_3 \cdot R_{24}.$$

Величина сопротивления  $R_{24}$  определена в лабораторной работе № 2.

### 3.2 Исследуемые схемы

Для выполнения лабораторной работы используется схема, приведенная на рисунке 3.2. Вместо резистора  $R_1$  включается тумблером SA11 источник  $E_1$  (тумблер SA11 должен находиться в нижнем положении).

Измерительный мост включается тумблером SA7. Величину ЭДС источника  $E_1$  устанавливают с помощью переключателя  $E_1$ .

Технические данные измерительного моста:  $R_{20} = 4,7 \text{ кОм}$ ;  $R_{22} = 10 \text{ кОм}$ ;  $R_{23} = 4,7 \text{ кОм}$ ;  $R_{21} = 0,2 \text{ кОм}$ ;  $U_{\text{вых}} = E = U_{\text{см}} = 16 \text{ В}$ .

Модель исследуемой схемы в среде Multisim представлена на рисунке 3.3.



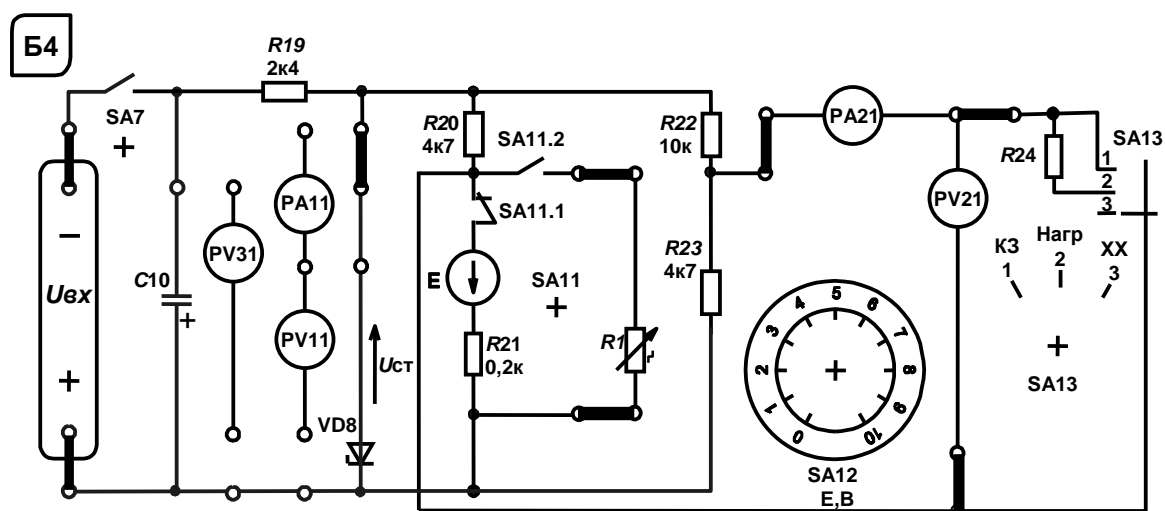


Рисунок 3.2 – Схема для экспериментального исследования электрической цепи постоянного тока с одним источником питания

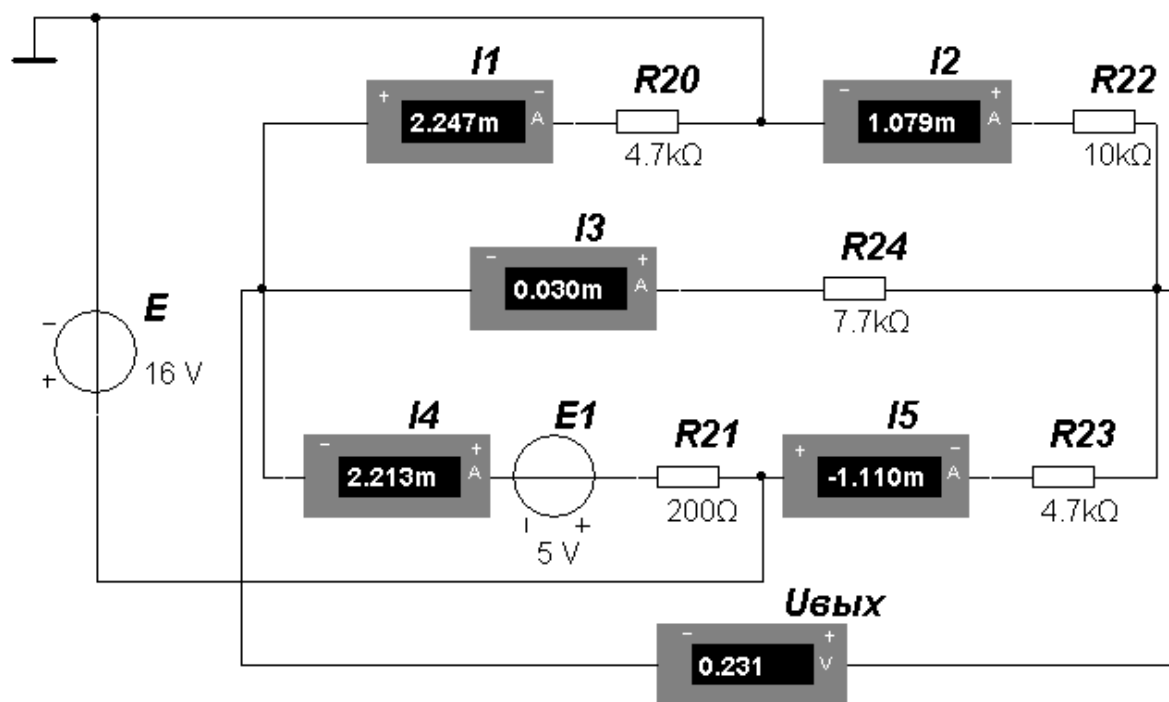


Рисунок. 3.3 – Модель исследуемой схемы

### 3.3 Порядок выполнения лабораторной работы

3.3.1 Методом контурных токов рассчитать токи в ветвях  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $I_5$  и величину выходного напряжения моста  $U_{вых}$  при значении ЭДС  $E_1$ , заданном преподавателем. Заполнить таблицу 3.1 (расчёт).

3.3.2 Промоделировать работу схемы, определив токи в ветвях и  $U_{вых}$ , и сравнить с результатами расчётов. Заполнить таблицу 3.1 (моделирование).

3.3.3 Снять экспериментально зависимость  $U_{вых} = f(E_1)$ , изменяя  $E_1$  от 1 до 10 В. Сопоставить  $U_{вых}$  для заданного значения  $E_1$  с расчетным.

3.3.4 Сделать выводы по результатам работы.

Таблица 3.1 – Результаты работы

Задано		Результат					
$E1, В$	$R24, кОм$	$I1, А$	$I2, А$	$I3, А$	$I4, А$	$I5, А$	$U_{вых}, В$
		Расчёт					
		Моделирование					
		Эксперимент					
		–	–		–	–	

### **Содержание отчёта**

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схему электрической цепи постоянного тока с двумя источниками питания, систему уравнений для расчёта контурных токов, результаты расчёта, моделирования и эксперимента (см. таблицу 3.1, зависимость  $U_{вых} = f(E1)$ ), выводы по работе.

### **Контрольные вопросы**

- 1 Опишите методы расчёта цепей постоянного тока с двумя источниками питания.
- 2 Порядок расчёта методом контурных токов.
- 3 Опишите моделирование сложных цепей постоянного тока в среде Multisim.

## **4 Определение параметров и исследование режимов работы электрической цепи переменного тока с последовательным соединением катушки индуктивности, конденсатора и резистора**

**Цель работы:** определение параметров схемы замещения индуктивной катушки с магнитопроводом; изучение основных режимов работы, расчётов и моделирования электрической цепи переменного тока при последовательном соединении  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементов.

### **4.1 Исследуемые схемы**

Схема для изучения цепи переменного тока с последовательно соединёнными резистивным, индуктивным и ёмкостным элементами приведена на рисунке 4.1.

Для определения параметров схемы замещения катушки индуктивности с магнитопроводом  $L_{K1}$  и  $R_{K1}$  в номинальном режиме ( $I_n = 1,0 А$ ) снимают показания приборов:

РА11 – ток  $I_n$  через катушку;



PW1 – активную мощность  $P$ , потребляемую катушкой;  
 PV11 – напряжение  $U$  на катушке.

