

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Сибирский государственный автомобильно-дорожный  
университет (СибАДИ)»

И.В. Лазута, И.А. Реброва

## ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Лабораторный практикум

Омск  
СибАДИ  
2017

УДК 621.3  
ББК 31.2  
Л17

---

Согласно 436-ФЗ от 29.12.2010 «О защите детей от информации, причиняющей вред их здоровью и развитию» данная продукция маркировке не подлежит.

---

*Рецензенты:*

канд. техн. наук, доц. О.А. Ясырова (ОАИИ ФГКВОУ ВО филиал «ВА МТО»);  
канд. техн. наук, доц. А.А. Руппель (ОИВТ филиал ФГБОУ ВО «СГУВТ»)

Работа утверждена редакционно-издательским советом СибАДИ в качестве лабораторного практикума.

**Лазута, Иван Васильевич.**

**Л17 Электротехника** : лабораторный практикум / И.В. Лазута, И.А. Реброва. – Омск : СибАДИ, 2017. – 80 с.  
ISBN 978-5-00113-004-8.

Содержит краткие теоретические сведения, методику и порядок выполнения лабораторных работ по электротехнике.

Предназначен для выполнения лабораторных работ по дисциплинам «Общая электротехника и электроника», «Электротехника и электроника», «Электроника и электротехника», «Электротехника, электроника и схемотехника», «Электроника, электротехника и электропривод», «Электротехника, электроника и электрооборудование», «Теоретические основы электротехники» обучающимися всех направлений подготовки и форм обучения.

Работа подготовлена на кафедре «Автоматизация производственных процессов и электротехника».

УДК 621.3  
ББК 31.2

ISBN 978-5-00113-004-8

© ФГБОУ ВО «СибАДИ», 2017

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	4
Правила охраны труда и электробезопасности при выполнении лабораторных работ .....	5
Описание стенда и измерительных приборов .....	8
Требования к отчету по лабораторным работам .....	12
<b>Лабораторная работа №1.</b> Измерение электрических величин .....	14
<b>Лабораторная работа №2.</b> Разветвлённая цепь постоянного тока.....	24
<b>Лабораторная работа №3.</b> Последовательное соединение резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов.....	31
<b>Лабораторная работа №4.</b> Параллельное соединение резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов.....	41
<b>Лабораторная работа №5.</b> Трёхфазная электрическая цепь при соединении фаз приемника «звездой» .....	47
<b>Лабораторная работа №6.</b> Трёхфазная электрическая цепь при соединении фаз реактивного приемника «звездой».....	55
<b>Лабораторная работа №7.</b> Трёхфазная электрическая цепь при соединении фаз приемника «треугольником».....	61
<b>Лабораторная работа №8.</b> Однофазный трансформатор.....	67
Библиографический список.....	79

## ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные занятия являются одним из важнейших элементов учебного процесса высшего учебного заведения. При проведении лабораторных работ преследуются следующие основные цели:

- 1) приобретение практических навыков работы с оборудованием и измерительными приборами;
- 2) приобретение навыков обработки и анализа экспериментально полученных данных.
- 3) экспериментальное подтверждение теоретических знаний и их критическое осмысление;
- 4) развитие творческого мышления и любознательности у студентов.

Лабораторные занятия по электротехнике представляют собой экспериментальную практическую работу и закрепляют теоретический материал, который студенты проходят на лекциях и в ходе самостоятельной теоретической подготовки.

В процессе выполнения лабораторных работ по электротехнике студенты знакомятся с устройством и принципом работы электроизмерительных приборов, устройств и машин; осваивают технику электрических измерений и методику проведения лабораторного эксперимента, чтения и монтажа электрических схем; самостоятельно решают несложные вопросы исследовательского характера.

Поэтому практические навыки, приобретенные при выполнении лабораторных работ, не могут быть компенсированы другими видами учебных занятий. К подготовке, выполнению, обработке и анализу экспериментальных данных, а также к защите лабораторных работ студенты должны относиться очень серьезно и ответственно.

## ПРАВИЛА ОХРАНЫ ТРУДА И ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

С обучающимися, прибывшими для проведения лабораторных занятий в учебную лабораторию, должен проводиться *первичный инструктаж* по охране труда и технике безопасности на рабочем месте.

Первичный инструктаж на рабочем месте проводит непосредственный руководитель работ (преподаватель или инженер лаборатории) с каждым обучающимся или группой обучающихся. Первичный инструктаж сопровождается устной проверкой знаний. О проведении первичного инструктажа на рабочем месте и проверке знаний инструктор делает запись в специальный журнал с обязательной подписью инструктируемого и инструктирующего.

Если обучающийся не прошёл проверку знаний или проявил злостное нарушение правил охраны труда и электробезопасности, то он отстраняется от работ до успешного прохождения проверки знаний, приобретённых на первичном инструктаже. Основанием для отстранения может стать служебная записка от руководителя работ, проводившего инструктаж и/или проверку знаний.

По положениям правил охраны труда [6], пожарной и электробезопасности при нахождении в учебной лаборатории обучающимся **ЗАПРЕЩАЕТСЯ**:

- находиться в учебной лаборатории в верхней одежде, складывать верхнюю одежду на столы и стулья;
- открывать и потреблять еду и напитки;
- проявлять излишнюю физическую активность (бегать, прыгать, бить, бороться, баловаться и пугать окружающих).

Учебная лаборатория для проведения лабораторных работ по электротехнике представляет собой действующий объект, т.к. на оборудование лаборатории подано или в любой момент может быть подано напряжение. Основным опасным для здоровья и жизни человека фактором в лаборатории является поражение электрическим током. Тело человека обладает свойством электропроводности, и при соприкосновении с неизолированными элементами стенда, находящимися под напряжением, через него начнёт протекать электрический ток.

Электрический ток может вызвать электрический ожог или нанести тяжелые поражения нервной, сердечной и дыхательной системам человека. Степень поражения электрическим током зависит от величины тока и продолжительности его действия, а также от частоты,

пути прохождения через тело человека и индивидуальных свойств организма. Опасность поражения электрическим током возрастает с увеличением напряжения. Ток силой 0,05 А опасен, а силой 0,1 А – смертелен. Согласно «Правилам устройства электроустановок. Издание 7» безопасным при эксплуатации считается действующее значение напряжения переменного тока 25 В и постоянного тока 60 В [5].

Основными опасными зонами лабораторных стендов являются клеммы источников питания, измерительных приборов и устройств, подключаемых в электрическую цепь [6]. Соединительные провода, используемые для монтажа электрической цепи, имеют изоляционное покрытие и специальные вилочные наконечники для фиксации винтовыми зажимными клеммами стенда. Питание на стенды лаборатории подается с общего вводного распределительного щита. Стенд оборудован индивидуальным выключателем, отключающим стенд от общей сети питания, и защитными автоматами-выключателями, срабатывающими при превышении определённых значений тока в цепи. Также в лаборатории имеется контур электрического заземления, к которому подключен каждый действующий стенд. На случай возгорания в лаборатории имеется порошковый огнетушитель.

До непосредственного выполнения лабораторных работ допускаются обучающиеся, достигшие совершеннолетия (18 лет).

Перед началом работы руководитель работ проверяет целостность заземляющих проводов и шин заземления, исправность оборудования и приборов; обесточивает лабораторные стенды с общего распределительного щита, о чём устно сообщает обучающимся и сотрудникам лаборатории. При наличии неисправностей оборудования и контуров заземления их нужно устранить.

Во время непосредственного проведения работ руководитель работ лично проверяет электрическую цепь, оценивает правильность монтажа и выполнение требований электробезопасности, после чего дает разрешение на включение стенда. Во время работ руководитель ведет постоянный контроль соблюдения требований охраны труда и техники безопасности.

При проведении лабораторных работ в учебной лаборатории обучающимся ЗАПРЕЩАЕТСЯ:

- приступать к монтажу схемы, не убедившись в том, что стенд обесточен;
- проверять пальцами наличие напряжения между выводами источников питания или линейных проводов генератора;

- использовать устройства, приборы и соединительные провода с повреждениями, загрязнениями и нарушением изоляции;
- проводить монтажные работы на высоте более 1,3 м;
- самостоятельно включать стенд без проверки электрической цепи и разрешения руководителя работ;
- наступать на провода и кабели временной прокладки; касаться обнаженными частями тела клемм стенда и приборов, наконечников проводов и прочих токопроводящих элементов стенда при наличии напряжения на стенде;
- оставлять рабочее место без присмотра при включенном стенде;
- перекрывать проход по лаборатории вдоль стендов стульями и иными предметами мебели;
- проводить изменение структуры цепи или её демонтаж при наличии напряжения на стенде.

По окончании работы обучающийся обязан доложить результаты руководителю и получить его разрешение на выключение стенда и демонтаж цепи. После окончания работ руководитель обязан отключить общий рубильник или автоматический выключатель на вводном распределительном щите.

При ВОЗНИКНОВЕНИИ ОПАСНОЙ СИТУАЦИИ на рабочем месте (короткого замыкания цепи, обрыва заземляющих проводов, нагрева, искрения, появления запаха, дыма или шума в оборудовании, срабатывания автоматов защиты сети и т.д.) НЕМЕДЛЕННО обесточить стенд и сообщить о случившемся руководителю работ.

При ПОПАДАНИИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТОКА незамедлительно обесточить стенд, отключить общий рубильник и сообщить о случившемся руководителю работ. В случае невозможности мгновенного отключения стенда поражаемого необходимо отстранить от источника поражения, используя непроводящие ток предметы интерьера, одежды и обуви. При необходимости оказать пострадавшему доврачебную помощь, используя конкретные правила, методы и приёмы оказания первой медицинской помощи. Транспортировать пострадавшего в ближайшее лечебное учреждение. О случившемся доложить в отдел охраны труда.

При ВОЗГОРАНИИ оборудования лаборатории отключить общий рубильник и сообщить о случившемся руководителю работ. При необходимости эвакуировать обучающихся, воспользоваться порошковым огнетушителем и вызвать подразделение МЧС по телефону 01.

## ОПИСАНИЕ СТЕНДА И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Учебная лаборатория электротехники и электроники оснащена стендами марки ЛЭС-5. Эти стенды предназначены для выполнения лабораторных работ по дисциплинам электротехнического цикла, читаемым обучающимся всех форм обучения в СибАДИ.

Стенд ЛЭС-5 имеет:

- 1) стол;
- 2) приборный щит;
- 3) внешние электротехнические устройства: лабораторный автотрансформатор, катушка индуктивности, ползунковый реостат;
- 4) переносные измерительные приборы: ваттметр, амперметр, вольтметр, мультиметр.

Приборный щит включает шесть блоков:

- блок распределительный 1;
- блок конденсаторов 2;
- блок источников постоянного напряжения 3;
- блок ламп накаливания 4;
- блок трёхфазного трансформатора 5;
- блок резисторов 6.

Блок распределительный (БР) предназначен для включения стенда, питания источников постоянного напряжения и вывода на панель блока подводимого трёхфазного напряжения.

Включение стенда осуществляется пакетным трёхфазным выключателем. Для защиты стенда от коротких замыканий установлен трёхфазный автомат защиты сети ВА 47-29.

К клеммной колодке блока подводится трёхфазная система электропитания с действующим значением линейного напряжения 220 В. На панели блока имеются клеммы трёх фаз (А, В, С) и нейтрального провода (0). Для каждой фазы имеется световая индикация неоновыми лампами. На передней панели имеются розетки Ш1 (напряжение 127 В, фаза – ноль) и Ш2 (напряжение 220 В, линейное).

Блок конденсаторов представлен набором из 10 конденсаторов, соединенных параллельно и образующих конденсатор переменной ёмкости. Ввод конденсаторов в цепь осуществляется тумблерами, выводы конденсаторов соединены с двумя общими клеммами. Ёмкость конденсаторов изменяется дискретно в интервале от 0,25 до 44,75 мкФ. Кроме того, в блоке имеются три дополнительных конденсатора с номиналом 10, 20 и 30 мкФ.



Блок источников постоянного напряжения осуществляет преобразование подводимого к стенду переменного трёхфазного напряжения в напряжение постоянного тока. Блок состоит из однофазного трансформатора, имеющего одну первичную обмотку и три понижающих вторичных обмотки, к каждой из которых по двухполупериодной схеме подключены полупроводниковые диоды, выполняющие роль выпрямителей. Выпрямленное напряжение с каждой обмотки выводится на панель блока в виде клемм источников постоянного напряжения  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ . Также в блоке питания имеются четыре отдельных полупроводниковых диода Д1 – Д4.

Блок ламп накаливания включает три группы ламп накаливания с номинальным напряжением 220 В и мощностью 25 Вт. В каждой группе имеется 5 ламп, соединенных параллельно. Наличие индивидуальных тумблеров выключения ламп обеспечивает изменение нагрузки в пределах от 0 до 125 Вт в группе. Каждая группа ламп имеет пару входных клемм А-Х, В-У, С-З. В лабораторных работах этот блок используется как активная нагрузка.

Блок трёхфазного трансформатора содержит три однофазных трансформатора ТПП 280-220-50К с первичными обмотками А-Х, В-У, С-З с номинальным напряжением 220 В и вторичными обмотками а-х, в-у, с-з. Благодаря раздельному исполнению трансформаторов можно реализовывать различные группы соединений обмоток.

Блок резисторов включает набор сопротивлений R1 – R7 и два выключателя В1 и В2.

В качестве индуктивного приёмника электрической энергии используется *катушка индуктивности*. Катушка индуктивности совместно с конденсатором переменной ёмкости используются в лабораторных работах для исследования режимов резонанса в цепях однофазного синусоидального тока.

Источником регулируемого однофазного синусоидального напряжения является *лабораторный автотрансформатор* (ЛАТР), который подключается к распределительному блоку. Клеммы ЛАТРа А-Х соединяются с клеммами фазного напряжения блока А и 0, а к клеммам а-х подключается остальная часть схемы.

Для плавного регулирования силы тока или напряжения в электрических цепях постоянного и переменного тока используется *реостат* РСПС-2.

Для измерения электрических величин в лабораторных работах используются высокоточные стрелочные измерительные приборы.

*Амперметры Э537 и Э538* – электромагнитные аналоговые стрелочные приборы, используемые для определения величины тока в цепях с переменным или постоянным током.

Класс точности приборов: 0,5%.

Пределы измерения: 0,5; 1; 2,5; 5 А.

Количество делений шкалы: 100 дел.

Номинальная частота тока: 45...100...1500 Гц.

Рабочее положение прибора: горизонтальное.

Амперметр включается в цепь последовательно с нагрузкой. При изменении предела измерения прибор должен быть обесточен. Амперметры сконструированы таким образом, что их внутреннее сопротивление очень мало, поэтому при измерениях влиянием внутреннего сопротивления амперметров можно пренебречь.

*Вольтметр Э545* – электромагнитный аналоговый стрелочный прибор, используемый для определения величины напряжения в цепях с переменным или постоянным током.

Класс точности приборов: 0,5%.

Пределы измерения: 75; 150; 300; 450; 600 В.

Количество делений шкалы: 150 дел.

Номинальная частота тока: 45...100...400 Гц.

Рабочее положение прибора: горизонтальное.

Вольтметр включается в цепь параллельно участку, на котором измеряется напряжение. Изменение предела измерения может производиться при наличии напряжения в цепи. Вольтметры имеют очень большое внутреннее сопротивление, поэтому при измерении напряжения в лабораторных работах влиянием внутреннего сопротивления вольтметра можно пренебречь.