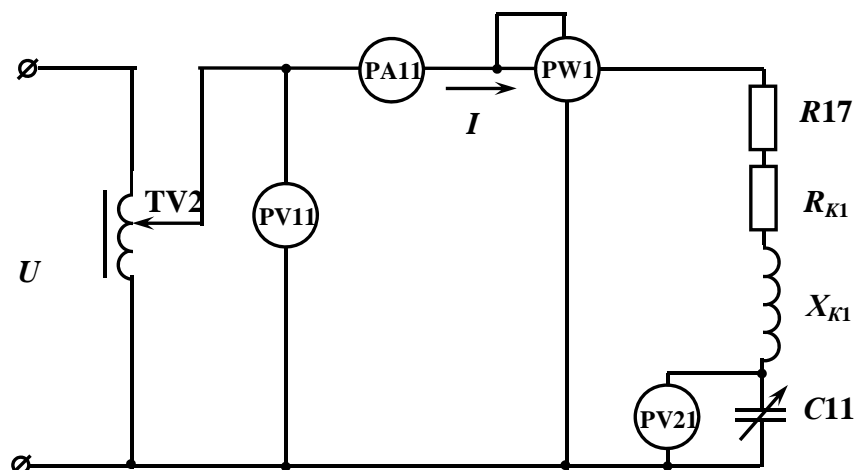


Рисунок 4.1 – Электрическая цепь переменного тока с последовательно соединёнными  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементами

Зная показания приборов, определяют значение параметров схемы замещения катушки:

$$R_{\Sigma} = \frac{P}{I_{\text{н}}^2}; \quad Z_{\Sigma} = \frac{U}{I_{\text{н}}}; \quad L_{K1} = \frac{X_{K1}}{2\pi f}; \quad X_{K1} = \sqrt{Z_{\Sigma}^2 - R_{\Sigma}^2};$$

$$R_{K1} = R_{\Sigma} - R17; \quad Z_{K1} = \sqrt{R_{K1}^2 + X_{K1}^2},$$

где  $R17 = 17$  Ом;  
 $f = 50$  Гц.

Определение величины емкости  $C11$ , при которой в цепи наступает резонанс напряжений.

Значение  $C11$  определяется исходя из условия возникновения резонанса напряжений:

$$X_{K1} = X_{C11},$$

где  $X_{C11} = \frac{1}{2\pi f C11}$ .

Таким образом,  $C11 = \frac{1}{2\pi f X_{K1}}$ .

При резонансе напряжения сопротивление цепи чисто активное, поэтому ток в цепи

$$I = \frac{U}{R_{K1} + R17}.$$



Коэффициент мощности цепи

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I}$$

Пример построения векторной диаграммы цепи при активно-индуктивном характере цепи представлен на рисунке 4.2.

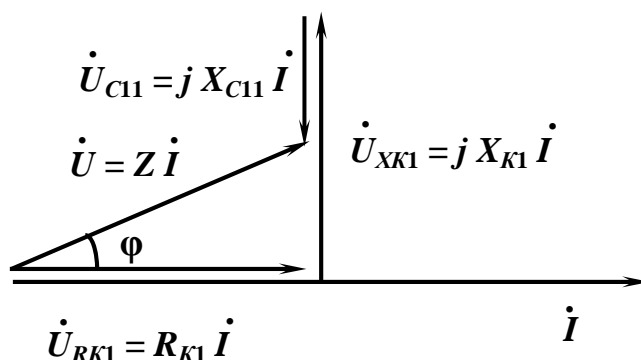


Рисунок 4.2 – Векторная диаграмма

#### 4.2 Исследуемые схемы

Для определения параметров схемы замещения катушки индуктивности собирают схему, приведенную на рисунке 4.3. Номинальный ток ( $I_n = 1,0$  А) выставляют с помощью лабораторного автотрансформатора TV2.

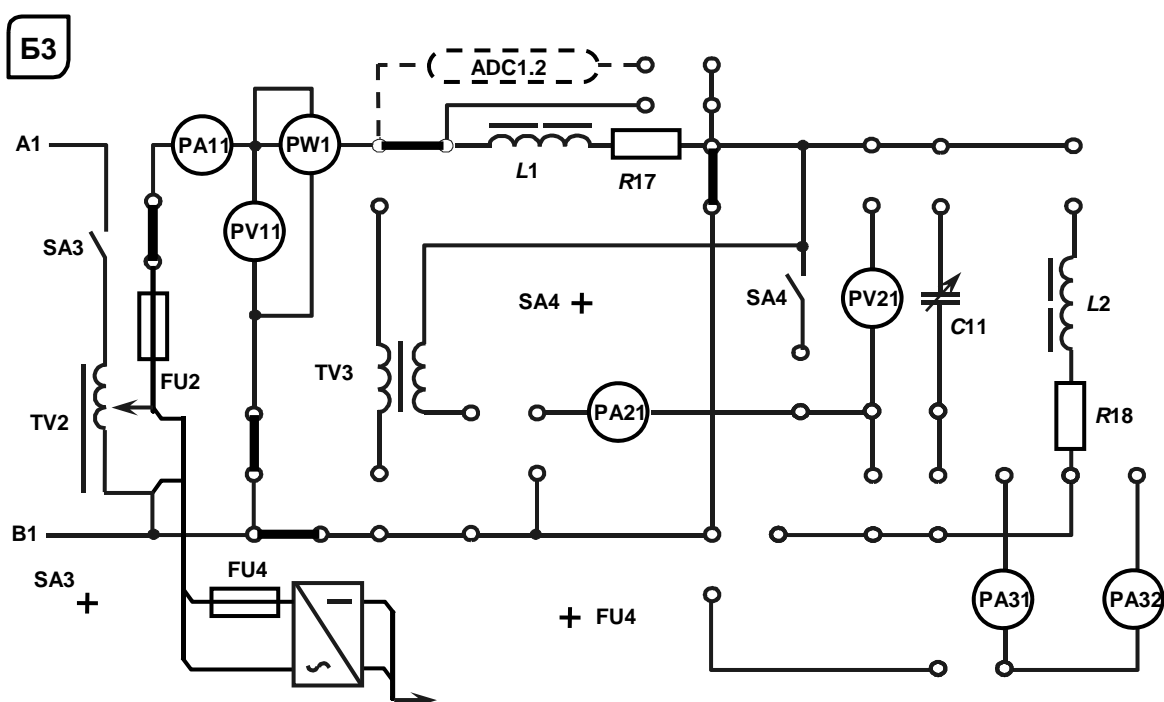


Рисунок 4.3 – Схема для экспериментального исследования параметров схемы замещения катушки индуктивности

Для исследования резонанса напряжения собирают схему, приведенную на рисунке 4.4.

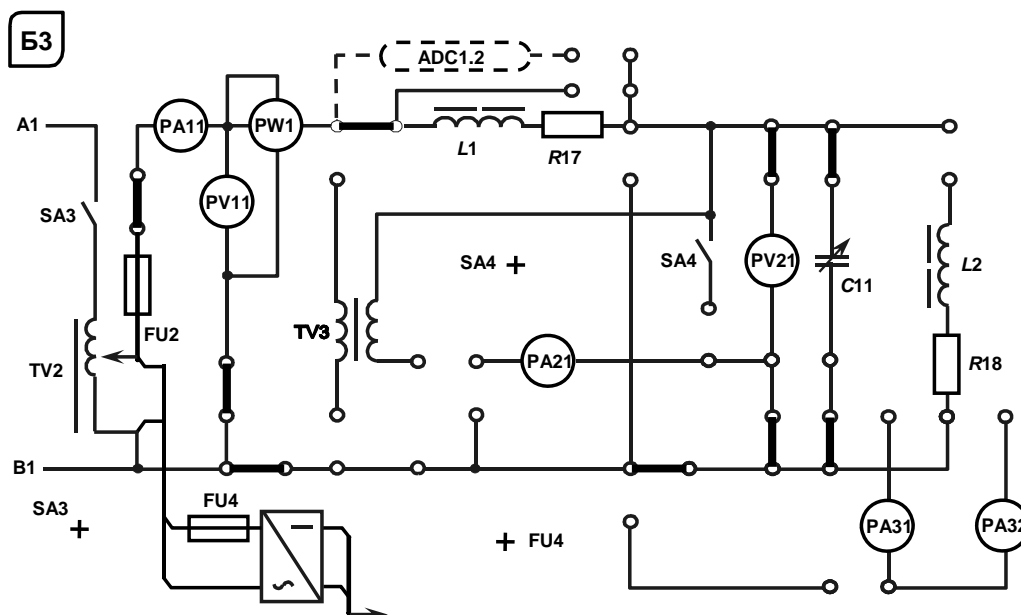


Рисунок 4.4 – Схема для экспериментального исследования резонанса напряжений

Модель исследуемой схемы в среде Multisim представлена на рисунке 4.5. При её построении устанавливаются в диалоговых окнах компонентов их параметры. Для источника переменного напряжения  $E1$  устанавливается действующее значение напряжения RMS и частота  $f$ . Вольтметры и амперметр в режиме: род тока (mode) – переменный (AC), внутреннее сопротивление (Resistance)  $R_V = 1 \text{ МОм}$ ,  $R_A = 1 \text{ нОм}$ . Для измерения мощности используется ваттметр XWM1. Форма напряжения и тока наблюдается с помощью осциллографа XSC1 (рисунок 4.6).