*Ваттметр Д5067* – электродинамический аналоговый стрелочный прибор, используемый для определения величины активной мощности в цепях с переменным или постоянным током.

Класс точности приборов: 0,5%.

Пределы измерения: 100; 150; 500; 750 Вт.

Количество делений шкалы: 100 дел.

Номинальная частота тока: 45...65...500 Гц.

Рабочее положение прибора: горизонтальное.

Ваттметр имеет две обмотки: токовую и потенциальную. Токовая обмотка прибора включается в цепь последовательно с нагрузкой, а потенциальная обмотка – параллельно участку, на котором измеряется мощность. Зажимы, отмеченные точкой или звездочкой (генера-

торные), соединяются вместе между собой и с проводом, идущим от источника энергии. При изменении предела измерения прибор должен быть обесточен. Ваттметры сконструированы таким образом, что внутреннее сопротивление токовой обмотки очень мало, а потенциальной – очень велико. Поэтому при измерениях влиянием ваттметра на параметры цепи можно пренебречь.

Также для измерения некоторых электрических величин при выполнении лабораторных работ используется мультиметр – комбинированный электронный измерительный прибор, объединяющий в себе несколько функций, таких как измерение постоянного и переменного тока и напряжения, сопротивления, ёмкости, индуктивности, частоты, проверки биполярных транзисторов, температуры с автоматическим выбором предела измерений.

При измерениях следует внимательно следить за стрелочными приборами. Если стрелка выходит за пределы шкалы, необходимо проводить измерения с большим пределом измерения. Если стрелка находится на нерабочем участке шкалы, необходимо проводить измерения с меньшим пределом измерения. Следует помнить, что точность измерения тем выше, чем ближе стрелка прибора к концу шкалы.

## **ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЁТУ ПО ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ**

По результатам эксперимента каждый студент выполняет расчеты, строит диаграммы, графики и оформляет отчет. Отчеты по лабораторным работам выполняются в отдельной тетради или на листах формата А4 рукописным способом.

Каждый отчет должен содержать:

- 1) название работы;
- 2) цель работы;
- 3) электрическую схему эксперимента, указанную в методике выполнения работы;
- 4) таблицы измерений и вычислений, указанные в порядке выполнения работы;
- 5) расчетные формулы, используемые для вычислений;
- 6) векторные диаграммы и графики, указанные в порядке выполнения работы;
- 7) выводы.

Схемы электрические выполняются с соблюдением требований стандартов ЕСКД (ГОСТ 2.721–74... ГОСТ 2.768–90).

Электрические и магнитные величины (ЭДС, напряжение, ток, сопротивление, мощность и др.), а также размерности должны записываться в соответствии с табл. Т.1.

Векторные диаграммы и графики выполняются с помощью чертежных принадлежностей с соблюдением выбранных масштабов, которые указываются на рисунках. При изображении нескольких графиков в одних координатных осях необходимо для каждой изображаемой величины показать отдельную шкалу с масштабом.

При оформлении отчета и подготовке к защите лабораторных работ должна использоваться рекомендуемая для изучения курса литература [1, 2, 3, 4].

Если студент не успевает до конца занятия оформить отчет, он должен представить преподавателю оформленный отчет на следующем занятии. В противном случае к очередной лабораторной работе студент не допускается. После оформления отчета каждый студент должен отчитаться перед преподавателем сразу или после окончания определенного цикла работ.

### Названия и обозначения основных электрических и магнитных величин

Величина		Единица измерения	
Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
Электродвижущая сила (ЭДС)	$E$	Вольт	В
Напряжение	$U$	Вольт	В
Потенциал	$\varphi$	Вольт	В
Величина (сила) тока	$I$	Ампер	А
Частота тока линейная	$f$	Герц	Гц
Частота тока циклическая	$\omega$	РадIAN в секунду	рад/с
Сопротивление активное	$R$	Ом	Ом
Сопротивление реактивное индуктивное	$X_L$	Ом	Ом
Сопротивление реактивное ёмкостное	$X_C$	Ом	Ом
Сопротивление полное	$Z$	Ом	Ом
Проводимость активная	$G$	Сименс	См
Проводимость реактивная индуктивная	$B_L$	Сименс	См
Проводимость реактивная ёмкостная	$B_C$	Сименс	См
Проводимость полная	$Y$	Сименс	См
Мощность активная	$P$	Ватт	Вт
Мощность реактивная	$Q$	Вольт-ампер реактивный	вар
Мощность полная	$S$	Вольт-ампер	ВА
Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	–	–
Ёмкость	$C$	Фарада	Ф
Индуктивность	$L$	Генри	Гн
Магнитодвижущая сила (МДС)	$F$	Ампер	А
Индукция магнитная	$B$	Тесла	Тл
Поток магнитный	$\Phi$	Вебер	Вб
Напряженность магнитного поля	$H$	Ампер на метр	А/м
Магнитное сопротивление	$R_M$	Ампер на вебер	А/Вб
Абсолютная магнитная проницаемость	$\mu_a$	Генри на метр	Гн/м

При подготовке к выполнению лабораторных работ студент должен выполнить или распечатать заготовку к работе (название работы, цель, таблицы измерений и вычислений). Режим доступа: <http://portal23.sibadi.org/mod/folder/view.php?id=13360>.

## Лабораторная работа № 1

### ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

**Цель работы:** определение значений электрических величин прямым и косвенным методами, оценка погрешностей измерений.

#### Общие сведения

*Измерение* – процесс нахождения значения физической величины опытным путём с помощью специальных технических средств.

*Метод измерений* – совокупность приёмов использования принципов и средств измерений.

Методы измерений определяются физическим характером измеряемой величины, требуемой точностью измерений, необходимой скоростью измерения, условиями и пр.

Наибольшее распространение получила классификация по общим приёмам получения результатов измерений, согласно которой измерения делятся на прямые, косвенные, совместные и совокупные.

Наиболее часто применяются *прямые* измерения, состоящие в том, что искомое значение величины находят из опытных данных путем экспериментального сравнения. Математически прямые измерения можно охарактеризовать элементарной формулой  $A = x$ .

Если искомое значение величины находят на основании известной закономерности между этой величиной и величинами, найденными прямыми измерениями, то этот метод измерений называют *косвенным*. Уравнение косвенного измерения  $A = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , где  $x_i$  – результат  $i$ -го прямого измерения.

*Средство измерений* – это техническое средство (или их комплекс), предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее и (или) хранящее единицу физической величины, размер которой принимается неизменным (в пределах установленной погрешности) в течение известного интервала времени.

В соответствии с методом измерений различают электроизмерительные приборы:

- непосредственной оценки (амперметры, вольтметры, омметры и т.д.);
- сравнения (потенциометры, измерительные мосты).

К метрологическим характеристикам средств измерений относят те, которые оказывают влияние на результаты и погрешности измерений. Среди них можно выделить несколько основных:

- ✓ градуировочные характеристики, определяющие зависимость выходного сигнала от входного; пределы измерения; цена деления шкалы для аналоговых приборов; вид и параметры цифрового кода цифровых приборов;

- ✓ динамические характеристики, отражающие инерционные свойства средств измерений и необходимые для оценивания динамических погрешностей измерений;

- ✓ инструментальные составляющие погрешности измерения;

- ✓ функции влияния, отражающие зависимость метрологических характеристик средств измерений от воздействия влияющих величин или неинформативных параметров (напряжение, частота сети и т.д.).

Метрологические характеристики нормируются для нормальных условий применения средств измерений. Нормальными считаются такие условия, при которых изменением метрологических характеристик под воздействием влияющих величин можно пренебречь. Для многих типов средств измерений нормальными условиями применения считаются: температура окружающей среды ( $20 \pm 10$ ) °С, напряжение питающей сети ( $220 \pm 4,4$ ) В, частота сети ( $50 \pm 0,5$ ) Гц.

*Предел измерения* – максимальное значение физической величины, определяемое данным средством измерений,  $A_N$ .

*Цена деления* – количество единиц измеряемой величины, приходящихся на одно деление шкалы измерительного прибора,  $C_A$ .

Шкалы могут быть именованными, т.е. градуированными в единицах измеряемых величин, или условными. Условные шкалы применяются в многопредельных приборах. Тогда цену деления шкалы определяют как отношение предела измерения прибора  $A_N$  к общему числу делений  $N_A$  его шкалы, т.е.

$$C_A = \frac{A_N}{N_A}.$$

Числовое значение измеряемой величины

$$A = C_A N_{xA},$$

где  $N_{xA}$  – число делений, отсчитанных по шкале до показания стрелки.

*Класс точности* средства измерения – обобщённая характеристика средства измерения, определяемая пределами допускаемых основных и дополнительных погрешностей, а также другими свойствами средств измерений, влияющими на точность, значения которых устанавливаются в стандартах на отдельные виды средств измерений.

Класс точности средств измерений характеризует их свойства в отношении точности, но не является непосредственным показателем точности измерений. Это связано с тем, что погрешность измерений зависит ещё от ряда факторов: метода измерений, условий измерений и т.д. Класс точности лишь позволяет судить о том, в каких пределах находится погрешность средства измерения данного типа.

*Погрешностью измерения* называется отклонение результата измерения от истинного значения измеряемой величины. Так как истинное значение измеряемой величины неизвестно, то при количественной оценке погрешности пользуются действительным значением физической величины.

По характеру проявления погрешности измерений подразделяются на три основных класса: систематические, случайные и грубые (промахи).

*Систематические* погрешности – составляющие погрешности измерений, остающиеся постоянными или закономерно изменяющиеся при многократных измерениях одной и той же величины в одних и тех же условиях.

*Случайные* погрешности – составляющие погрешности измерений, изменяющиеся случайным образом по значению и по знаку при повторных измерениях одной и той же физической величины в одних и тех же условиях. Практически случайные погрешности неизбежны, неустранимы и всегда имеют место в результате измерения. Однако их можно уменьшить путем многократного измерения физической величины и последующей статистической обработкой полученных результатов.

*Грубые* погрешности (*промахи*) – погрешности, существенно превышающие ожидаемые при данных условиях измерения. Данные погрешности возникают из-за ошибок оператора или неучтенных внешних воздействий. В случае однократного измерения промах обнаружить нельзя. При многократных измерениях промахи выявляют в процессе обработки результатов и исключают из рассмотрения, пользуясь определенными правилами.



По причинам возникновения погрешности измерения подразделяются на методические, инструментальные, внешние и субъективные.

*Методические* погрешности возникают из-за несовершенства метода измерений, некорректности алгоритмов или формул, по которым производятся вычисления результатов измерений, отличия принятой модели объекта измерения от той, которая правильно описывает его свойство, определяемое путем измерения, а также из-за влияния выбранного средства измерений на измеряемые параметры сигналов.

*Инструментальные* (приборные) погрешности возникают из-за несовершенства средства измерений. Источниками инструментальных погрешностей могут быть, например, неточная градуировка прибора и смещение нуля, вариация показаний прибора в процессе эксплуатации.

*Внешняя* погрешность – составляющая погрешности измерения, связанная с отклонением одной или нескольких влияющих величин от нормальных значений или выходом за пределы нормальной области (влажность, температура, нестабильность источников питания).

*Субъективные* погрешности вызываются ошибками оператора при отсчете показаний средств измерения.

По характеру поведения измеряемой величины в процессе измерений различают статические и динамические погрешности.

*Статические* погрешности возникают при измерении установившегося значения измеряемой физической величины.

*Динамические* погрешности имеют место при динамических измерениях, когда измеряемая величина изменяется во времени и требуется установить закон ее изменения. Причина появления динамических погрешностей состоит в несоответствии скоростных (временных) характеристик прибора и скорости изменения измеряемой величины.

По условиям эксплуатации средств измерений различают основную и дополнительную погрешности.

*Основная* погрешность средства измерений имеет место при нормальных условиях эксплуатации, оговоренных в регламентирующих документах (паспорт, ТУ).

*Дополнительная* погрешность средства измерений возникает вследствие выхода какой-либо из влияющих величин за пределы нормальной области значений.

По форме количественного выражения погрешности измерения делятся на абсолютные, относительные и приведенные.

*Абсолютной* погрешностью  $\Delta A$ , выражаемой в единицах измеряемой величины, называется отклонение результата измерения  $A$  от истинного значения  $A_0$ :

$$\Delta A = A - A_0.$$

Абсолютная погрешность характеризует величину и знак полученной погрешности, но не определяет точность самого измерения. Чтобы иметь возможность сравнивать точность измерений, используют относительную погрешность.

*Относительной* погрешностью  $\delta$  называется отношение абсолютной погрешности результата измерения к истинному значению измеряемой величины

$$\delta = \frac{\Delta A}{A_0} 100\%.$$

*Приведённой* погрешностью  $\gamma$ , выражающей потенциальную точность измерений, называется отношение абсолютной погрешности к некоторому нормирующему значению (например, конечное значение шкалы прибора, предел измерений)

$$\gamma = \frac{\Delta A}{A_N} 100\%.$$

Часто класс точности электроизмерительных приборов  $K_A$  характеризуют приведённой погрешностью

$$\gamma = \pm K_A,$$

где  $K_A$  – отвлечённое положительное число, выбираемое из ряда предпочтительных чисел:  $1 \cdot 10^n$ ;  $1,5 \cdot 10^n$ ;  $2 \cdot 10^n$ ;  $2,5 \cdot 10^n$ ;  $4 \cdot 10^n$ ;  $5 \cdot 10^n$ ;  $6 \cdot 10^n$ ; ( $n = 1, 0, -1, -2, \dots$ ).

Класс точности указывают на шкале прибора. Например, указанный на вольтметре класс точности 1,5 означает, что его приведённая погрешность не превышает 1,5%.

Функциональную зависимость косвенно измеряемой величины и величин, найденных прямыми измерениями, можно представить в виде

$$A = kx_1^\alpha x_2^\beta \dots x_n^\gamma,$$

где  $k, \alpha, \beta, \gamma$  – константы;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – результаты прямых измерений.

Тогда для определения относительной погрешности косвенного измерения применяют следующее выражение:

$$\delta_A = \sqrt{(\alpha\delta_{x_1})^2 + (\beta\delta_{x_2})^2 + \dots + (\gamma\delta_{x_n})^2}.$$

Результат прямого или косвенного измерений представляют в виде доверительного интервала

$$A_0 = A \pm \Delta A.$$

### **Вопросы для допуска к работе**

1. Какие методы используют при измерении электрических величин?
2. Как установить предел измерений в многопредельных приборах?
3. Как определить цену деления амперметра, вольтметра, ваттметра для заданных пределов измерений?
4. Как определить класс точности амперметра, вольтметра, ваттметра, используемых для проведения измерений?

### **Методика выполнения работы**

Для различных видов нагрузки (лампы накаливания, катушка индуктивности, конденсатор) проводятся измерения тока, напряжения, активной мощности, активного сопротивления и коэффициента мощности. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 1.1.

В работе используются следующие измерительные приборы:

- амперметр стрелочный с пределами измерения 1 А и 2,5 А;
- вольтметр стрелочный с пределом измерения 150 В;
- ваттметр стрелочный с пределом измерений 100 Вт.

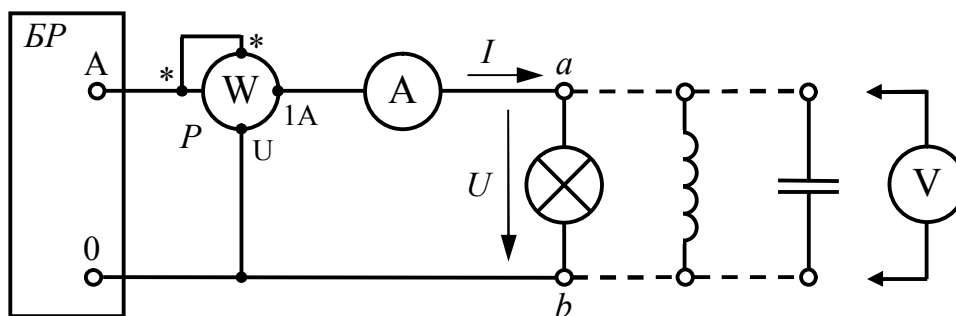


Рис. 1.1. Схема принципиальная измерения электрических величин

Чтобы измерение было более точным, желательно устанавливать такой предел измерения, чтобы стрелка отсчётного устройства прибора при измерении находилась во второй половине шкалы.

### Порядок выполнения работы

#### *Экспериментальная часть*

1. Записать параметры измерительных приборов в табл. 1.1.
2. Убедиться в отсутствии напряжения на стенде, проверив главный выключатель и защитные автоматы-выключатели.
3. Произвести монтаж цепи согласно схеме на рис. 1.1, подключив к точкам схемы *a* и *b* клеммы лампы накаливания (активная нагрузка). С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.
4. Записать количество делений, на которое отклоняются стрелки амперметра, вольтметра, ваттметра в первую строку табл. 1.1.
5. Выключить стенд. Присоединить к точкам схемы *a* и *b* клеммы катушки индуктивности (активно-индуктивная нагрузка), отсоединив лампы накаливания. Включить стенд.
6. Провести измерения и занести показания приборов во вторую строку табл. 1.1.
7. Выключить стенд. Присоединить к точкам схемы *a* и *b* клеммы конденсатора 20 мкФ (ёмкостная нагрузка), отсоединив катушку индуктивности. Включить стенд.
8. Провести измерения и занести показания приборов в табл. 1.1.
9. Выключить стенд. Результаты измерений показать преподавателю и с его разрешения разобрать цепь.

Таблица 1.1

**Параметры и показания измерительных приборов\***

Вид нагрузки	Амперметр				Вольтметр				Ваттметр			
	$N_{xI}$ , дел.	$I_N$ , А	$N_I$ , дел.	$K_I$ , %	$N_{xU}$ , дел.	$U_N$ , В	$N_U$ , дел.	$K_U$ , %	$N_{xP}$ , дел.	$P_N$ , Вт	$N_P$ , дел.	$K_P$ , %
Лампы												
Катушка												
Конденсатор												

\* в табл. 1.1 введены следующие обозначения:

$N_{xI}$ ,  $N_{xU}$ ,  $N_{xP}$  – показания стрелок амперметра, вольтметра и ваттметра.

$I_N$ ,  $U_N$ ,  $P_N$  – пределы измерения амперметра, вольтметра и ваттметра.

$N_I$ ,  $N_U$ ,  $N_P$  – число делений шкалы амперметра, вольтметра и ваттметра.

$K_I$ ,  $K_U$ ,  $K_P$  – классы точности амперметра, вольтметра и ваттметра.

*Расчётная часть*

1. По данным табл. 1.1 определить результаты прямых измерений электрических величин. Результаты вычислений занести в табл. 1.2.

Цена деления соответственно амперметра, вольтметра и ваттметра вычисляется по формулам:

$$C_I = \frac{I_N}{N_I}; \quad C_U = \frac{U_N}{N_U}; \quad C_P = \frac{P_N}{N_P}. \quad (1.1)$$

Измеренные значения тока, напряжения и активной мощности:

$$I = C_I N_{xI}; \quad U = C_U N_{xU}; \quad P = C_P N_{xP}. \quad (1.2)$$

2. По данным табл. 1.1 вычислить погрешности прямых измерений электрических величин. Результаты вычислений занести в табл. 1.2.

Абсолютные погрешности измерения тока, напряжения, активной мощности при однократных измерениях определяют, используя значения классов точности и пределов измерения соответственно амперметра, вольтметра, ваттметра:

$$\Delta I = \frac{\pm K_I I_N}{100\%}; \quad \Delta U = \frac{\pm K_U U_N}{100\%}; \quad \Delta P = \frac{\pm K_P P_N}{100\%}. \quad (1.3)$$

При определении относительной погрешности однократных измерений действительное значение величины заменяют измеренным:

$$\delta_I = \frac{\Delta I}{I} \cdot 100\%; \quad \delta_U = \frac{\Delta U}{U} \cdot 100\%; \quad \delta_P = \frac{\Delta P}{P} \cdot 100\%. \quad (1.4)$$

### Результаты и погрешности прямых измерений

Вид нагрузки	$\frac{C_I,}{\text{дел}}$ А	$\frac{C_U,}{\text{дел}}$ В	$\frac{C_P,}{\text{дел}}$ Вт	$I,$ А	$U,$ В	$P,$ Вт	$\Delta I,$ А	$\Delta U,$ В	$\Delta P,$ Вт	$\delta_I,$ %	$\delta_U,$ %	$\delta_P,$ %
Лампы												
Катушка												
Конденсатор												

3. По данным табл. 1.1 определить значения активного сопротивления и коэффициента мощности всех видов нагрузки (лампы накаливания, катушка индуктивности, конденсатор). Результаты вычислений занести в табл. 1.3.

Определение значений активного сопротивления  $R$  и коэффициента мощности  $\cos \varphi$  возможно с помощью косвенных измерений, используя известные функциональные зависимости этих величин от тока, напряжения и активной мощности, измеренных напрямую:

$$R = \frac{P}{I^2}; \quad (1.5)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}. \quad (1.6)$$

4. По данным табл. 1.2 вычислить погрешности косвенных измерений электрических величин. Результаты занести в табл. 1.3.

Относительную погрешность косвенных измерений активного сопротивления и коэффициента мощности вычисляют по формулам:

$$\delta_R = \sqrt{(2\delta_I)^2 + \delta_P^2}; \quad \delta_{\cos \varphi} = \sqrt{\delta_I^2 + \delta_U^2 + \delta_P^2}. \quad (1.7)$$

Абсолютные погрешности измерения активного сопротивления и коэффициента мощности:

$$\Delta R = \frac{\delta_R R}{100\%}, \quad \Delta \cos \varphi = \frac{\delta_{\cos \varphi} \cos \varphi}{100\%}. \quad (1.8)$$

5. Результаты прямых и косвенных измерений для всех видов нагрузки (лампы накаливания, катушка индуктивности, конденсатор) представить в виде доверительных интервалов:

$$I_0 = I \pm \Delta I; \quad U_0 = U \pm \Delta U; \quad P_0 = P \pm \Delta P;$$

$$R_0 = R \pm \Delta R; \quad \cos \varphi_0 = \cos \varphi \pm \Delta \cos \varphi. \quad (1.9)$$

Таблица 1.3

### Результаты и погрешности косвенных измерений

Вид нагрузки	$R$ , Ом	$\cos \varphi$ , –	$\Delta R$ , Ом	$\Delta \cos \varphi$ , –	$\delta_R$ , %	$\delta_{\cos \varphi}$ , %
Лампы						
Катушка						
Конденсатор						

### Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Что называют измерением, средством измерений, методом измерений?
2. Перечислите метрологические характеристики средств измерений.
3. Как определить цену деления шкалы стрелочного измерительного прибора?
4. Что такое класс точности измерительного прибора?
5. Что называют погрешностью измерений?
6. Как оценить точность измерений?
7. Перечислите причины возникновения погрешностей измерения.
8. Дайте определение систематической и случайной составляющим погрешности измерения.
9. Как определяют абсолютную, относительную и приведённую погрешности измерительного прибора?
10. Как вычисляют абсолютную и относительную погрешности косвенных измерений?
11. Как записать доверительный интервал результата измерений?

## Лабораторная работа № 2

### РАЗВЕТВЛЁННАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

**Цель работы:** приобретение навыков экспериментального определения параметров источника электрической энергии, проверка выполнения законов Кирхгофа и баланса мощностей в цепи постоянного тока.

#### Общие сведения

Задачей анализа и расчёта электрических цепей является определение токов, напряжений и мощностей отдельных её участков. Основой расчёта сложных электрических цепей являются закон Ома и два закона Кирхгофа.

*Закон Ома* для участка цепи в интегральной форме имеет вид

$$I = \frac{U}{R},$$

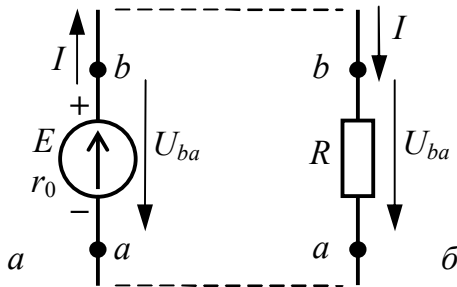
где  $U$  – напряжение на участке цепи;  $R$  – сопротивление участка цепи.

Для неоднородного участка цепи с источником ЭДС (рис. 2.1, а)

$$U_{ba} = \varphi_a - \varphi_b + E,$$

где  $(\varphi_a - \varphi_b)$  – разность потенциалов на концах участка;  $E$  – ЭДС, действующая на участке.

Тогда для такого участка, включающего источник ЭДС с внутренним сопротивлением  $r_0$ , закон Ома имеет следующий вид:



$$I = \frac{U_{ba}}{r_0} = \frac{\varphi_a - \varphi_b + E}{r_0}.$$

Для однородного участка цепи с внешним сопротивлением (рис. 2.1, б) закон Ома записывают в виде

$$I = \frac{U_{ba}}{R} = \frac{\varphi_b - \varphi_a}{R}.$$

Рис. 2.1. Схема электрической цепи:  
а – участок с источником ЭДС;  
б – участок с внешним сопротивлением



Согласно *первому закону Кирхгофа* алгебраическая сумма токов в любом узле электрической цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^n I_k = 0,$$

где  $n$  – число токов, сходящихся в узле. Токи, входящие и выходящие из узла, в уравнении должны учитываться с разными знаками: входящие в узел токи – со знаком плюс, выходящие из узла токи – со знаком минус. Например, для узла  $a$  схемы, изображённой на рис. 2.2, уравнение по первому закону Кирхгофа имеет вид

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0.$$

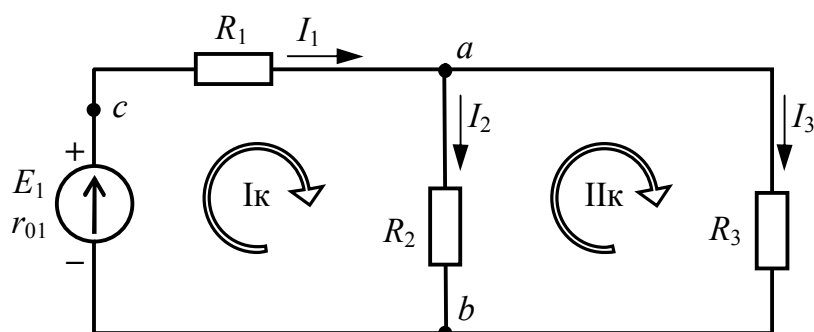


Рис. 2.2. Схема замещения разветвлённой цепи постоянного тока

Согласно *второму закону Кирхгофа* алгебраическая сумма напряжений участков любого контура электрической цепи равна нулю:

$$\sum_{k=1}^m U_k = 0,$$

где  $m$  – число участков контура. Со знаком плюс записываются напряжения, положительные направления которых совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура, и со знаком минус – противоположно направленные или наоборот. Например, для контура IIк (см. рис. 2.2) уравнение по второму закону Кирхгофа имеет вид

$$-R_2 I_2 + R_3 I_3 = 0.$$

В частности, для контура схемы замещения цепи, содержащего источник ЭДС и резистивные элементы, алгебраическая сумма напряжений на резистивных элементах равна алгебраической сумме ЭДС:

$$\sum_{k=1}^m R_k I_k = \sum_{i=1}^n E_i,$$

где  $m$  – число резистивных элементов;  $n$  – число источников ЭДС в контуре. Со знаком плюс записываются ЭДС и токи, положительные направления которых совпадают с произвольно выбранным направлением обхода контура, и со знаком минус – противоположно направленные или наоборот. Например, для контура  $I_k$  (см. рис. 2.2) уравнение по второму закону Кирхгофа имеет вид

$$R_1 I_1 + r_{01} I_1 + R_2 I_2 = E_1.$$

Для анализа электрических цепей постоянного тока используют *потенциальную диаграмму*,  $\varphi(R)$  – график зависимости потенциалов точек цепи от величины сопротивлений участков между этими точками, выполненный в масштабе.

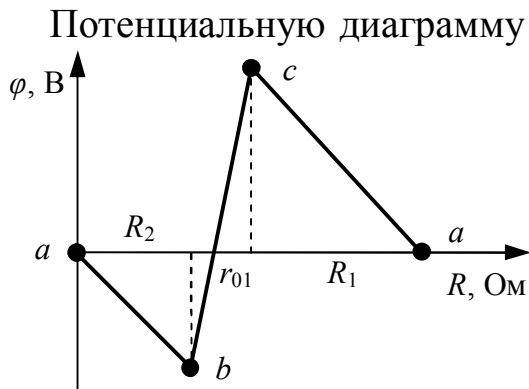


Рис. 2.3. Потенциальная диаграмма

строит для контура цепи: выбирают исходную точку, потенциал которой принимают равным нулю; определяют потенциалы остальных точек контура, используя закон Ома для участка цепи. Например, для контура  $I_k$  (см. рис. 2.2) потенциальная диаграмма при  $\varphi_a = 0$  представлена на рис. 2.3.

Для любой электрической цепи выполняется *баланс мощностей*: суммарная мощность  $P_{II}$ , развиваемая источниками электрической энергии (источниками тока и ЭДС), равна суммарной мощности  $P_{II}$ , расходуемой потребителями (резисторами),

$$\sum_k P_{Ik} = \sum_m P_{II m}.$$

Для потребителей электрической энергии, в частности, для резисторов, активная мощность всегда положительна:

$$P_R = RI^2.$$

Мощность источника ЭДС, в зависимости от направления падений напряжения и тока в нем, может иметь любой знак:

$$P_E = \pm EI.$$

Если направление протекания тока через источник противоположно падению напряжения на нём, то мощность источника положительна, т.е. он отдаёт энергию в электрическую цепь. В противном случае мощность источника отрицательна, и он является потребителем электрической энергии. Следует заметить, что направление падения напряжения всегда противоположно направлению ЭДС, поэтому для источника ЭДС условием положительной мощности является совпадение направлений ЭДС и тока.

### Вопросы для допуска к работе

1. Сформулируйте закон Ома. Дайте определение однородного и неоднородного участков электрической цепи.
2. Сформулируйте первый и второй законы Кирхгофа. Как выбирают знаки в уравнениях, составленных по этим законам?
3. Как составить баланс мощности для цепи постоянного тока?

### Методика выполнения работы

Исследуемая цепь постоянного тока состоит из трёх реальных источников постоянного напряжения (ЭДС) и трёх внешних потребителей – резисторов  $R_2$ ,  $R_6$ ,  $R_7$ . Цепь имеет разветвлённую структуру с тремя ветвями и двумя узлами  $a$  и  $c$ , образующими два независимых контура  $I_k$  и  $II_k$ . Схема разветвлённой цепи постоянного тока представлена на рис. 2.4. На схеме стрелками заданы положительные направления токов, напряжений и направлений обхода контуров.