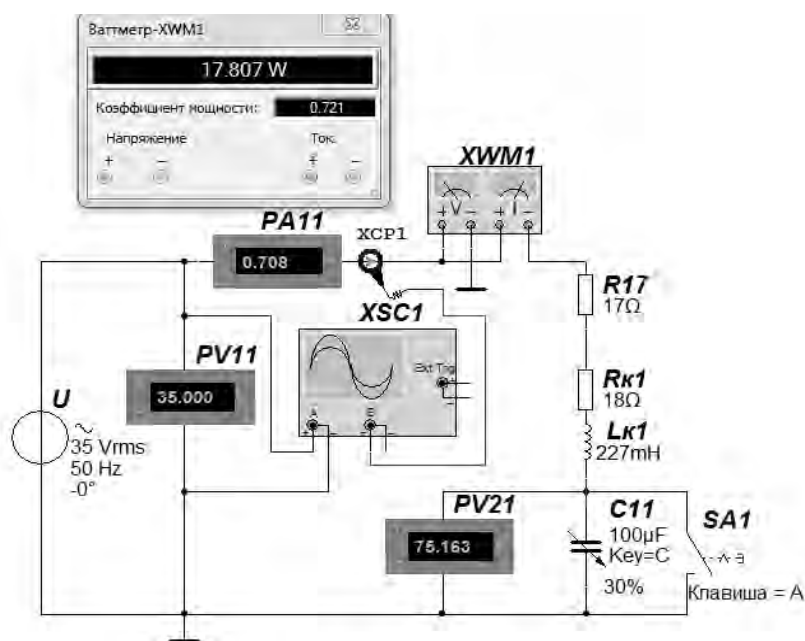


Рисунок 4.5 – Модель исследуемой схемы



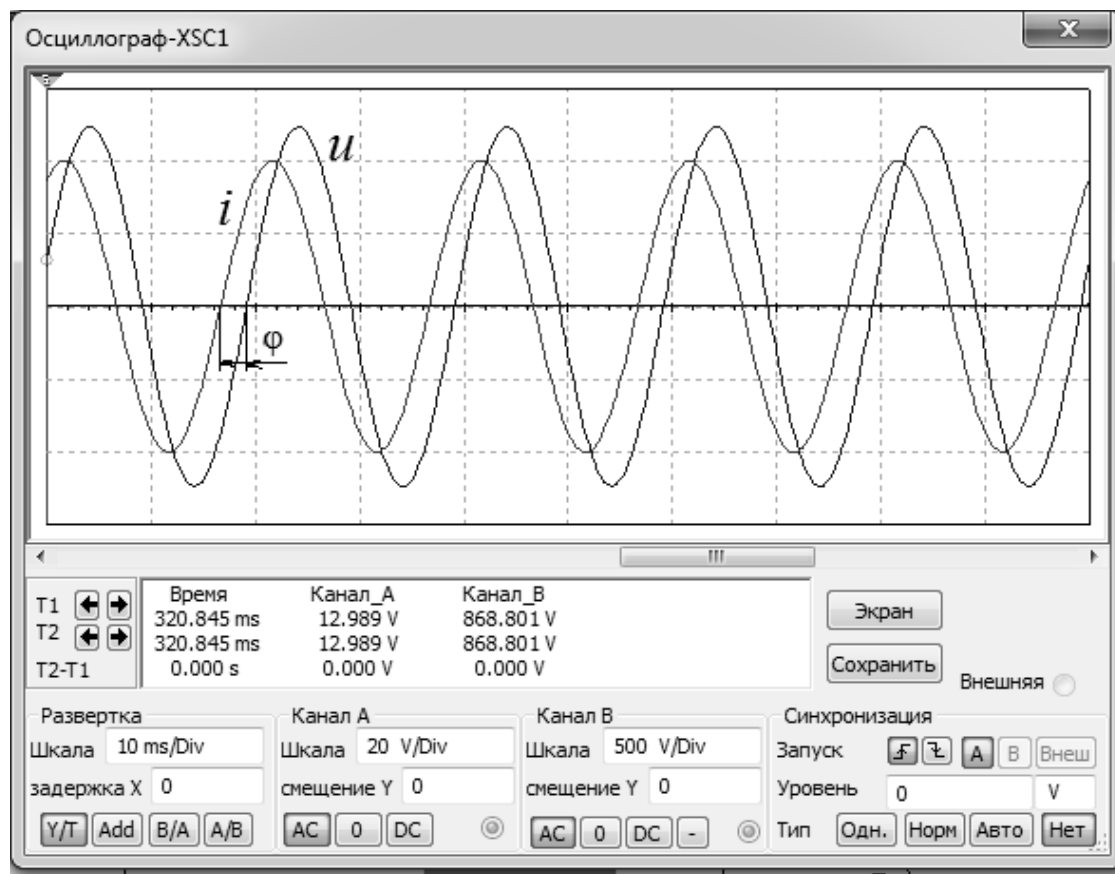


Рисунок 4.6 – Осциллограммы входного напряжения и тока

### 4.3 Порядок выполнения лабораторной работы

4.3.1 Собрать на стенде схему (см. рисунок 4.3) для расчета параметров схемы замещения катушки индуктивности  $L_{K1}$  и  $R_{K1}$  для номинального режима работы ( $I_n = 1,0$  A), определить значения этих параметров. Заполнить таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Определение параметров схемы замещения катушки индуктивности

Эксперимент			Расчёт				
$I_n$ , A	$U$ , В	$P$ , Вт	$Z_{\Sigma}$ , Ом	$R_{\Sigma}$ , Ом	$X_{K1}$ , Ом	$L_{K1}$ , Гн	$R_{K1}$ , Ом
1,0							

4.3.2 Используя параметры схемы замещения катушки индуктивности, определить величину емкости  $C_{11}$  конденсатора, при которой в цепи наступает резонанс напряжений.

4.3.3 Рассчитать напряжение  $U_{\min}$ , при котором в режиме резонанса напряжений ток в цепи  $I$  не превысит 1,0 A.

4.3.4 Записать полученные в результате моделирования и экспериментально зависимости  $I = f(C_{11})$  и  $\cos\phi = f(C_{11})$  при  $U_{\min}$ . Заполнить таблицу 4.2. Выделить в таблице значения параметров, соответствующие резонансу напряжений.

4.3.5 Для одного из режимов работы цепи, заданного преподавателем, построить векторную диаграмму напряжений и тока.

#### 4.3.6 Сделать выводы по результатам работы.

Таблица 4.2 – Результаты измерений

$C_{11}$ , мкФ	Способ исследования	$U$ (PV11), В	$P$ (PW1), Вт	$I$ (PA11), А	$\cos \varphi$
0	Моделирование				
	Эксперимент				
4	Моделирование				
	Эксперимент				
...					
63	Моделирование				
	Эксперимент				

#### *Содержание отчёта*

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схему исследуемой цепи переменного тока с последовательно соединёнными  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементами, основные расчётные формулы, результаты эксперимента и моделирования (см. таблицы 4.1 и 4.2, зависимости  $I = f(C_{11})$  и  $\cos \varphi = f(C_{11})$ ), векторную диаграмму напряжений и тока, выводы по работе.

#### *Контрольные вопросы*

- 1 Определение параметров схемы замещения катушки индуктивности с магнитопроводом.
- 2 Расчёт цепи переменного тока с последовательно соединёнными  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементами при различных режимах работы.
- 3 Опишите моделирование цепи переменного тока с последовательно соединёнными  $R$ -,  $L$ -,  $C$ -элементами в среде Multisim.

### **5 Исследование режимов работы линии электропередачи переменного тока при изменении коэффициента мощности нагрузки**

**Цель работы:** определение параметров нагрузки; исследование режимов работы ЛЭП при изменении коэффициента мощности нагрузки.

#### *5.1 Исследуемые схемы*

Схема для изучения линии электропередачи (ЛЭП) с нагрузкой в виде параллельно соединённых резистивным, индуктивным и ёмкостным элементами приведена на рисунке 5.1. Закоротив условно представленную ЛЭП ( $L_{K1}$ ,  $R_{17}$ ), определяют параметры катушки  $L_{K2}$ , сопротивление  $R_{18}$  и  $\cos \varphi$  для номиналь-



ного режима  $U_{2H} = 110 \text{ В}$  (схема дана на рисунке 5.2).

Рассчитать величину емкости  $C11$  для выполнения условия резонанса токов. Схема приведена на рисунке 5.3.

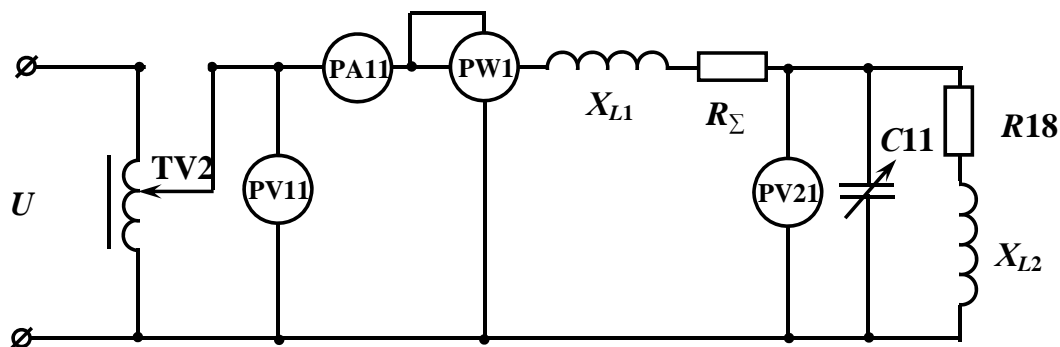


Рисунок 5.1 – Электрическая схема ЛЭП переменного тока с параллельно соединёнными  $R$ -,  $L$ - и  $C$ -элементами в качестве нагрузки