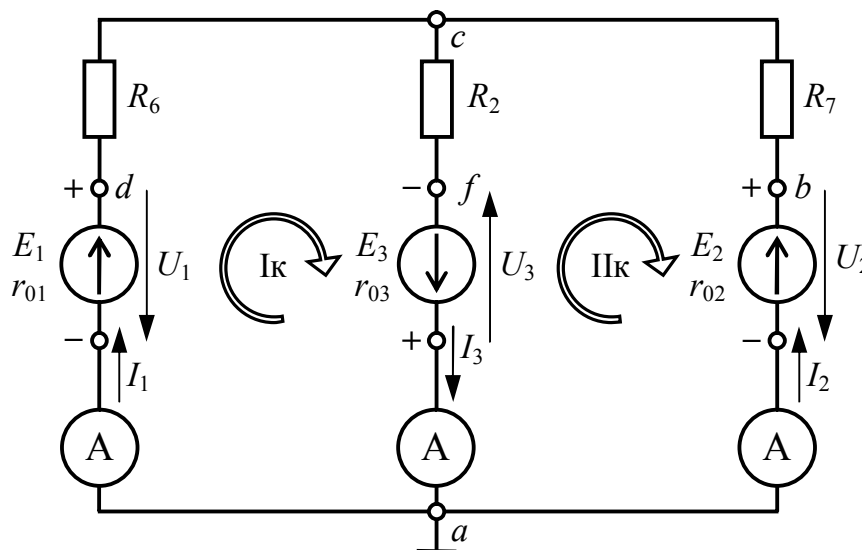


Рис. 2.4. Схема принципиальная исследуемой цепи постоянного тока

Используемые для измерений электрических величин приборы и их параметры представлены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

### Измерительные приборы, используемые в работе

Вид прибора	Измеряемая величина	Диапазон измерений	Предел измерений
Амперметр	Сила тока	–	0,5 А; 1 А
Мультиметр	Сопротивление	$\Omega$	200 Ом
	ЭДС	DCV	20 В; 200 В
	Разность потенциалов	DCV	20 В

Величина ЭДС измеряется при холостом ходе источника (внешние сопротивления отключены) в режиме DCV с учётом полярности источника. При измерении разности потенциалов мультиметром в режиме DCV вывод прибора «СОМ» необходимо подключать к точке, с заведомо меньшим потенциалом (узел цепи *a* или *c*).

### Порядок выполнения работы

#### Экспериментальная часть

1. Убедиться в отсутствии напряжения на стенде, проверив главный выключатель и защитные автоматы-выключатели.
2. Измерить мультиметром сопротивления резисторов  $R_2$ ,  $R_6$ ,  $R_7$ . Результаты измерений занести в табл. 2.2.
3. С разрешения преподавателя или инженера включить стенд и тумблер блока источников постоянного напряжения.
4. Измерить мультиметром ЭДС  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$  источников питания  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ . Результаты измерений занести в табл. 2.2.

Таблица 2.2

### Параметры источников и потребителей электрической цепи

$R_2$ , Ом	$R_6$ , Ом	$R_7$ , Ом	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$E_3$ , В

5. Выключить стенд. Произвести монтаж исследуемой цепи согласно схеме на рис. 2.4. С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.

6. Измерить с учётом цены деления токи в ветвях и разности потенциалов точек цепи. Результаты измерений занести в табл. 2.3.

7. Выключить стенд. Результаты измерений показать преподавателю и с его разрешения разобрать цепь.

Таблица 2.3

**Результаты измерений величин цепи постоянного тока**

$I_1, \text{A}$	$I_2, \text{A}$	$I_3, \text{A}$	$\varphi_d - \varphi_a, \text{В}$	$\varphi_b - \varphi_a, \text{В}$	$\varphi_f - \varphi_a, \text{В}$	$\varphi_d - \varphi_c, \text{В}$	$\varphi_b - \varphi_c, \text{В}$	$\varphi_f - \varphi_c, \text{В}$

*Расчётно-графическая часть*

1. По данным табл. 2.2, 2.3 определить внутренние сопротивления источников  $r_{01}, r_{02}, r_{03}$ . Результаты вычислений занести в табл. 2.4.

Расчёт внутренних сопротивлений  $r_{01}, r_{02}, r_{03}$  проводят, воспользовавшись законом Ома для неоднородного участка цепи. Например, для определения  $r_{01}$  запишем закон Ома для участка цепи  $a-d$ :

$$I_1 = \frac{\varphi_a - \varphi_d + E_1}{r_{01}}.$$

Отсюда выразим внутреннее сопротивление  $r_{01}$ :

$$r_{01} = \frac{\varphi_a - \varphi_d + E_1}{I_1} = \frac{-(\varphi_d - \varphi_a) + E_1}{I_1}.$$

2. Приняв потенциал точки  $a$  равным нулю ( $\varphi_a = 0$ ), рассчитать потенциалы всех точек. Результаты вычислений занести в табл. 2.4. Потенциалы точек  $b, c, d, f$  рассчитываются из измеренных разностей потенциалов, используя данные табл. 2.3

Таблица 2.4

**Результаты вычислений величин цепи постоянного тока**

$r_{01}, \text{Ом}$	$r_{02}, \text{Ом}$	$r_{03}, \text{Ом}$	$\varphi_a, \text{В}$	$\varphi_b, \text{В}$	$\varphi_c, \text{В}$	$\varphi_d, \text{В}$	$\varphi_f, \text{В}$
			0				

3. Построить в масштабе потенциальную диаграмму  $\varphi(R)$  для внешнего контура  $adcba$  при  $\varphi_a = 0$ .
4. Проверить выполнение первого и второго законов Кирхгофа для исследуемой цепи.
5. Составить баланс мощностей исследуемой цепи.

### **Вопросы и задания для защиты лабораторной работы**

1. Что такое постоянный электрический ток?
2. Что называют электродвижущей силой, электрическим потенциалом, напряжением?
3. Чем измеряется разность потенциалов?
4. Почему алгебраическая сумма токов в узле цепи равна нулю?
5. Сколько уравнений необходимо составить по первому и второму законам Кирхгофа, чтобы рассчитать все токи в разветвлённой электрической цепи?
6. В соответствии с каким законом определяется мощность в цепи постоянного тока?
7. Сформулируйте правило выбора знака мощности источника в балансе мощностей электрической цепи.

## Лабораторная работа № 3

### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТИВНОГО, ИНДУКТИВНОГО И ЁМКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТОВ

**Цель работы:** приобретение навыков экспериментального определения параметров приёмников, исследование характеристик неразветвлённой электрической цепи синусоидального тока при различных типах нагрузки, изучение режима резонанса напряжений.

#### Общие сведения

Электрическая цепь переменного тока может содержать электротехнические устройства, проявляющие особые электрические и магнитные свойства при переменном токе. К таким устройствам относятся асинхронные двигатели, трансформаторы, конденсаторы, катушки индуктивности и др. Данные электротехнические устройства можно рассматривать как совокупность *резистивного, индуктивного и ёмкостного* элементов, характеризующихся соответственно тремя параметрами: *активным сопротивлением  $R$ , индуктивностью  $L$  и ёмкостью  $C$ .*

При анализе цепи переменного тока необходимо рассматривать амплитудные и фазовые отношения между токами и напряжениями.

Действующие значения тока  $I_R$  и напряжения  $U_R$  на участке цепи переменного тока с *резистивным элементом* связаны законом Ома:

$$I_R = \frac{U_R}{R}.$$

В фазовом отношении ток и напряжение совпадают по фазе:

$$\psi_u = \psi_i.$$

Сопротивление резистивного элемента можно определить как

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление материала провода;  $l$  – длина провода;  $S$  – площадь поперечного сечения провода.

Действующее значение активной мощности

$$P_R = RI_R^2.$$

Комплексные значения тока и напряжения на резистивном элементе представлены на векторной диаграмме рис. 3.1, *a*.

Идеальный индуктивный элемент в цепи переменного тока оказывает току *реактивное индуктивное* сопротивление

$$X_L = \omega L = 2\pi fL.$$

Действующие значения тока  $I_L$  и напряжения  $U_L$  на участке цепи переменного тока с реактивным индуктивным сопротивлением  $X_L$  связаны по закону Ома.

$$I_L = \frac{U_L}{X_L} = \frac{U_L}{\omega L}.$$

В цепи с индуктивным элементом напряжение опережает ток по фазе на угол  $90^\circ$ :

$$\psi_u = \psi_i + 90^\circ.$$

Процесс обмена энергией между катушкой индуктивности и источником характеризует *реактивная индуктивная мощность*

$$Q_L = X_L I_L^2.$$

Комплексные значения тока и напряжения на индуктивном элементе представлены на векторной диаграмме рис. 3.1, б.

Идеальный ёмкостный элемент в цепи переменного тока оказывает току *реактивное ёмкостное* сопротивление

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Действующие значения тока  $I_C$  и напряжения  $U_C$  на участке цепи переменного тока с ёмкостным сопротивлением  $X_C$  связаны по закону Ома следующей зависимостью:

$$I_C = \frac{U_C}{X_C} = \omega C U_C.$$

В цепи с ёмкостным элементом ток опережает напряжение по фазе на угол  $90^\circ$ :

$$\psi_u = \psi_i - 90^\circ.$$

Процесс обмена энергией между конденсатором и источником характеризует *реактивная ёмкостная мощность*

$$Q_C = X_C I_C^2.$$

Комплексные значения тока и напряжения на ёмкостном элементе представлены на векторной диаграмме рис. 3.1, в.



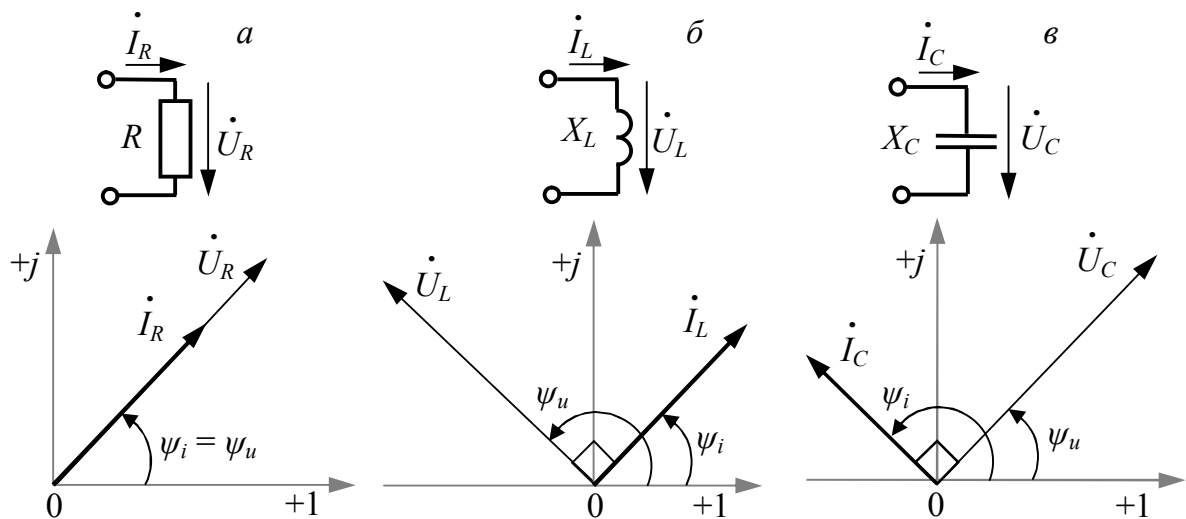


Рис. 3.1. Векторные диаграммы токов и напряжений для участка цепи:  
*a* – с резистивным элементом; *б* – с идеальным индуктивным элементом;  
*в* – с ёмкостным элементом

Комплексное напряжение на участке цепи, содержащем последовательное соединение резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов (рис. 3.2, *a*) определяется согласно второму закону Кирхгофа как сумма комплексных напряжений на каждом элементе:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C = R\dot{I} + jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I}.$$

Комплексное сопротивление участка с последовательным соединением резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов

$$\underline{Z} = R + j(X_L - X_C) = Ze^{j\varphi},$$

где  $Z$  – полное сопротивление последовательного  $RLC$  участка цепи;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением на этом участке.

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = \psi_u - \psi_i.$$

Закон Ома для последовательного  $RLC$  участка цепи:

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{\dot{U}}{R + j(X_L - X_C)}.$$

Векторная диаграмма последовательного  $RLC$  участка цепи (рис. 3.2, *б*) учитывает фазовые соотношения между током и напря-

жением на резистивном, индуктивном и ёмкостном элементах. Разделив напряжения (рис. 3.2, б) на силу тока, получим треугольник сопротивлений (рис. 3.2, в).

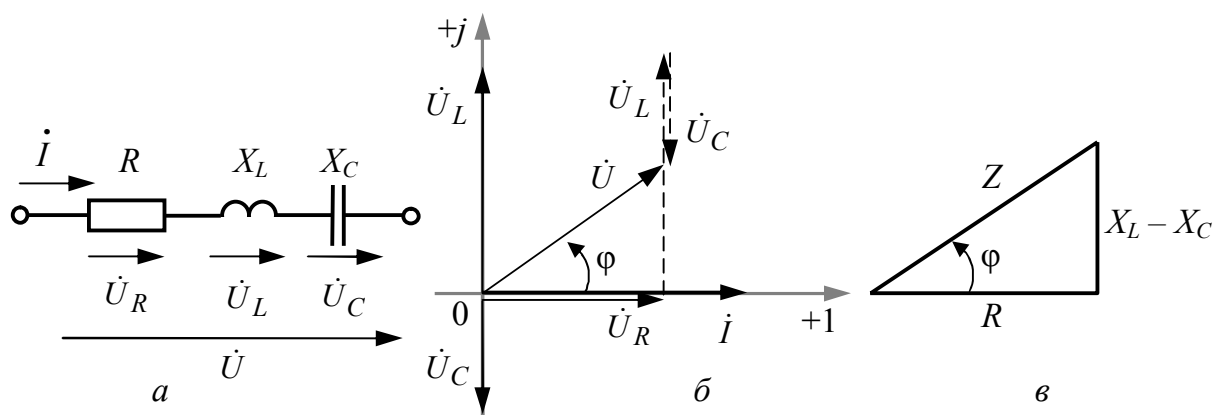


Рис. 3.2. Последовательное соединение  $RLC$  элементов:  
 а – схема соединения; б – векторная диаграмма тока и напряжений;  
 в – треугольник сопротивлений

При активно-индуктивном типе нагрузки в цепи, например, реальной катушке индуктивности, ток отстает по фазе от напряжения, так как  $\varphi > 0$  (рис. 3.3, а), а при активно-ёмкостном типе – ток в цепи опережает по фазе напряжение, так как  $\varphi < 0$  (рис. 3.3, б).

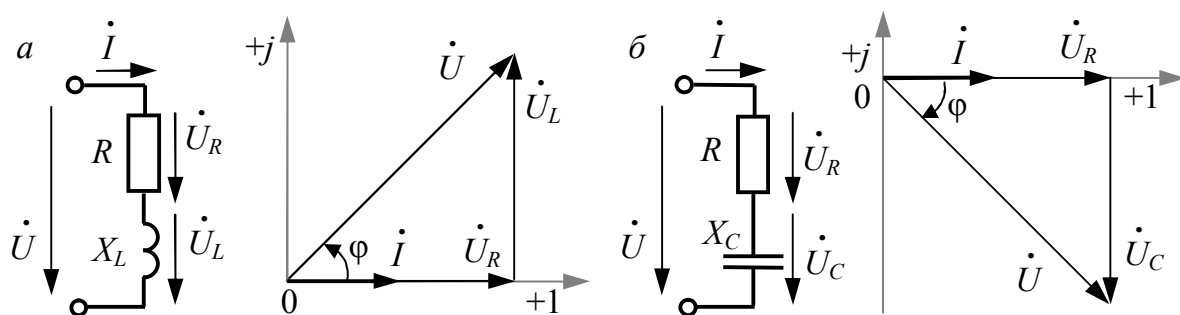


Рис. 3.3. Векторные диаграммы при смешанном характере нагрузки:  
 а – активно-индуктивный характер; б – активно-ёмкостный характер

Устройства, дающие смешанный характер нагрузки, характеризуются коэффициентом мощности

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{P}{UI} = \frac{R}{Z},$$

где полная мощность  $S = \sqrt{P^2 + (Q_L^2 - Q_C^2)}$ .

Режим работы последовательного  $RLC$  участка цепи синусоидального тока (последовательного колебательного контура), при котором ток и напряжение на его выводах совпадают по фазе ( $\varphi_p = 0$ ), называется *резонансом напряжений*.

Этот режим характеризуется равенством действующих значений напряжений на индуктивном  $U_{Lp}$  и ёмкостном  $U_{Cp}$  элементах при противоположных фазах, а также полным обменом энергией между индуктивным и ёмкостным элементами.

Следовательно, причиной резонанса напряжений является равенство реактивных сопротивлений индуктивного и ёмкостного элементов, соединённых последовательно.

$$X_{Lp} = X_{Cp}.$$

Ток в цепи при резонансе напряжений достигает максимального значения, так как реактивные сопротивления компенсируют друг друга.

$$I_p = \frac{U}{Z_p} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_{Lp} - X_{Cp})^2}} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + 0^2}} = \frac{U}{R}.$$

Поэтому при резонансе напряжение на резистивном элементе совпадает с общим напряжением на последовательном  $RLC$  участке, т.е.

$$U = U_R.$$

Вследствие отсутствия реактивного сопротивления ( $X_{Lp} - X_{Cp} = 0$ ) и мощности ( $Q_{Lp} - Q_{Cp} = 0$ ) коэффициент мощности при резонансе напряжений принимает максимально возможное значение

$$\cos \varphi_p = \frac{R}{Z_p} = \frac{R}{R} = 1.$$

*Резонансную частоту* определяют из равенства

$$X_{Lp} = X_{Cp} = \omega_p L = \frac{1}{\omega_p C},$$

откуда 
$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

*Характеристическое сопротивление* колебательного контура

$$\rho = \omega_p L = \frac{1}{\omega_p C} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Если  $\rho > R$ , то  $U_{Lp}$  и  $U_{Cp}$  могут превысить напряжение питания  $U$ .

В электротехнических системах в большинстве случаев резонанс напряжений – явление нежелательное, т.к. реактивные напряжения могут в несколько раз превышать входные. В радиотехнике резонанс напряжений применяется для настройки цепей на заданную частоту.

### Вопросы для допуска к работе

1. Как соотносятся по величине и по фазе ток и напряжение резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов?
2. Какие энергетические процессы связаны с протеканием переменного тока через резистивный, индуктивный, ёмкостный элементы?
3. Что такое активное и реактивное напряжение?
4. Каковы условия, причины и следствие резонанса напряжений?

### Методика выполнения работы

Исследуемый колебательный контур – электрическая цепь, содержащая последовательное соединение реальной катушки индуктивности и конденсатора переменной ёмкости. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 3.4.

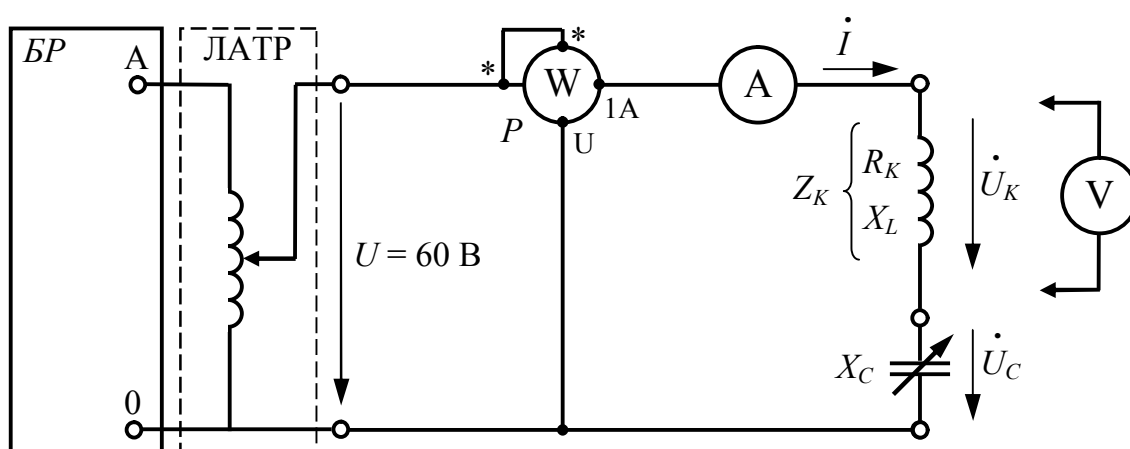


Рис. 3.4. Схема принципиальная исследуемой последовательной  $RLC$  цепи

Реальная катушка индуктивности имеет не только индуктивность, но и активное сопротивление, поэтому протекание переменного тока в ней сопровождается изменением энергии в магнитном поле и рассеиванием электрической энергии. При расчете и анализе электрических цепей реальная катушка индуктивности с сопротивлением  $Z_K$  замещается двумя элементами: резистивным и индуктивным с параметрами  $R_K$  и  $X_L$  (рис. 3.5). При этом выделяют активную  $U_R$  и реактивную  $U_L$  составляющие напряжения катушки  $U_K$ .

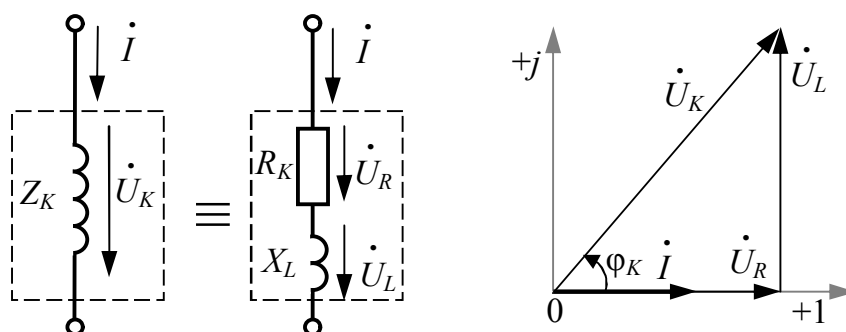


Рис. 3.5. Последовательная схема замещения и векторная диаграмма тока и напряжений реальной катушки индуктивности

В работе используются следующие измерительные приборы:

- амперметр стрелочный с пределом измерения 2,5 А;
- вольтметр стрелочный с пределами измерения 150 В и 300 В;
- ваттметр стрелочный с пределом измерений 100 Вт.

Для выполнения правил электробезопасности входное напряжение  $U$  цепи с помощью лабораторного автотрансформатора (ЛАТР) необходимо понизить до 60 В.

Режим резонанса напряжения получают, добиваясь максимального тока в цепи при изменении величины ёмкости конденсатора. Тогда собственная частота последовательного колебательного контура совпадёт с частотой питающего напряжения  $f = 50$  Гц или циклической частотой  $\omega = 2\pi f = 314,16$  рад/с.

## Порядок выполнения работы

### Экспериментальная часть

1. Убедиться в отсутствии напряжения на стенде, проверив главный выключатель и защитные автоматы-выключатели. Все тумблеры на блоке конденсаторов должны быть выключены.

2. Произвести монтаж исследуемой цепи согласно схеме на рис. 3.4. С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.

3. На выходе ЛАТР установить по вольтметру напряжение 60 В.

4. Изменяя величину ёмкости  $C$  и наблюдая за показаниями амперметра, добиться максимального значения тока. Значение резонансной ёмкости  $C_p$  внести в *третью* строку табл. 3.1.

5. Поддерживая с помощью вольтметра на выходе ЛАТР напряжение 60 В, провести измерения тока  $I$ , активной мощности  $P$ , напряжений на катушке  $U_K$  и конденсаторе  $U_C$  с учётом цены деления. Результаты измерений занести в *третью* строку табл. 3.1.

6. Провести измерения в соответствии с п. 5 для двух значений ёмкости конденсатора меньше резонансной и двух значений ёмкости конденсатора больше резонансной. Результаты измерений занести в соответствующие строки табл. 3.1.

7. Выключить стенд. Результаты измерений показать преподавателю и с его разрешения разобрать цепь.

Таблица 3.1

**Результаты измерений величин последовательной *RLC* цепи**

Номер опыта	$U$ , В	$C$ , мкФ	$I$ , А	$P$ , Вт	$U_K$ , В	$U_C$ , В
1	60					
2						
3						
4						
5						

*Расчётно-графическая часть*

1. По данным *третьей* строки табл. 3.1, соответствующей режиму резонанса напряжений, определить параметры катушки индуктивности. Результаты вычислений занести в табл. 3.2.

Для определения параметров катушки индуктивности и конденсатора используют результаты измерений тока, напряжения, мощности. Полное сопротивление  $Z_K$ , активное сопротивление  $R_K$ , индуктивное сопротивление  $X_L$ , индуктивность  $L$  и коэффициент мощности катушки  $\cos\varphi_K$  вычисляют по формулам:

$$Z_K = \frac{U_K}{I}; R_K = \frac{P}{I^2}; X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; L = \frac{X_L}{\omega}; \cos\varphi_K = \frac{P}{U_K I}. \quad (3.1)$$

2. Вычислить значение ёмкостного сопротивления конденсатора  $X_C$ ; определить значения активной  $U_R$  и реактивной  $U_L$  составляющих напряжения  $U_K$  на катушке индуктивности и коэффициент мощности  $\cos\varphi$  последовательной *RLC* цепи для всех значений ёмкости. Результаты вычислений занести в табл. 3.2.

Ёмкостное сопротивление конденсатора (величина ёмкости  $C$  при вычислениях берётся в фарадах:  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ )

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}. \quad (3.2)$$

Значения активной  $U_R$  и реактивной  $U_L$  составляющих напряжения на катушке  $U_K$  определяют по закону Ома:

$$U_R = R_K I; \quad U_L = X_L I. \quad (3.3)$$

Коэффициент мощности исследуемой цепи

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}. \quad (3.4)$$

Таблица 3.2

### Результаты вычислений величин последовательной $RLC$ цепи

Номер опыта	Параметры катушки					$X_C,$ Ом	$U_R,$ В	$U_L,$ В	$\cos \varphi,$ –
	$Z_K,$ Ом	$R_K,$ Ом	$X_L,$ Ом	$L,$ Гн	$\cos \varphi_K,$ –				
1									
2									
3									
4									
5									

3. По данным табл. 3.1 и 3.2 построить в масштабе векторные диаграммы тока и напряжений для случаев:  $X_L = X_C$ ,  $X_L > X_C$ ,  $X_L < X_C$ . Векторная диаграмма выполняется на комплексной плоскости  $[+1; j]$  с учётом действующих значений и начальных фаз отображаемых величин. Длина вектора определяется действующим значением величины, а угол его поворота относительно оси  $+1$  – начальной фазой величины.

При выполнении диаграммы принимается начальная фаза общего тока  $I$ , равная нулю, т.е. его вектор является базисным и совпадает по направлению с осью действительных значений  $+1$ .

#### Порядок построения векторных диаграмм:

- выбирают масштаб по току и напряжению так, чтобы векторная диаграмма занимала не менее полстраницы тетрадного листа;
- построение диаграммы начинают с вектора тока  $\dot{I}$ , проводя его горизонтально по направлению оси действительных значений  $+1$ ;
- вектор напряжения  $\dot{U}_R$  проводят по направлению вектора  $\dot{I}$ , так как эти величины совпадают по фазе;
- вектор напряжения  $\dot{U}_L$  поворачивают относительно вектора  $\dot{I}$  на  $90^\circ$  против часовой стрелки, так как напряжение  $\dot{U}_L$  опережает по фазе ток  $\dot{I}$  на  $90^\circ$ ;

- вектор напряжения  $\dot{U}_C$  поворачивают относительно вектора  $\dot{I}$  на  $90^\circ$  по часовой стрелке, так как напряжение  $\dot{U}_C$  отстаёт по фазе от тока  $\dot{I}$  на  $90^\circ$ ;
  - складывая векторы  $\dot{U}_R$ ,  $\dot{U}_L$ ,  $\dot{U}_C$  получают вектор входного напряжения  $\dot{U}$ ; угол между векторами  $\dot{I}$  и  $\dot{U}$  – это угол сдвига фаз  $\varphi$  между током и приложенным к схеме напряжением.
4. По данным табл. 3.1 и 3.2 построить в масштабе графики зависимостей  $I(C)$  и  $\cos\varphi(C)$ .

### Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Запишите выражение закона Ома для участка цепи, содержащей: резистивный элемент; индуктивный элемент; ёмкостный элемент; последовательное соединение всех перечисленных элементов.
2. В каких пределах может находиться угол сдвига фаз между током и напряжением в пассивной электрической цепи?
3. В каком случае участок цепи с резистивным, индуктивным и ёмкостным элементами будет иметь активный (активно-индуктивный, индуктивный, активно-ёмкостный, ёмкостный) характер?
4. Зависят ли от частоты активное, индуктивное и ёмкостное сопротивления?
5. Запишите формулу комплексного и полного сопротивлений.
6. Как определить угол сдвига фаз между током и напряжением, зная параметры  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементов последовательной цепи?
7. Как изменяется во времени энергия, соответствующая резистивному (индуктивному, ёмкостному) элементу?
8. Что такое активная мощность и чему равно её значение для резистивного (индуктивного, ёмкостного) элемента?
9. Что такое коэффициент мощности?
10. Какой режим работы цепи называют резонансом напряжений?
11. Может ли при резонансе напряжение на индуктивном и ёмкостном элементах быть по величине больше, чем напряжение на входе схемы? Почему?
12. Почему при резонансе напряжение на реальной катушке индуктивности больше, чем напряжение на конденсаторе?
13. От какого вектора отсчитывается угол сдвига фаз векторов на векторных диаграммах?
14. Поясните построение векторных диаграмм.



## Лабораторная работа № 4

### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТИВНОГО, ИНДУКТИВНОГО И ЁМКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТОВ

**Цель работы:** исследование характеристик разветвлённой электрической цепи синусоидального тока при различных типах нагрузки, изучение режима резонанса токов.

#### Общие сведения

Основные теоретические сведения о цепях переменного тока с различными элементами и типами нагрузки изложены в лабораторной работе №3.

Для расчета разветвленных электрических цепей пользуются величиной обратной сопротивлению – проводимостью. Так резистивный элемент имеет активную проводимость  $G$ ; индуктивный – индуктивную проводимость  $B_L$  и ёмкостный – ёмкостную проводимость  $B_C$ .

Комплексный ток на участке цепи, содержащем параллельное соединение резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов (рис. 4.1, а) определяется согласно первому закону Кирхгофа как сумма комплексных токов каждого элемента:

$$\dot{I} = \dot{I}_G + \dot{I}_L + \dot{I}_C = G\dot{U} - jB_L\dot{U} + jB_C\dot{U}.$$

Комплексная проводимость участка с параллельным соединением резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} = G - j(B_L - B_C) = Ye^{-j\varphi},$$

где  $Y$  – полная проводимость параллельного  $RLC$  участка цепи;  $\varphi$  – угол сдвига фаз между током и напряжением на этом участке.