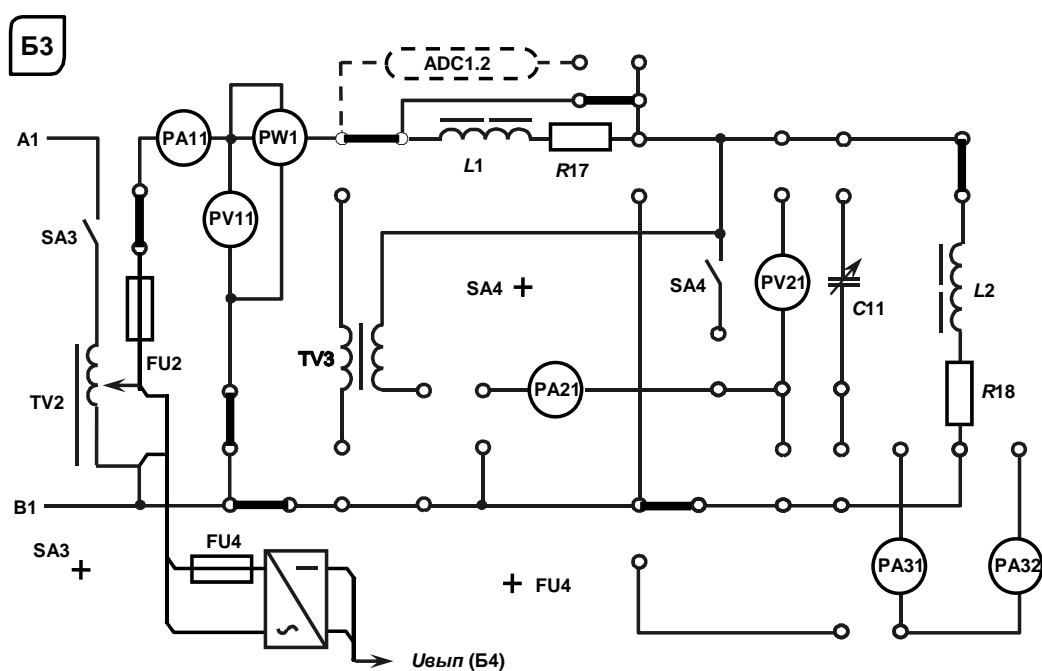


Рисунок 5.2 – Схема для экспериментального исследования параметров схемы замещения катушки индуктивности

### 5.3 Основные теоретические соотношения

5.3.1 Определение сопротивлений нагрузки для ЛЭП. При расчете сопротивлений нагрузки ( $R18$ ,  $X_{L2}$ ) необходимо зашунтировать перемычкой ЛЭП ( $L_{K1}$ ,  $R17$ ), установить автотрансформатором TV2 номинальное напряжение  $U_H = 110 \text{ В}$  и снять показания приборов PW1 и PA11.

$$R18 = \frac{P}{I^2}; \quad Z_{L2} = \frac{U_{2H}}{I}; \quad L = \frac{X_{L2}}{2\pi f}; \quad X_{L2} = \sqrt{Z_{L2}^2 - R18^2}.$$

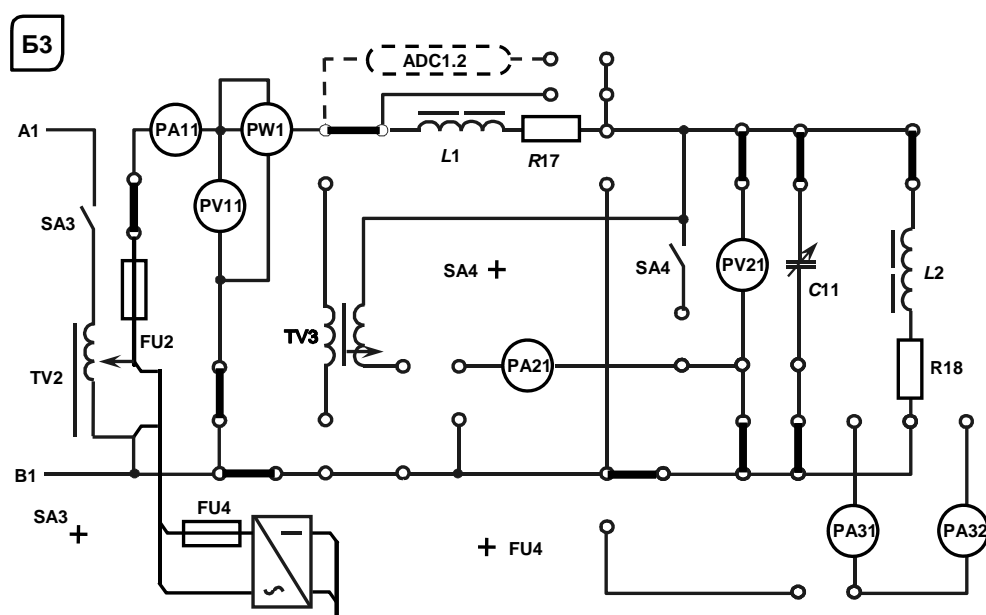


Рисунок 5.3 – Схема для экспериментального исследования резонанса токов

### 5.3.2 Определение коэффициента мощности $\cos\varphi_{2H}$ нагрузки:

$$\cos\varphi_{2H} = \frac{R18}{Z_{L2}}.$$

5.3.3 Расчет значения емкости  $C11$ , при котором в цепи наступит резонанс токов:

$$b_L = b_C; \quad \omega \cdot C11 = \frac{X_{L2}}{Z_{L2}^2}; \quad C11 = \frac{X_{L2}}{\omega \cdot Z_{L2}^2}.$$

5.3.4 Построение графика зависимости  $\eta = f(C11)$ . Расчет  $\eta$  при различных значениях  $C11$  необходимо осуществлять по формуле

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{P_2 \cdot R_{\Sigma}}{U_{2H}^2 \cdot \cos^2 \varphi_2}},$$

где  $P_2$  – активная мощность, потребляемая нагрузкой,  $P_2 = P - P_1 = P - I(R17 + R_{K1})$ ;  
 $P$  – показания ваттметра PW2;

$$\cos\varphi_2 = \frac{q}{y};$$

$$q \text{ – активная проводимость нагрузки, } q = \frac{R18}{Z_{L2}^2};$$

$y$  – полная проводимость нагрузки,  $y = \sqrt{\left(\frac{R_{18}}{Z_{L2}^2}\right)^2 + \left(\frac{X_{L2}}{Z_{L2}^2} - \omega \cdot C_2\right)^2}$ ;

$\frac{X_{L2}}{Z_{L2}^2}$  – реактивная проводимость катушки индуктивности,  $\frac{X_{L2}}{Z_{L2}^2} = b_L$ ;

$\omega C_2$  – реактивная проводимость конденсатора,  $\omega C_2 = b_C$ .

Значение сопротивления  $R_{\Sigma} = R_{17} + R_{K1}$  берется из лабораторной работы № 4.

## 5.4 Порядок выполнения лабораторной работы

5.4.1 Изучить схему замещения ЛЭП.

5.4.2 Определить параметры схемы замещения катушки индуктивности  $L_2$ . Зашунтировав ЛЭП и установив  $U_{2H} = 110$  В, определить значения сопротивлений нагрузки  $X_{L2}$ ,  $R_{18}$ , а также коэффициент мощности нагрузки  $\cos\varphi_{2H}$  (см. рисунок 5.2).

5.4.3 Рассчитать значение емкости  $C_{11}$ , при котором в цепи наступит резонанс токов, и проверить на стенде.

5.4.4 Изменяя емкость  $C_{11}$  и поддерживая  $U_{2H} = 110$  В, снять экспериментально зависимость  $\eta = f(C_{11})$  (см. рисунок 5.3).

## 6 Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей звездой

**Цель работы:** исследование трехфазной цепи при соединении потребителей звездой; изучение методов расчета и моделирования работы трехфазных цепей при соединении потребителей звездой.

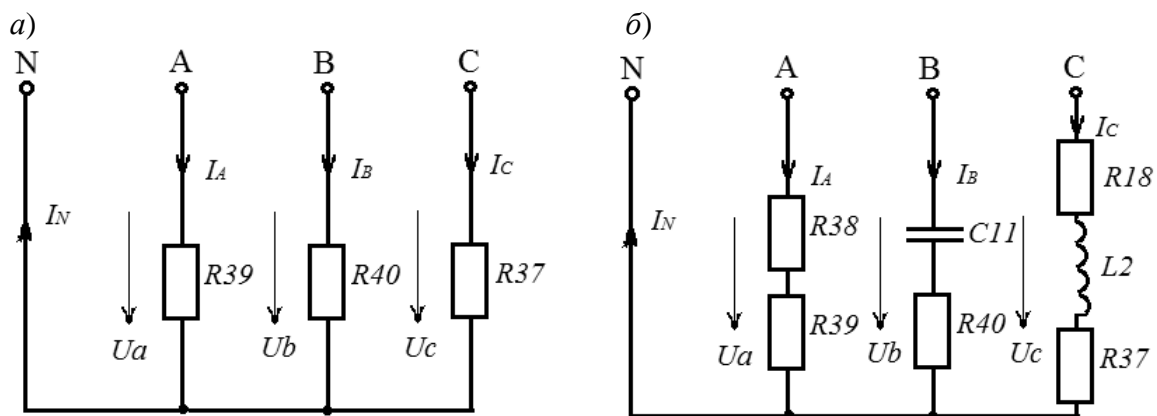
### 6.1 Исследуемые схемы

В лабораторной работе исследуются трехфазные схемы с симметричной (рисунок 6.1, а) и несимметричной (рисунок 6.1, б) нагрузками при наличии нейтрального провода и без него.

Модель исследуемой схемы в среде Multisim представлена на рисунке 6.3. При её построении устанавливаются в диалоговых окнах компонентов их параметры. ЭДС фазы источника переменного напряжения FG  $E_{\phi} = 125$  В и частота  $f = 50$  Гц. Вольтметры и амперметр в режиме: род тока (mode) – переменный (AC), внутреннее сопротивление (Resistance)  $R_V = 1$  МОм,  $R_A = 1$  нОм. Для измерения мощности используются ваттметры XWM1, XWM2.

Изменение нагрузки в фазах осуществляется кнопками SA1, SA2, SA3 (клавиши 1–3), отключение нейтрального провода – кнопкой SA4 (клавиша 4), обрыв фазы А – кнопкой SA5 (клавиша 5).





*a* – нагрузка симметричная; *б* – нагрузка несимметричная

Рисунок 6.1 – Исследуемые трёхфазные схемы

На рисунке 6.2 представлена схема для проведения экспериментальных исследований.

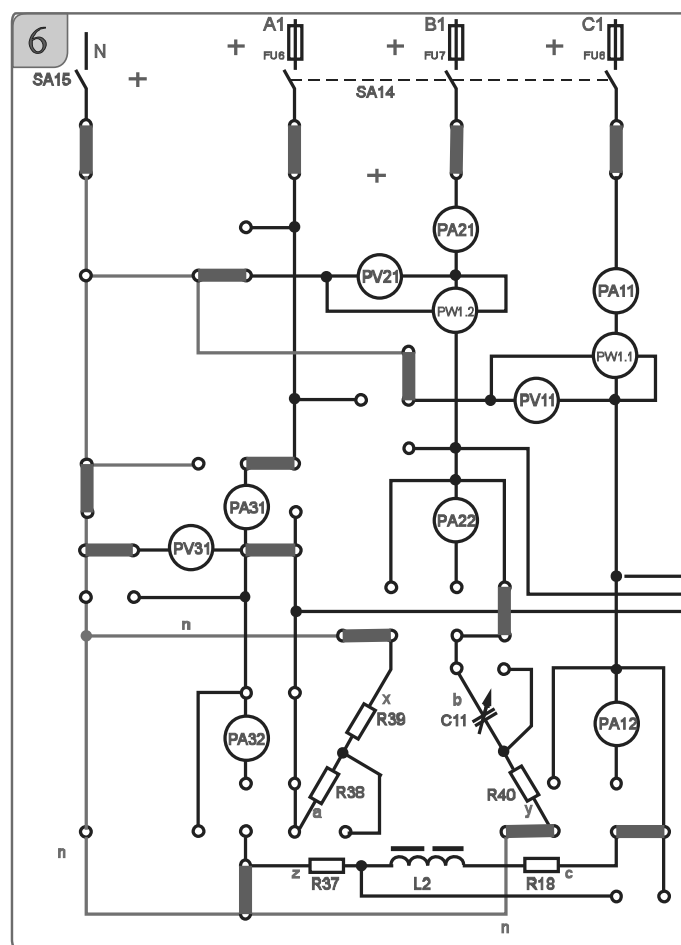


Рисунок 6.2 – Схема для экспериментального исследования трехфазной электрической цепи при соединении нагрузки звездой

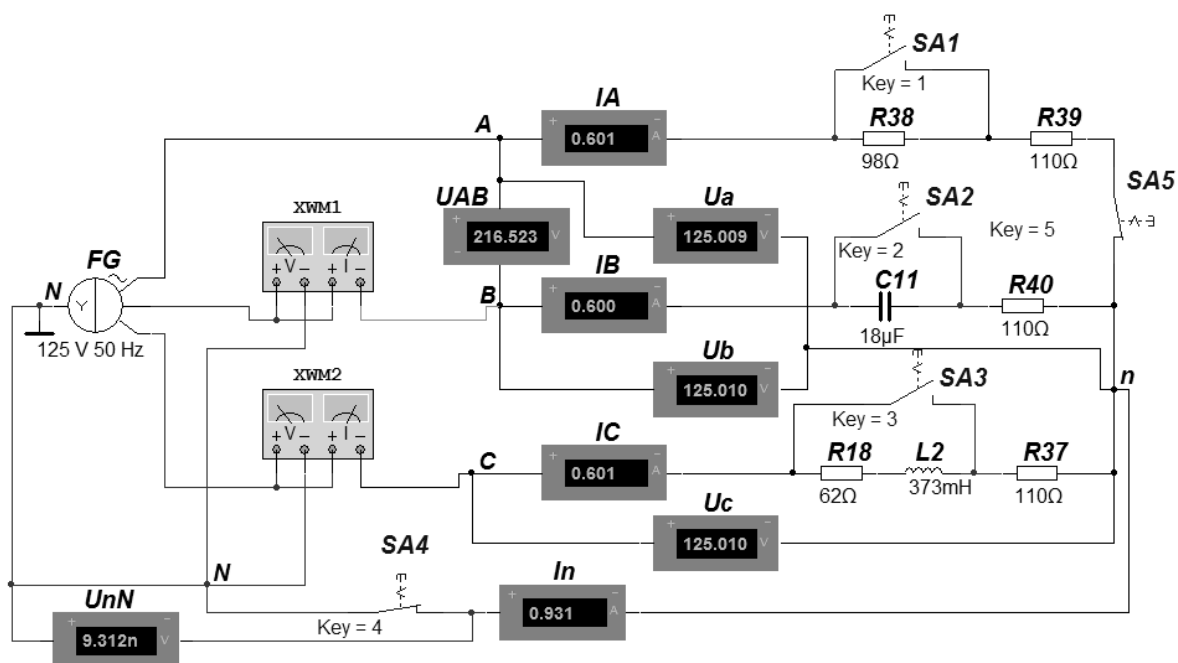


Рисунок 6.3 – Модель исследуемой схемы

## 6.2 Основные теоретические сведения

6.2.1 Исследование симметричной резистивной нагрузки при наличии нейтрального провода.

Для получения симметричной нагрузки

$$R37 = R39 = R40$$

необходимо переключателями закоротить следующие элементы:  $R38$ ,  $C11$ ,  $L2$  и  $R18$  (см. рисунок 6.2).

Измерить фазные напряжения  $U_b$  и  $U_c$  при помощи вольтметров PV21, PV11 и фазные токи в фазах «В» и «С» при помощи амперметра PA21 и PA11.

Убедиться в отсутствии тока в нейтральном проводе  $I_N = 0$  (PA31).

Определить значения сопротивлений резисторов  $R37$ ,  $R39$ ,  $R40$  по закону Ома:

$$R37 = \frac{U_c}{I_c}.$$

Мощность, потребляемую симметричной нагрузкой, определить по формуле

$$P = 3 \cdot I_c^2 \cdot R37.$$

6.2.2 Расчет значения емкости  $C11$  для получения равномерной нагрузки.

$$Z_a = R38 + R39;$$

$$Z_b = \sqrt{R40^2 + X_{C11}^2};$$

$$Z_c = \sqrt{(R37 + R18)^2 + X_{L2}^2}.$$

Приняв  $Z_a = Z_b = Z_c$ , определяют значение  $C_{11}$  для получения равномерной нагрузки:

$$R40^2 + X_{C11}^2 = (R37 + R18)^2 + X_{L2}^2,$$

где значения  $R18=59$  Ом и  $X_{L2} = 140$  Ом,

$$X_{C11} = \sqrt{(R37 + R18)^2 + X_{L2}^2 - R40^2}.$$

$$\text{Откуда } C_{11} = \frac{1}{\omega \cdot X_{C11}}.$$

Значение сопротивления резистора  $R38$  определяется из соотношения

$$R38 = Z_c - R39,$$

т. к. нагрузка в данной фазе носит резистивный характер.

*6.2.3 Исследование несимметричной равномерной нагрузки с нейтральным проводом (общая точка ваттметров соединена с нейтралью).*

В этом случае  $\dot{U}_a = \dot{U}_b = \dot{U}_c$ , а

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_a}{Z_a}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_b}{Z_b}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_c}{Z_c},$$

где  $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$  – фазные напряжения нагрузок,  $\dot{U}_a = \dot{U}_A; \dot{U}_b = \dot{U}_B; \dot{U}_c = \dot{U}_C$ ;  
 $I_a = I_b = I_c$ .

$\dot{I}_N$  – ток в нейтральном проводе,  $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ .

*6.2.4 Исследование несимметричной равномерной нагрузки без нейтрального провода.*

Для выполнения исследования отключить нейтральный провод ( $I_2 = 0$ ), а общую точку ваттметров PW11, PW21 подключить к фазе «А».

Набрать рассчитанное значение  $C_{11}$  при помощи выключателей. Разомкнуть переключки, шунтирующие элементы  $R38, C_{11}, L_2, R18$ , и таким образом получить равномерную нагрузку.

Измерить фазные напряжения  $U_b$  и  $U_c$  при помощи вольтметров PV21, PV11 и фазные токи в фазах «В» и «С» при помощи амперметра PA21 и PA11.