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{B_L - B_C}{G} = \psi_u - \psi_i.$$

Закон Ома для параллельного  $RLC$  участка цепи:

$$\dot{I} = \dot{U}\underline{Y} = \dot{U}(G - jB_L + jB_C).$$

Векторная диаграмма параллельного  $RLC$  участка цепи (рис. 4.1, б) учитывает фазовые соотношения между током и напря-

жением на резистивном, индуктивном и ёмкостном элементах. Разделив силы токов (см. рис. 4.1, б) на напряжение, получим треугольник проводимостей (рис. 4.1, в).

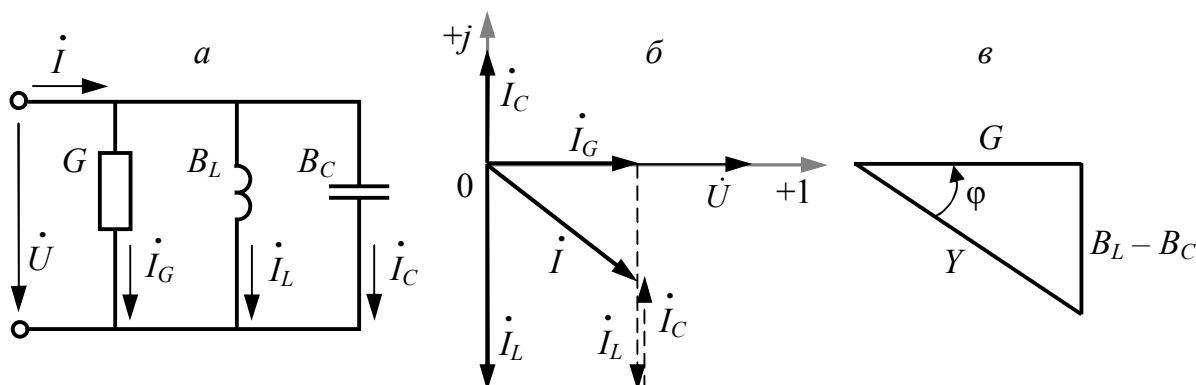


Рис. 4.1. Параллельное соединение  $RLC$  элементов:  
 а – схема соединения; б – векторная диаграмма токов и напряжения;  
 в – треугольник проводимостей

При расчете и анализе электрических цепей реальная катушка индуктивности с сопротивлением  $Z_K$  замещается двумя элементами: резистивным и индуктивным с параметрами  $G_K$  и  $B_L$  (рис. 4.2). При этом выделяют активную  $I_G$  и реактивную  $I_L$  составляющие тока катушки  $I_K$ .

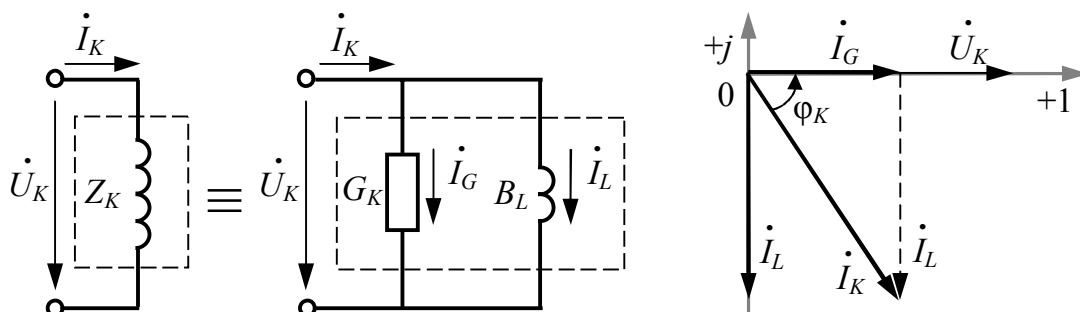


Рис. 4.2. Параллельная схема замещения и векторная диаграмма токов и напряжения реальной катушки индуктивности

Режим параллельного  $RLC$  участка цепи синусоидального тока (параллельного колебательного контура), при котором угол сдвига фаз между напряжением  $U$  на его выводах и общим током  $I$  равен нулю ( $\varphi_p = 0$ ), называется *резонансом токов*.

Этот режим характеризуется равенством действующих значений токов на индуктивном  $I_{Lp}$  и ёмкостном  $I_{Cp}$  элементах параллельных ветвей при противоположных фазах, а также полным обменом энергией между индуктивным и ёмкостным элементами.

Следовательно, причиной резонанса токов является равенство реактивных проводимостей индуктивного и ёмкостного элементов, соединённых параллельно,

$$B_{Lp} = B_{Cp}.$$

Ток в цепи при резонансе достигает минимального значения, так как реактивные проводимости компенсируют друг друга:

$$I_p = UY_p = U\sqrt{G^2 + (B_{Lp} - B_{Cp})^2} = U\sqrt{G^2 + 0^2} = UG.$$

Поэтому при резонансе токов общий ток параллельного  $RLC$  участка равен току резистивного элемента

$$I = I_R.$$

Вследствие отсутствия реактивного сопротивления ( $B_{Lp} - B_{Cp} = 0$ ) и мощности ( $Q_{Lp} - Q_{Cp} = 0$ ) коэффициент мощности при резонансе токов принимает максимально возможное значение:

$$\cos \varphi_p = \frac{R}{Z_p} = RY_p = RG = 1.$$

Резонанс токов – явление безопасное для энергетических установок, в отличие от резонанса напряжений, и широко применяется в радиотехнических устройствах.

### **Вопросы для допуска к работе**

1. Что такое активный (реактивный) ток?
2. Как определить величину полной проводимости разветвлённой  $RLC$  цепи?
3. Каковы условия, причины и следствие резонанса токов?

### **Методика выполнения работы**

Исследуемый колебательный контур – электрическая цепь, содержащая параллельное соединение реальной катушки индуктивности и конденсатора переменной ёмкости. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 4.3.

В работе используются следующие измерительные приборы:

- амперметр стрелочный с пределами измерения 1 А и 2,5 А;
- вольтметр стрелочный с пределом измерения 150 В;
- ваттметр стрелочный с пределом измерений 100 Вт.

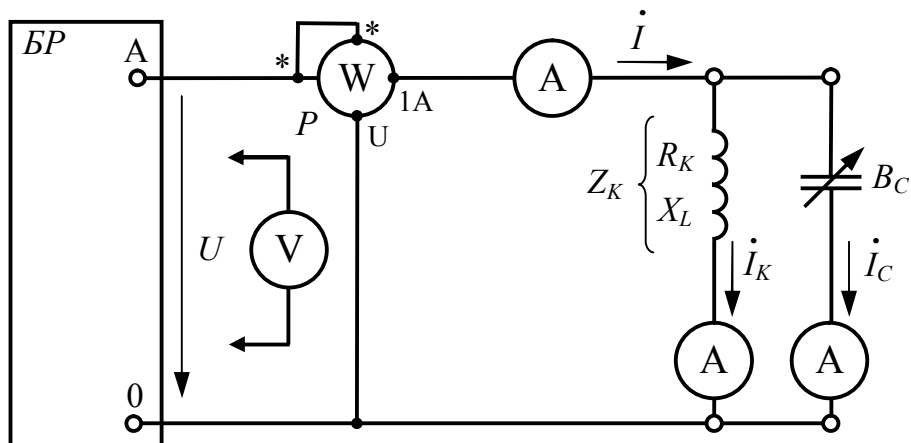


Рис. 4.3. Схема принципиальная исследуемой параллельной  $RLC$  цепи

Режим резонанса токов получают, добиваясь минимального тока в цепи при изменении величины ёмкости конденсатора. Тогда собственная частота параллельного колебательного контура совпадёт с частотой питающего напряжения  $f = 50$  Гц или циклической частотой  $\omega = 2\pi f = 314,16$  рад/с.

### Порядок выполнения работы

#### Экспериментальная часть

1. Убедиться в отсутствии напряжения на стенде, проверив главный выключатель и защитные автоматы-выключатели. Все тумблеры на блоке конденсаторов должны быть выключены.
2. Произвести монтаж исследуемой цепи согласно схеме на рис. 4.3. С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.
3. Изменяя величину ёмкости  $C$  и наблюдая за показаниями амперметра, измеряющего ток  $I$  в неразветвлённой части цепи, добиться минимального значения тока. Значение резонансной  $C_P$  ёмкости внести в *третью* строку табл. 4.1.
4. Провести измерения общего напряжения  $U$ , общего тока  $I$ , тока катушки  $I_K$ , тока конденсатора  $I_C$  и активной мощности  $P$  с учётом цены деления. Результаты измерений занести в *третью* строку табл. 4.1.
5. Провести измерения в соответствии с п. 4 для двух значений ёмкости конденсатора меньше резонансной и двух значений ёмкости конденсатора больше резонансной. Результаты измерений занести в соответствующие строки табл. 4.1.
6. Выключить стенд. Результаты измерений показать преподавателю и с его разрешения разобрать цепь.

### Результаты измерений величин параллельной $RLC$ цепи

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

#### Расчётно-графическая часть

1. По данным *третьей* строки табл. 4.1, соответствующей режиму резонанса токов, определить параметры катушки индуктивности. Результаты вычислений занести в табл. 4.2.

Для определения параметров катушки индуктивности и конденсатора используют результаты измерений тока, напряжения, мощности. Полное сопротивление  $Z_K$ , активное сопротивление  $R_K$ , индуктивное сопротивление  $X_L$ , активную проводимость  $G_K$  и индуктивную проводимость  $B_L$  катушки вычисляют по формулам:

$$Z_K = \frac{U_K}{I_K}; R_K = \frac{P}{I_K^2}; X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; G_K = \frac{R_K}{Z_K^2}; B_L = \frac{X_L}{Z_K^2}. \quad (4.1)$$

2. Вычислить значение ёмкостной проводимости конденсатора  $B_C$ , значения активной  $I_G$  и реактивной  $I_L$  составляющих тока катушки  $I_K$  и коэффициент мощности  $\cos\varphi$  параллельной  $RLC$  цепи для всех значений ёмкости. Результаты вычислений занести в табл. 4.2.

Ёмкостная проводимость конденсатора (величина ёмкости  $C$  при вычислениях берётся в фарадах:  $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ )

$$B_C = \omega C. \quad (4.2)$$

Значения активной  $I_G$  и реактивной  $I_L$  составляющих тока катушки  $I_K$  определяют по закону Ома для соответствующего элемента:

$$I_G = G_K U; \quad I_L = B_L U. \quad (4.3)$$

Коэффициент мощности исследуемой цепи

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI}. \quad (4.4)$$

**Результаты вычислений величин параллельной RLC цепи**

Номер опыта	Параметры катушки					$B_C$ , мСм	$I_G$ , А	$I_L$ , А	$\cos\varphi$ , –
	$Z_K$ , Ом	$R$ , Ом	$X_L$ , Ом	$G_K$ , мСм	$B_L$ , мСм				
1									
2									
3									
4									
5									

3. По данным табл. 4.1 и 4.2 построить в масштабе векторные диаграммы токов и напряжения для случаев:  $B_L = B_C$ ,  $B_L > B_C$ ,  $B_L < B_C$ . Векторная диаграмма выполняется на комплексной плоскости  $[+1; j]$  с учётом действующих значений и начальных фаз отображаемых величин. Длина вектора определяется действующим значением величины, а угол его поворота относительно оси  $+1$  – начальной фазой величины.

При выполнении диаграммы принимается начальная фаза общего напряжения  $U$ , равная нулю, т.е. его вектор является базисным и совпадает по направлению с осью действительных значений  $+1$ .

**Порядок построения векторных диаграмм:**

- выбирают масштаб по току и напряжению так, чтобы векторная диаграмма занимала не менее полстраницы тетрадного листа;
- построение диаграммы начинают с вектора тока  $\dot{U}$ , проводя его горизонтально по направлению оси действительных значений  $+1$ ;
- вектор тока  $\dot{I}_G$  проводят по направлению вектора  $\dot{U}$ , так как эти величины совпадают по фазе;
- вектор тока  $\dot{I}_L$  поворачивают относительно вектора  $\dot{U}$  на  $90^\circ$  по часовой стрелке, так как напряжение  $\dot{U}$  опережает по фазе ток  $\dot{I}_L$  на  $90^\circ$ ;
- вектор тока  $\dot{I}_C$  поворачивают относительно вектора  $\dot{U}$  на  $90^\circ$  против часовой стрелки, так как напряжение  $\dot{U}$  отстаёт по фазе от тока  $\dot{I}_C$  на  $90^\circ$ ;
- сумма векторов  $\dot{I}_G$ ,  $\dot{I}_L$ ,  $\dot{I}_C$  является вектором общего тока  $\dot{I}$ , угол между векторами  $\dot{I}$  и  $\dot{U}$  – это угол сдвига фаз  $\varphi$  между током в неразветвлённой части цепи и приложенным к схеме напряжением.

4. По данным табл. 4.1 и 4.2 построить в масштабе графики зависимостей  $I(C)$  и  $\cos\varphi(C)$ .

## Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Запишите закон Ома для параллельной  $RLC$  цепи.
2. Как определить величину активной и реактивной проводимости реальной катушки индуктивности и конденсатора?
3. Запишите формулу комплексной и полной проводимости.
4. Какой режим работы цепи называют резонансом токов?
5. Выведите формулу для резонансной частоты параллельного колебательного контура с реальной катушкой индуктивности.
6. Какова величина тока неразветвлённого участка цепи при резонансе токов с идеальной катушкой индуктивности?
7. Как влияет изменение величины ёмкости конденсатора, подключаемого параллельно катушки индуктивности, на значение коэффициента мощности цепи?
8. Поясните построение векторных диаграмм.

## Лабораторная работа №5

### ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ ПРИЕМНИКА «ЗВЕЗДОЙ»

**Цель работы:** исследование различных режимов работы трёхфазной электрической цепи при соединении фаз активного приёмника по схеме «звезда».

#### Общие сведения

*Трёхфазная электрическая цепь* представляет собой совокупность трёх электрических цепей, в которых действуют три синусоидальных ЭДС одной и той же частоты и амплитуды, создаваемые общим источником энергии и сдвинутые относительно друг друга по фазе на угол  $2\pi/3$  ( $120^\circ$ ). Такая система трёх ЭДС, равных по величине и сдвинутых по фазе на  $120^\circ$  по отношению друг к другу, называется *симметричной*.

Каждая из действующих ЭДС находится в своей фазе периодического процесса, поэтому часто называется просто *фазой*. Также *фазами* называют проводники – носители этих ЭДС. Согласно ГОСТ 2.709–89 отдельные фазы трехфазной цепи принято обозначать латинскими буквами  $L$  с цифровым индексом 1, 2, 3 или  $A, B, C$ .

Источником трёхфазной системы ЭДС является трёхфазный синхронный генератор. На статоре генератора размещают три индуктивных обмотки, сдвинутые в пространстве на  $120^\circ$ , именно они являются источниками трёх ЭДС. ЭДС фазы  $A$  достигает максимального значения на одну треть периода раньше, чем ЭДС фазы  $B$ , и на две трети периода раньше, чем ЭДС фазы  $C$ . Такая последовательность чередования фаз называется *нормальной* или *прямой*.