Убедиться в неравенстве фазных напряжений.

### 6.3 Порядок выполнения работы

6.3.1 Исследовать на модели и экспериментально симметричную нагрузку с нейтральным проводом, измерив фазные токи  $I_A, I_B, I_C$ , напряжения  $U_a, U_b, U_c$ ,





мощность нагрузки  $P$ , а также ток в нейтральном проводе  $I_N$ . Заполнить таблицу 6.1 (симметричная нагрузка).

6.3.2 Рассчитать сопротивления фаз симметричной нагрузки (см. п. 6.2.1).

6.3.3 Рассчитать значения емкости  $C_{11}$  и сопротивления резистора  $R_{38}$  для обеспечения равномерной нагрузки (см. п. 6.2.2).

6.3.4 Исследовать равномерную нагрузку с нейтральным проводом, измерив экспериментально и в результате моделирования фазные напряжения, мощность и ток в нейтральном проводе, подключив его тумблером SA15 (общая точка ваттметров – к нейтрали). Рассчитать комплексные значения токов в фазах А, В, С и определить ток в нейтральном проводе. Сравнить расчетные значения тока с результатами моделирования и экспериментальными. Заполнить таблицу 6.1 (равномерная нагрузка).

Таблица 6.1 – Результаты измерений

$U_a$ , В	$U_b$ (PV21), В	$U_c$ (PV11), В	$I_A$ , А	$I_B$ (PA21), А	$I_C$ (PA11), А	$I_N$ (PA31), А	$P$ , Вт
<b>Симметричная нагрузка</b>							
Моделирование							
Эксперимент							
<b>Равномерная нагрузка</b>							
Моделирование							
Эксперимент							
Расчёт							

6.3.5 Построить векторную диаграмму токов и напряжений для равномерной нагрузки с нейтральным проводом.

6.3.6 Исследовать несимметричную равномерную нагрузку без нейтрального провода, измерив экспериментально и в результате моделирования фазные напряжения и токи. Убедиться в неравенстве фазных напряжений.

6.3.7 Смоделировать аварийные режимы работы трёхфазной сети: обрыв нейтрального провода при несимметричной нагрузке, обрыв фазы.

6.3.8 Сделать выводы по результатам работы.

### **Содержание отчёта**

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схемы трёхфазной цепи при симметричной и несимметричной нагрузках, основные расчётные формулы, результаты эксперимента, моделирования и расчёта (см. таблицу 6.1), векторную диаграмму напряжений и токов, выводы по работе.



### ***Контрольные вопросы***

- 1 Как производится расчёт трёхфазной цепи переменного тока при соединении звездой с симметричной нагрузкой?
- 2 Как произвести расчёт трёхфазной цепи переменного тока при соединении звездой с несимметричной нагрузкой при наличии нейтрального провода?
- 3 Опишите моделирование трёхфазной цепи переменного тока при соединении звездой в среде Multisim.

## **7 Определение параметров и исследование режимов работы трехфазной цепи при соединении потребителей в треугольник**

***Цель работы:*** исследование трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником; изучение методов расчета трехфазных цепей при соединении потребителей треугольником.

### ***7.1 Исследуемые схемы***

В данной лабораторной работе исследуются трехфазные схемы с симметричной, несимметричной и несимметричной равномерной нагрузками при соединении потребителей треугольником (рисунок 7.1).

### ***7.2 Порядок выполнения лабораторной работы***

7.2.1 Установить несимметричную равномерную нагрузку во всех трех фазах. Определить экспериментально активную мощность нагрузки и линейный ток в линии С нагрузки. Напряжение  $U_{ab}$  измерить прибором PV21, напряжения  $U_{bc}$ ,  $U_{ac}$  измерить прибором PV11.

7.2.2 Рассчитать комплексные значения фазных токов и определить линейный ток в линии С. Рассчитать активную мощность потребителя. Результаты вычислений сравнить с экспериментальными данными.

7.2.3 Построить векторную диаграмму токов и напряжений.

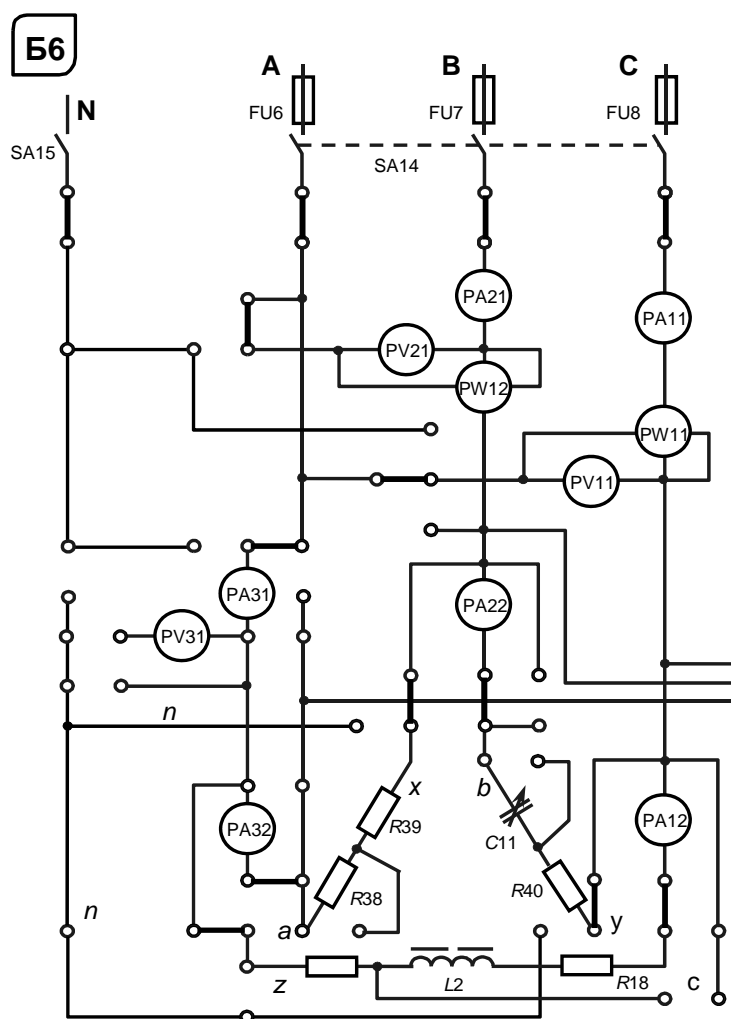


Рисунок 7.1 – Трехфазная электрическая цепь при соединении нагрузки треугольником

## 8 Определение параметров схемы замещения и КПД однофазного трансформатора

**Цель работы:** изучение устройства и принципа действия однофазного трансформатора; изучение схем замещения трансформатора и определение их параметров.

### 8.1 Основные теоретические сведения

*Трансформатор* – это статический (неподвижный) электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования переменного тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты.

Простейший трансформатор состоит из магнитопровода, набранного из листов электротехнической стали, и двух расположенных на нем обмоток (рисунок 8.1).

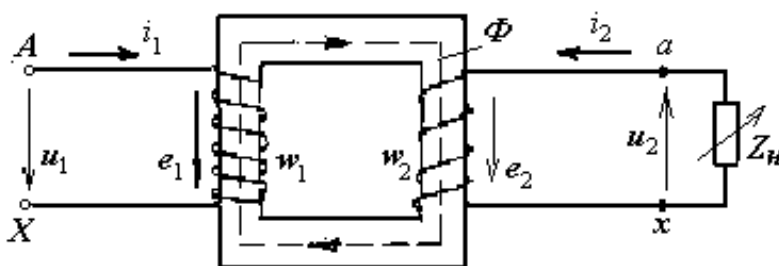


Рисунок 8.1 – Схема трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток  $i_1$ , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток  $\Phi$ . Замыкаясь в магнитопроводе, этот поток пронизывает обе обмотки, индуцируя в них ЭДС:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt}.$$

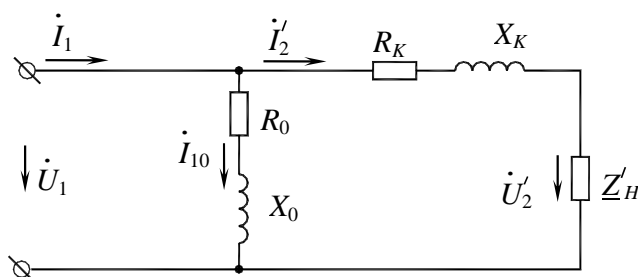
Значения ЭДС  $e_1$  и  $e_2$  могут отличаться друг от друга в зависимости от числа витков в обмотках. Применяя обмотки с различным соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называют *коэффициентом трансформации* трансформатора

$$n = E_1/E_2 = w_1/w_2.$$

При подключении ко вторичной обмотке нагрузки  $Z_H$  в цепи потечет ток  $i_2$  и на выводах вторичной обмотки установится напряжение  $u_2$ .

Схема замещения трансформатора представлена на рисунке 8.2.