Трёхфазную систему ЭДС (рис. 5.1) можно записать в виде мгновенных или комплексных действующих значений

$$\begin{cases} e_a = E_m \sin \omega t; \\ e_b = E_m \sin(\omega t - 120^\circ); \\ e_c = E_m \sin(\omega t - 240^\circ), \end{cases} \quad \text{или} \quad \begin{cases} \dot{E}_a = E e^{j0^\circ}; \\ \dot{E}_b = E e^{-j120^\circ}; \\ \dot{E}_c = E e^{+j120^\circ}, \end{cases}$$

где  $E_m$  – амплитудное значение ЭДС фазы;  $E$  – действующее значение ЭДС фазы;  $\omega$  – циклическая частота ЭДС.

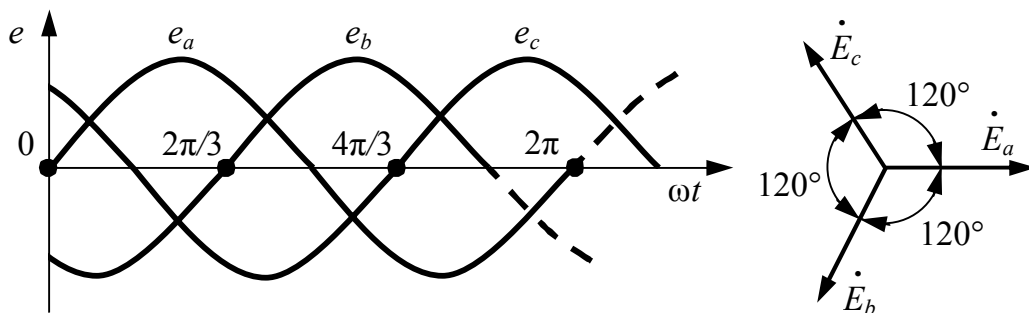


Рис. 5.1. Временная и векторная диаграммы трёхфазной системы ЭДС

Для получения трёхфазной цепи необходимо определенным образом соединить фазы источника энергии и фазы приёмника.

«Звездой» называется такое соединение, когда концы фаз обмоток генератора  $\Gamma (x, y, z)$  соединяют в одну общую точку, называемую *нейтралью*  $n$ . Концы фаз приёмника  $\Pi (X, Y, Z)$  также соединяют в общую нейтральную точку  $N$  (рис. 5.2).

Провода, соединяющие начала фаз генератора и приёмника, называются *линейными*. Провод, соединяющий нейтрали генератора и приёмника, называется *нейтральным* и имеет голубую цветовую маркировку. Трёхфазная цепь, имеющая нейтральный провод, называется четырёхпроводной. Если нейтрального провода нет – трёхпроводной.

*Фазными* называются напряжения между началами и концами фаз генератора  $U_a, U_b, U_c$  или приёмника  $U_A, U_B, U_C$ . При наличии нейтрального провода они соответственно равны.



*Линейными* называются напряжения между началами фаз генератора или приёмника (напряжения между линейными проводами) и обозначаются  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$ .

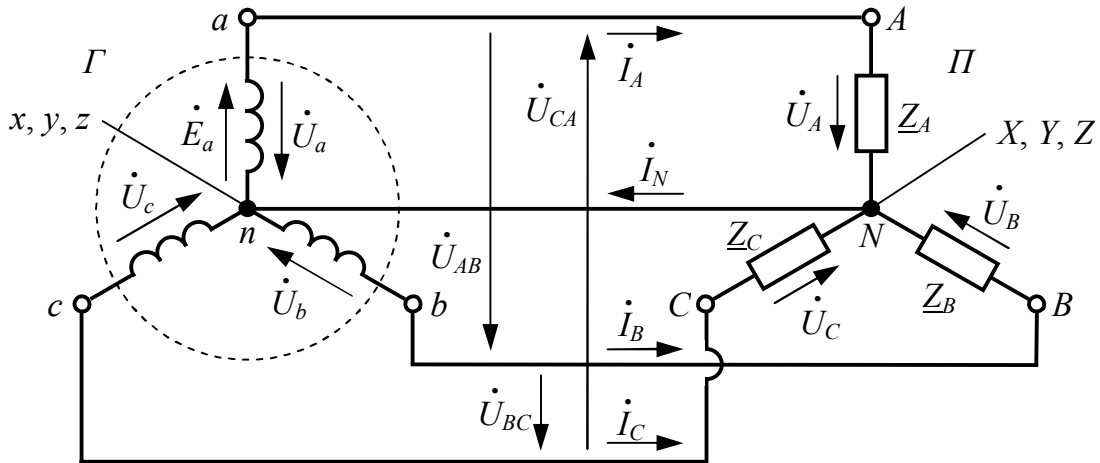


Рис. 5.2. Схема замещения трёхфазной электрической цепи при соединении фаз генератора и приёмника по схеме «звезда»

Между линейными и фазными напряжениями приёмника при соединении «звездой» имеется зависимость согласно второму закону Кирхгофа

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \\ \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \\ \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A. \end{cases}$$

При соединении «звездой» *линейный* ток  $I_L$ , протекающий по линейному проводу, является *фазным* током  $I_\phi$ , протекающим по фазе приёмника, т.е.

$$\dot{I}_L = \dot{I}_\phi.$$

Ток в нейтральном проводе в соответствии с первым законом Кирхгофа равен сумме комплексных значений фазных токов:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

Приёмник с одинаковым комплексным сопротивлением всех трех фаз называется *симметричным*, а нагрузка на сеть от такого приёмника – *симметричной*. Тогда

$$\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C = Ze^{j\varphi}$$

или

$$\begin{cases} Z_A = Z_B = Z_C; \\ \varphi_A = \varphi_B = \varphi_C, \end{cases}$$

где  $Z$  – полное сопротивление фазы;  $\varphi$  – фазовый угол нагрузки.

Нейтральный провод при симметричной нагрузке не нужен, так как ток в нем  $I_N$  как векторная сумма фазных токов равна нулю.

При наличии нейтрального провода всегда или при симметричной нагрузке без него, между действующими значениями линейных и фазных напряжений в схеме «звезда» выполняется соотношение

$$U_{л} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}.$$

При обрыве/отсутствии нейтрального провода при несимметричной нагрузке нормальный режим трёхфазной установки нарушается. Фазные токи изменяются и устанавливаются таким образом, чтобы векторная сумма их стала равной нулю. При этом нарушается симметрия фазных напряжений приёмника  $U_A, U_B, U_C$ , а фазные напряжения генератора  $U_a, U_b, U_c$  остаются симметричными. В результате этого возникает разность потенциалов между концами фаз генератора и приёмника  $U_{nN}$ , называемая *смещением нейтрали*:

$$\dot{U}_{nN} = \varphi_N - \varphi_n = \frac{\underline{Y}_A \dot{U}_a + \underline{Y}_B \dot{U}_b + \underline{Y}_C \dot{U}_c}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

где  $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$  – комплексные проводимости фаз приёмника.

Фазные напряжения приёмника  $U_A, U_B, U_C$  будут зависеть от напряжения смещения нейтрали:

$$\begin{cases} \dot{U}_A = \dot{U}_a - \dot{U}_{nN}; \\ \dot{U}_B = \dot{U}_b - \dot{U}_{nN}; \\ \dot{U}_C = \dot{U}_c - \dot{U}_{nN}. \end{cases}$$

При симметричной нагрузке напряжение смещения нейтрали  $U_{nN}$  равно нулю и трёхфазная цепь не нуждается в нейтральном проводе.

### Вопросы для допуска к работе

1. Что называется трёхфазной электрической цепью?
2. Каковы фазовые сдвиги между ЭДС трёхфазной системы?
3. Как измерить линейные и фазные напряжения?
4. Как определяется ток в нейтральном проводе?

## Методика проведения работы

Исследуемая трёхфазная цепь (рис. 5.3) состоит из трёх групп ламп накаливания, соединяемых «звездой» и подключаемых к трёхфазной системе ЭДС распределительного блока БР по трёхпроводной и четырёхпроводной схемам.

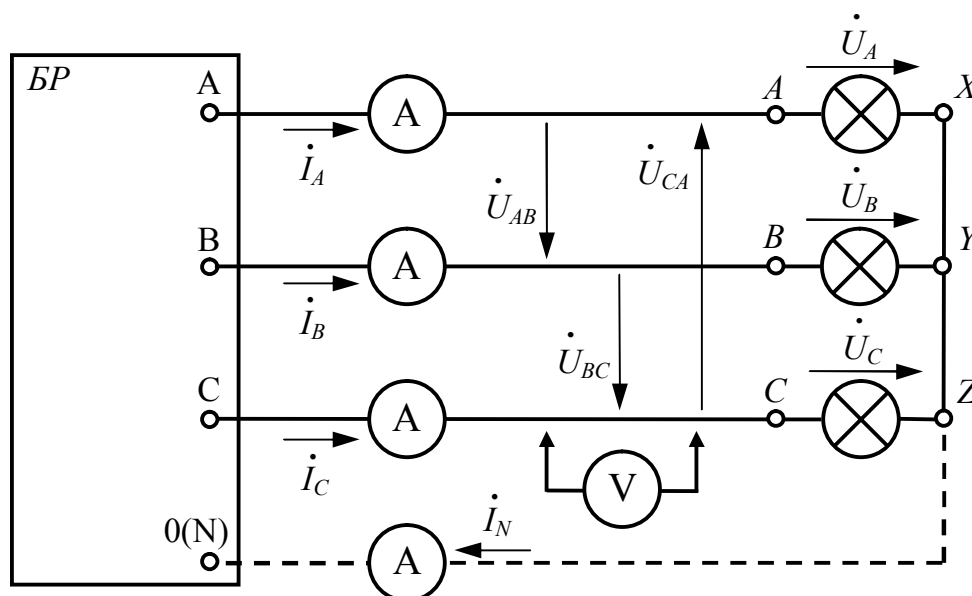


Рис. 5.3. Схема принципиальная исследуемой трёхфазной цепи

В процессе эксперимента необходимо измерить электрические величины трёхпроводной и четырёхпроводной трёхфазных цепей при следующих режимах работы:

- 1) *симметричная нагрузка* – одинаковое количество включенных ламп в каждой фазе приёмника;
- 2) *несимметричная нагрузка* – уменьшенное количество включенных ламп в первой фазе приёмника, во второй и третьей фазах – одинаковое количество включенных ламп;
- 3) *обрыв фазы* – все лампы в первой фазе приёмника отключены, во второй и третьей фазах – одинаковое количество включенных ламп;
- 4) *короткое замыкание фазы (выполняется только для трёхпроводной цепи)* – первая фаза приёмника замыкается накоротко, во второй и третьей фазах – одинаковое количество включенных ламп.

Во время эксперимента все напряжения измеряются по очереди одним вольтметром, переключая его пределы измерения. В работе используются следующие измерительные приборы:

- вольтметр стрелочный с пределами измерения 150 В и 300 В;
- амперметры стрелочные с пределом измерения 1 А.

## Порядок выполнения работы

### *Экспериментальная часть*

1. Убедиться в отсутствии напряжения на стенде, проверив главный выключатель и защитные автоматы-выключатели.
2. Произвести монтаж исследуемой трёхпроводной цепи согласно схеме на рис. 5.3 (без нейтрального провода). С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.
3. Результаты измерений напряжений и токов в каждом опыте фиксируются с учетом цены деления приборов.
4. Смоделировать симметричную нагрузку, включив одинаковое количество ламп (4 – 5) в каждой фазе приёмника. Занести результаты измерений в табл. 5.1.
5. Смоделировать несимметричную нагрузку, выключив 2 – 3 лампы в фазе  $A$ , во второй и третьей фазах остается прежнее количество включенных ламп. Занести результаты измерений в табл. 5.1.
6. Смоделировать обрыв фазы  $A$ , выключив все лампы в фазе  $A$  приёмника, во второй и третьей фазах остается прежнее количество включенных ламп. Занести результаты измерений в табл. 5.1.
7. Смоделировать короткое замыкание фазы  $A$ , подключив параллельно фазе  $A$  провод, во второй и третьей фазах остается прежнее количество включенных ламп. Занести результаты измерений в табл. 5.1.
8. Выключить стенд. Произвести монтаж четырёхпроводной цепи (с нейтральным проводом) (см. рис. 5.3). С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.
9. Повторить опыты, описанные в пп. 4 – 6. Занести результаты измерений в табл. 5.1.
10. Выключить стенд. Результаты измерений показать преподавателю и с его разрешения разобрать цепь.

### *Расчётно-графическая часть*

Для каждой строки табл. 5.1 в масштабе построить векторную диаграмму напряжений и токов (рис. 5.4) – совокупность векторов комплексных значений синусоидальных величин в цепи. Векторная диаграмма выполняется на комплексной плоскости  $[+1; j]$  с учётом действующих значений и начальных фаз отображаемых величин. Длина вектора определяется действующим значением величины, а угол его наклона относительно оси  $+1$  – начальной фазой величины.

При выполнении диаграммы начальная фаза напряжения фазы  $A$  генератора принимается равной нулю. А при наличии нейтрального провода напряжение фазы приёмника равно напряжению фазы гене-

ратора, т.е. его вектор является базисным и совпадает по направлению с осью действительных значений +1.

$$\dot{U}_A = \dot{U}_a = U_\phi e^{j0^\circ}.$$

Таблица 5.1

**Результаты измерений величин трёхфазной цепи с активным приёмником**

Трёхпроводная цепь (без нейтрального провода)										
Режим работы	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$U_A,$ В	$U_B,$ В	$U_C,$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$U_{nN},$ В
Симметричная нагрузка										
Несимметричная нагрузка										
Обрыв фазы <i>A</i>										
Короткое замыкание фазы <i>A</i>										
Четырёхпроводная цепь (с нейтральным проводом)										
Режим работы	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$U_A,$ В	$U_B,$ В	$U_C,$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_N,$ А
Симметричная нагрузка										
Несимметричная нагрузка										
Обрыв фазы <i>A</i>										

Трёхфазную систему линейных напряжений при нулевой начальной фазе напряжения фазы *A* генератора можно записать в виде комплексных действующих значений:

$$\begin{cases} \dot{U}_{AB} = U_L e^{+j30^\circ}; \\ \dot{U}_{BC} = U_L e^{-j90^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} = U_L e^{+j150^\circ}. \end{cases}$$

В исследуемой цепи фазы приёмника образованы лампами накаливания, представляющими собой активные сопротивления, у которых фазовые углы  $\varphi_A = \varphi_B = \varphi_C = 0$ . Поэтому векторы фазных токов  $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$  совпадают с векторами фазных напряжений приёмника  $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$  по направлению (см. рис. 5.4).