$R_0, X_0$  – параметры намагничивающей цепи трансформатора в схеме замещения трансформатора, определяемые из опыта холостого хода трансформатора ( $R_0$  – активное сопротивление намагничивающей цепи, обусловленное потерями мощности в стальном магнитопроводе;  $X_0$  – индуктивное сопротивление намагничивающей цепи, обусловленное основным магнитным потоком);  $R_K, X_K$  – параметры схемы замещения, определяемые из опыта короткого замыкания трансформатора

Рисунок 8.2 – Схема замещения однофазного трансформатора

Для определения коэффициента трансформации  $n$ , а также параметров схемы замещения и потерь мощности в трансформаторе проводят опыт холостого хода (опыт ХХ) и опыт короткого замыкания (КЗ) трансформатора.

Схема опыта холостого хода представлена на рисунке 8.3.

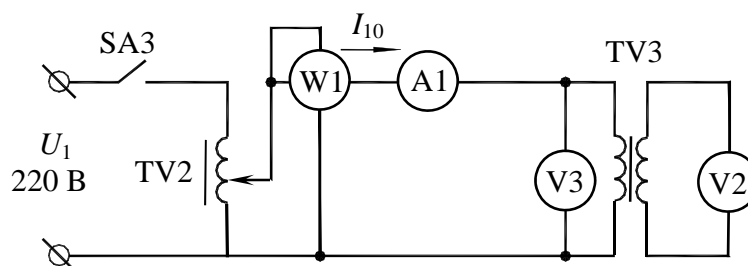


Рисунок 8.3 – Опыт холостого хода трансформатора

Показания приборов  $P_{W1}$ ,  $P_{A1}$ ,  $P_{V3}$ ,  $P_{V2}$  дают возможность определить параметры схемы замещения трансформатора в режиме холостого хода:

$$R_0 = \frac{P_0}{I_{10}^2}; \quad Z_0 = \frac{U_{1H}}{I_{10}}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; \quad n = \frac{U_{1H}}{U_{20}},$$

где  $n$  – коэффициент трансформации трансформатора.

Схема опыта короткого замыкания представлена на рисунке 8.4.

Показания приборов  $P_{W1}$ ,  $P_{V3}$ ,  $P_{A1}$ ,  $P_{A2}$  дают возможность определить параметры схемы замещения в режиме короткого замыкания:

$$R_K = \frac{P_K}{I_{1H}^2}; \quad Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1H}}; \quad X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2},$$

а также активные и реактивные сопротивления первичной и вторичной обмотки трансформатора ( $R_1$ ,  $R_2$ ,  $X_1$ ,  $X_2$ ):

$$R_1 = R_2' = \frac{R_K}{2}; \quad X_1 = X_2' = \frac{X_K}{2}; \quad R_2 = \frac{R_2'}{n^2}; \quad X_2 = \frac{X_2'}{n^2}.$$

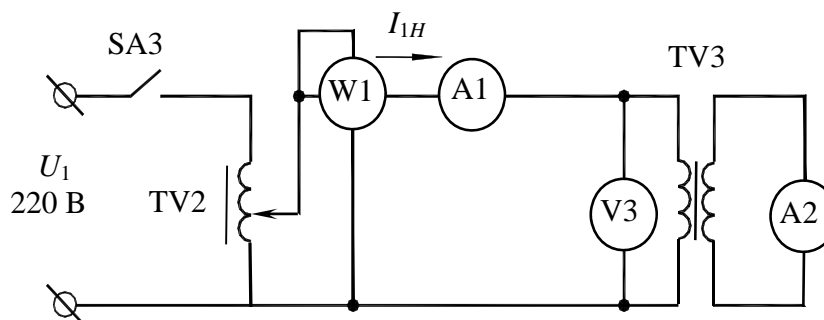


Рисунок 8.4 – Опыт короткого замыкания трансформатора

Используя данные лабораторной работы № 5, определяют  $\cos\varphi$  нагрузки:

$$\cos\varphi_{2H} = \frac{R_{18}}{Z_{L2}} = \frac{59}{140} = 0,42.$$

КПД трансформатора

$$\eta = \frac{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_{2H}}{\beta \cdot S_H \cdot \cos\varphi_{2H} + P_0 + \beta^2 \cdot P_K},$$

где  $\beta$  – коэффициент загрузки трансформатора,  $\beta = \frac{I_1}{I_{1H}} = \frac{I_2}{I_{2H}}$ ;

$S_H$  – полная мощность трансформатора,

$$S_H = U_{1H} \cdot I_{1H} = U_{2H} \cdot I_{2H}.$$

Внешняя характеристика трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  строится по следующему уравнению:

$$U_2 = U_{2H} \left( 1 - \frac{\Delta U_2 \%}{100 \%} \right),$$

где  $\Delta U_2 \% = \beta (U_{к.а.} \cos\varphi_2 + U_{к.р.} \sin\varphi_2)$ ;

$U_{к.а.}$  – активная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора,  $U_{к.а.} \% = \frac{I_{1H} R_K}{U_{1H}} 100 \% = \frac{P_K}{S_H} 100 \% ;$

$U_{к.р.}$  – реактивная составляющая напряжения короткого замыкания трансформатора,  $U_{к.р.} \% = \frac{I_{1H} X_K}{U_{1H}} 100 \% .$

## 8.2 Исследуемые схемы

Исследование однофазного трансформатора производится по схеме, представленной на рисунке 8.5.

Для определения параметров схемы замещения трансформатора  $U_2 = f(\beta)$  проводят опыты холостого хода (SA4 – выключен) и короткого замыкания (SA4 включен) (рисунок 8.6).

Опыт короткого замыкания производят при пониженном напряжении на первичной обмотке трансформатора (выключатель SA4 включен).

Исследуется и строится внешняя характеристика трансформатора при различном характере и величине нагрузки. Характер нагрузки изменяется при различных значениях емкости конденсатора  $C_{11}$ .



Изучаются методы повышения коэффициента мощности нагрузки и КПД трансформатора.

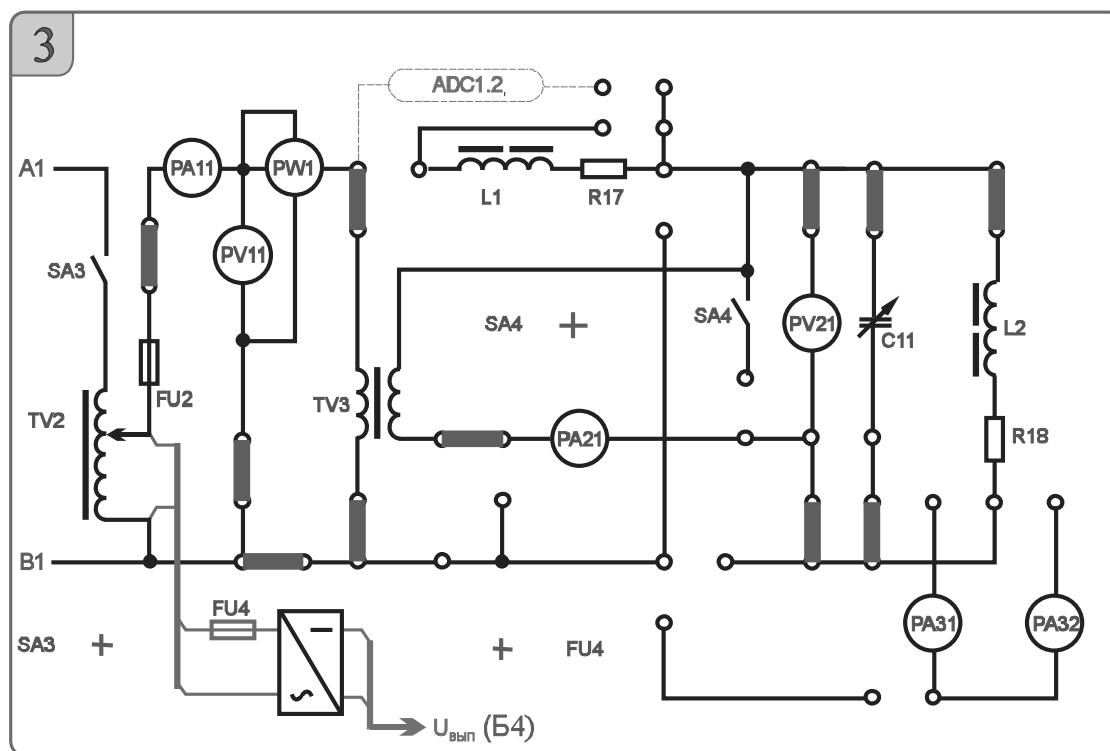


Рисунок 8.5 – Схема исследования однофазного трансформатора

### 8.3 Порядок выполнения лабораторной работы

8.3.1 Собрать схему, приведенную на рисунке 8.5, для проведения опыта холостого хода.

8.3.2 Подключить питание ЛАТРа TV2 (тумблер переключения пределов регулирования напряжения ЛАТРа SA70 в блоке 10 в положение «100←0В», тумблер SA3 в блоке 3 устанавливается в положение «включено»).

8.3.3 Снять параметры холостого хода трансформатора TV3 при напряжении питания 220 В (по прибору PV11). Снять показания приборов PA11 ( $I_{10}$ ), PV11 ( $U_{I_{x.x.}}$ ), PW1 ( $P_0$ ), PV21 ( $U_{20}$ ) и занести их в таблицу 8.1.

Таблица 8.1 – Показания приборов в опыте холостого хода трансформатора

Экспериментальные данные				Расчетное значение					
$U_{1H}$ , В (PV11)	$I_{10}$ , А (PA11)	$P_0$ , Вт (PW1)	$U_{20}$ , В (PV21)	$S$ , В·А	$Z_0$ , Ом	$X_0$ , Ом	$R_0$ , Ом	$\cos \varphi$	$\varphi$ , град
220									

8.3.4 Рассчитать параметры трансформатора в режиме холостого хода и занести их в таблицу 8.1.

8.3.5 Собрать схему, приведенную на рисунке 8.6, для проведения опыта короткого замыкания.

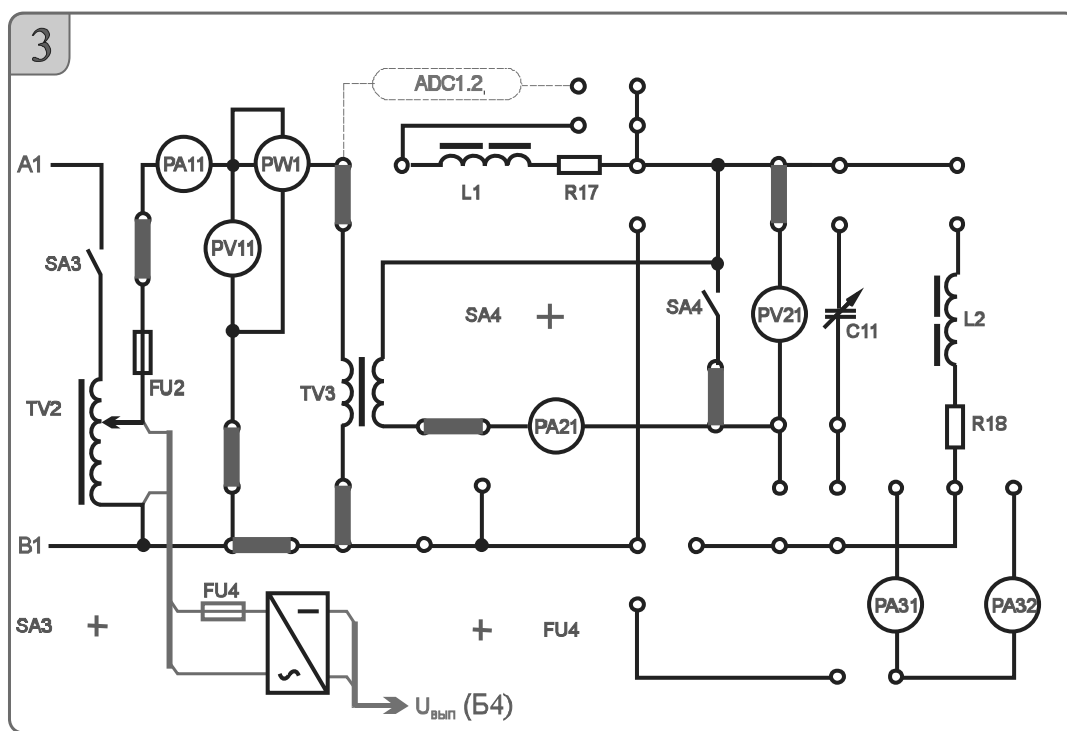


Рисунок 8.6 – Схема исследования трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания

8.3.6 Снять параметры короткого замыкания, для чего включить тумблеры SA4 и SA3, установив во вторичной обмотке трансформатора TV3 ток 0,8 А (по прибору PA21). Снять показания приборов PA11 ( $I_{1H}$ ), PV11 ( $U_{1к.з.}$ ), PW1 ( $P_{кз}$ ) и занести их в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 – Показания приборов в опыте короткого замыкания

Экспериментальные данные				Расчетное значение					
$U_{1к}, \text{В}$ (PV11)	$I_{1H}, \text{А}$ (PA11)	$P_{к}, \text{Вт}$ (PW1)	$U_2, \text{В}$ (PV21)	$S,$ В·А	$Z_{к},$ Ом	$X_{к},$ Ом	$R_{к},$ Ом	$\cos \varphi$	$\varphi,$ град
	0,8								

8.3.7 Рассчитать параметры трансформатора в режиме короткого замыкания и холостого хода и занести их в таблицу 8.2.

8.3.8 Измерить вторичное напряжение при нагрузке  $R_{18}, L_2$  (см. рисунок 8.5).

8.3.9 Построить внешнюю характеристику трансформатора  $U_2 = f(\beta)$ .

8.3.10 Осуществить моделирование работы трансформатора в среде Multisim (рисунок 8.7), используя параметры схемы замещения (см. таблицы 8.1 и 8.2). В режиме холостого хода разомкнуть ключ Q и S. В режиме короткого замыкания ключ Q замкнут (напряжение на первичной обмотке изменить на  $U_K$ ).

Сравнить результаты моделирования с расчётными значениями и результатами эксперимента.

8.3.11 Рассчитать коэффициент мощности нагрузки  $R_{18}, L_2$  и определить значение емкости  $C_{11}$  для повышения  $\cos \varphi$  нагрузки до значения, заданного преподавателем.



### 8.3.12 Сделать выводы по результатам работы.

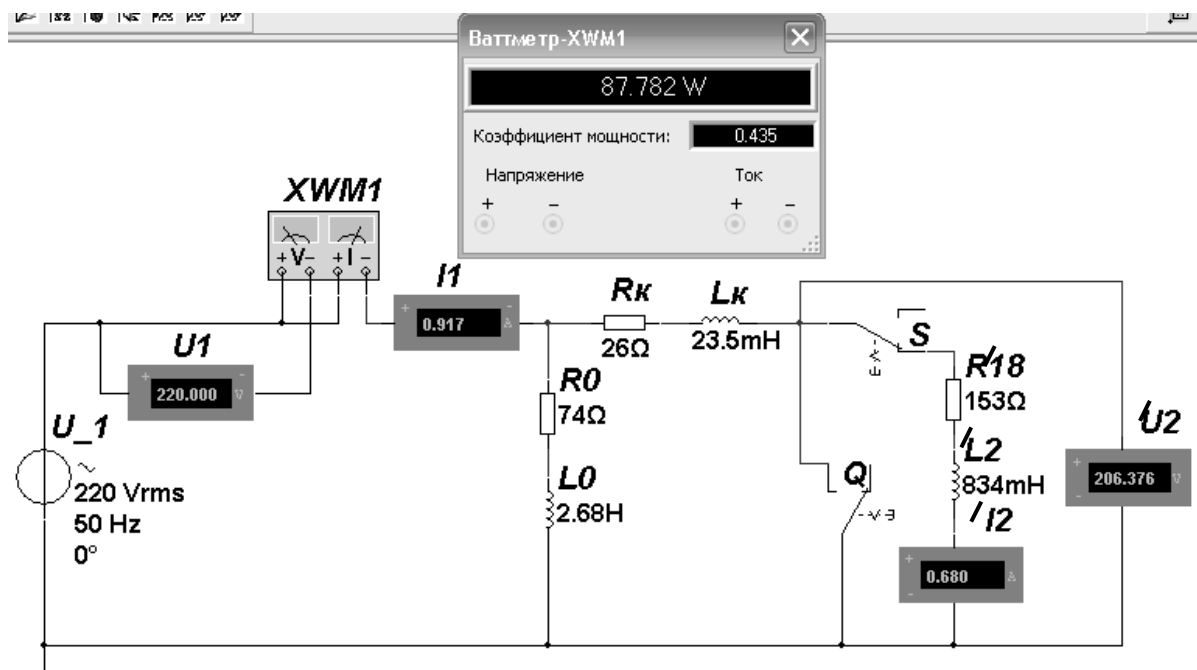


Рисунок 8.7 – Моделирование работы трансформатора в среде Multisim

#### *Содержание отчёта*

Отчёт по работе должен содержать цель работы, схему трансформатора в режиме холостого хода и короткого замыкания, основные расчётные формулы, результаты эксперимента и расчёта (см. таблицы 8.1 и 8.2), внешнюю характеристику трансформатора, выводы по работе.

#### *Контрольные вопросы*

- 1 Опишите принцип работы однофазного трансформатора.
- 2 Определение параметров схемы замещения трансформатора с помощью опытов холостого хода и короткого замыкания.
- 3 Опишите моделирование работы трансформатора в среде Multisim.

## Список литературы

1 **Марченко, А. Л.** Электротехника и электроника : учебник в 2 т. Т. 1 : Электротехника / А. Л. Марченко, Ю. Ф. Опачий. – Москва : ИНФРА-М, 2015. – 574 с.

2 **Рыбков, И. С.** Электротехника : учебное пособие / И. С. Рыбков. – Москва : РИОР ; ИНФРА-М, 2017. – 160 с.

3 **Касаткин, А. С.** Курс электротехники : учебник / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 8-е изд., стереотип. – Москва : Высшая школа, 2005. – 541 с.

4 **Панфилов, Д. И.** Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Лаборатория на компьютере / Д. И. Панфилов, В. С. Иванов, И. Н. Чепурин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : МЭИ, 2004. – 304 с.

5 **Марченко, А. Л.** Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim : учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко, С. В. Освальд. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 448 с.