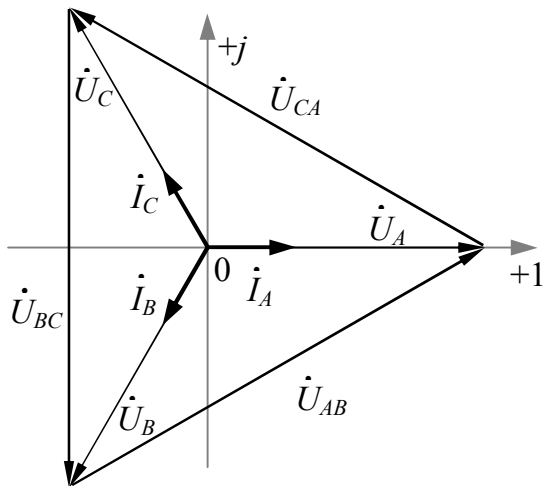


Диаграмма симметричной нагрузки при наличии и без нейтрального провода

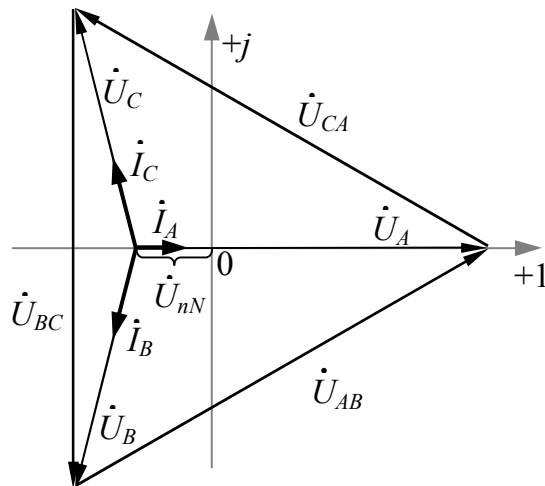


Диаграмма несимметричной нагрузки без нейтрального провода

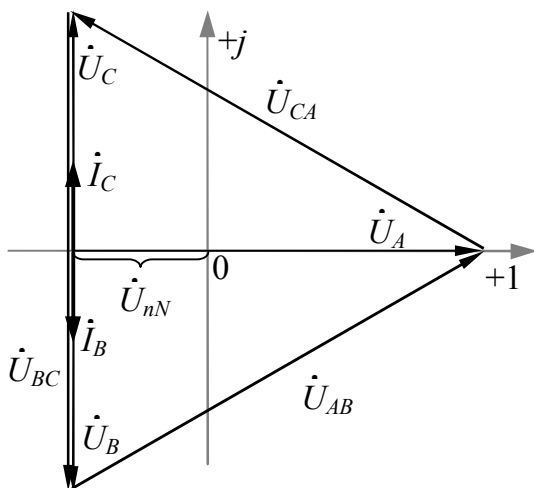


Диаграмма обрыва фазы A без нейтрального провода

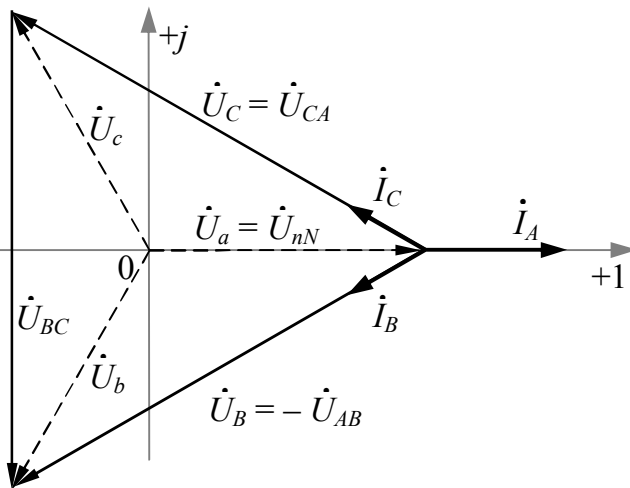


Диаграмма короткого замыкания фазы A без нейтрального провода

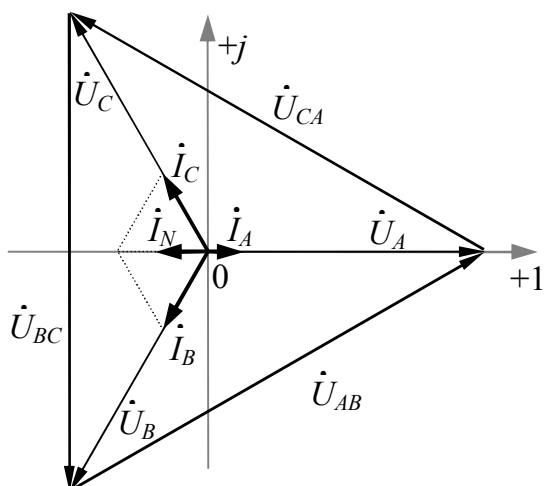


Диаграмма несимметричной нагрузки с нейтральным проводом

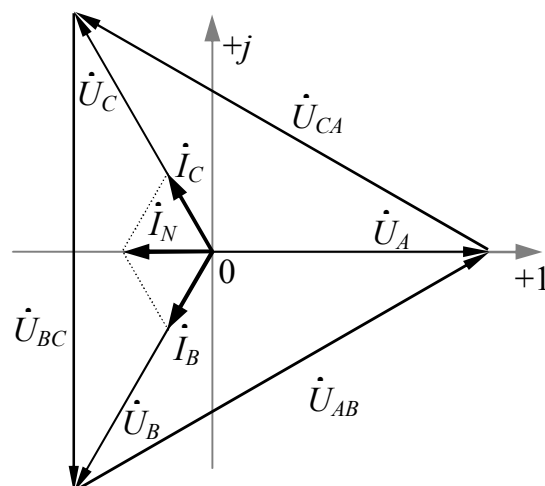


Диаграмма обрыва фазы A с нейтральным проводом

Рис. 5.4. Векторные диаграммы трёхфазной цепи с активным приёмником

## Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Изобразите схему трёхпроводной и четырёхпроводной трёхфазных цепей при соединении фаз приемника «звездой».
2. Покажите на схеме трёхфазной цепи условно-положительные направления фазных и линейных токов и напряжений.
3. Запишите для трёхпроводной и четырёхпроводной трёхфазных цепей уравнения по законам Кирхгофа.
4. Каково назначение нейтрального провода?
5. Необходим ли нейтральный провод при работе трёхфазной цепи в различных режимах?
6. В каком случае и почему ток в нейтральном проводе равен нулю?
7. Какой режим работы трёхфазной цепи называется симметричным?
8. В каком случае и какое соотношение имеется между действующими значениями линейных и фазных напряжений при соединении фаз приемника «звездой»?
9. Что называется смещением нейтрали и когда оно возникает?
10. Поясните построение векторных диаграмм.

## Лабораторная работа №6

### ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ РЕАКТИВНОГО ПРИЕМНИКА «ЗВЕЗДОЙ»

**Цель работы:** исследование четырёхпроводной трёхфазной электрической цепи при соединении фаз реактивного приёмника по схеме «звезда».

#### Общие сведения

Основные теоретические сведения о трёхфазной системе ЭДС, а также структуре, математическом описании и связях электрических величин в трёхфазной электрической цепи при соединении фаз приёмника «звездой» приведены в лабораторной работе № 5.

В фазах приёмника с активным характером нагрузки ток и фазное напряжение совпадают по фазе ( $\varphi = 0$ ), с активно-индуктивной нагрузкой фазное напряжение опережает по фазе ток ( $\varphi > 0$ ), с активно-ёмкостной нагрузкой фазное напряжение отстает по фазе от тока

( $\varphi < 0$ ) (см. рис. 3.3). Эти условия необходимо учитывать при расчёте трёхфазных цепей и построении векторных диаграмм токов и напряжений. Основные теоретические сведения о цепях с различными типами нагрузки изложены в лабораторной работе № 3.

### Вопросы для допуска к работе

1. Какими параметрами характеризуются соответственно активный, индуктивный и ёмкостный элементы?
2. Как определяются активные и реактивные сопротивления элементов?
3. Каковы фазовые отношения тока и напряжения на активном, индуктивном и ёмкостном элементах?
4. Как определяется полное сопротивление приёмника?
5. Как определяется коэффициент мощности приёмника?
6. Как определяется полная мощность приёмника?

### Методика проведения работы

Исследуемая четырёхпроводная трёхфазная цепь (рис. 6.1) состоит из трёх различных однофазных приёмников, соединяемых «звездой» и подключаемых к трёхфазной системе ЭДС распределительного блока БР.

В фазе *A* приёмника включены лампы накаливания, имеющие только активное сопротивление  $R_L$ . В фазу *B* включен конденсатор, имеющий только реактивное ёмкостное сопротивление  $X_C$ . В фазу *C* включена катушка индуктивности, представляющая смешанные активное  $R_K$  и реактивное индуктивное  $X_L$  сопротивления, которые являются компонентами полного сопротивления катушки  $Z_K$ .

Во время эксперимента все напряжения измеряются по очереди одним вольтметром, переключая его пределы измерения. В работе используются следующие измерительные приборы:

- вольтметр стрелочный с пределами измерения 150 В и 300 В;
- амперметры стрелочные с пределами измерения 1 А и 2,5 А;
- ваттметр стрелочный с пределом измерения 100 Вт.

В процессе эксперимента необходимо определить электрические величины трёхфазной цепи при соединении фаз реактивного приёмника по схеме «звезда» с нейтральным проводом. Частота питающего напряжения электрической сети  $f = 50$  Гц или циклическая частота  $\omega = 2\pi f = 314,16$  рад/с.



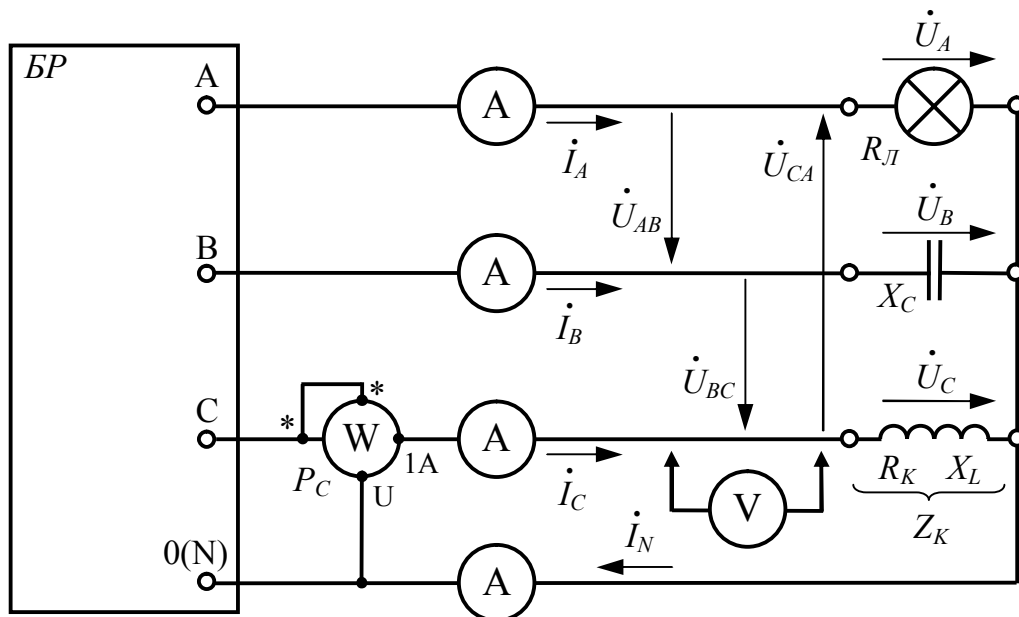


Рис. 6.1. Схема принципиальная исследуемой трёхфазной цепи с реактивным приёмником

### Порядок выполнения работы

#### Экспериментальная часть

1. Убедиться в отсутствии напряжения на стенде, проверив главный выключатель и защитные автоматы-выключатели.
2. Произвести монтаж исследуемой четырёхпроводной трёхфазной цепи согласно схеме на рис. 6.1. В фазу *B* включить конденсатор постоянной ёмкости 20 мкФ. С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.
3. Проверить равенство фазных напряжений.
4. Результаты измерений напряжений, токов и мощности фиксируются с учетом цены деления приборов.
5. Провести измерения и занести результаты в табл. 6.1.
6. Выключить стенд. Результаты измерений показать преподавателю и с его разрешения разобрать цепь.

Таблица 6.1

#### Результаты измерений величин трёхфазной цепи с реактивным приёмником

Измеренные величины	$U_L, В$	$U_\Phi, В$	$I_A, А$	$I_B, А$	$I_C, А$	$I_N, А$	$C, мкФ$	$P_C, Вт$
Значения								

### Расчётно-графическая часть

1. При наличии нейтрального провода при соединении фаз приёмника «звездой» действующие значения фазных напряжений равны. Проверить справедливость выражения

$$U_A = U_B = U_C = U_\Phi = \frac{U_L}{\sqrt{3}}. \quad (6.1)$$

2. По данным табл. 6.1 вычислить параметры фаз трёхфазного приёмника. Результаты вычислений занести в табл. 6.2.

Для определения параметров ламп накаливания, катушки индуктивности и конденсатора используют результаты измерений тока, напряжения, мощности.

Активное сопротивление ламп накаливания в фазе  $A$  вычисляется по закону Ома:

$$R_L = \frac{U_A}{I_A}. \quad (6.2)$$

Ёмкостное сопротивление конденсатора в фазе  $B$  также вычисляется по закону Ома:

$$X_C = \frac{U_B}{I_B}. \quad (6.3)$$

Полное сопротивление  $Z_K$ , активное сопротивление  $R_K$ , индуктивное сопротивление  $X_L$ , индуктивность  $L$  и коэффициент мощности катушки индуктивности  $\cos\varphi_K$  вычисляются по формулам:

$$Z_K = \frac{U_C}{I_C}; R_K = \frac{P_C}{I_C^2}; X_L = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; L = \frac{X_L}{\omega}; \cos\varphi_K = \frac{P_C}{U_C I_C}. \quad (6.4)$$

Таблица 6.2

#### Результаты вычислений параметров фаз трёхфазного приёмника

Вычисленные параметры	$R_L$ , Ом	$X_C$ , Ом	$Z_K$ , Ом	$R_K$ , Ом	$X_L$ , Ом	$L$ , Гн	$\cos\varphi_K$ , –
Значения							

3. По данным табл. 6.2 определить величины полных сопротивлений фаз приёмника и мощности трёхфазной цепи. Результаты вычислений занести в табл. 6.3.

Полные сопротивления фаз приёмника определяются активным сопротивлением ламп накаливания, ёмкостным сопротивлением конденсатора и полным сопротивлением катушки индуктивности:

$$Z_A = R_L; \quad Z_B = X_C; \quad Z_C = Z_K. \quad (6.5)$$

Углы сдвига фазы между фазными токами и напряжениями:

$$\varphi_A = 0; \quad \varphi_B = -90^\circ; \quad \varphi_C = \arctg \frac{X_L}{R_K}. \quad (6.6)$$

Активная мощность трехфазной цепи  $P_{3\phi}$  равна сумме активных мощностей фаз приёмника:

$$P_{3\phi} = P_{\phi 1} + P_{\phi 2} + P_{\phi 3}; \quad (6.7)$$

$$P_{\phi i} = U_{\phi i} I_{\phi i} \cos \varphi_{\phi i} = R_{\phi i} I_{\phi i}^2. \quad (6.8)$$

Реактивная мощность трехфазной цепи  $Q_{3\phi}$  равна сумме реактивных мощностей фаз приёмника:

$$Q_{3\phi} = Q_{\phi 1} + Q_{\phi 2} + Q_{\phi 3}. \quad (6.9)$$

$$Q_{\phi i} = U_{\phi i} I_{\phi i} \sin \varphi_{\phi i} = X_{\phi i} I_{\phi i}^2. \quad (6.10)$$

Полная мощность трёхфазной цепи

$$S_{3\phi} = \sqrt{P_{3\phi}^2 + Q_{3\phi}^2}. \quad (6.11)$$

Таблица 6.3

#### Вычисленные параметры трёхфазной цепи с реактивным приёмником

Вычисленные параметры	$Z_A$ , Ом	$Z_B$ , Ом	$Z_C$ , Ом	$\varphi_A$ , град	$\varphi_B$ , град	$\varphi_C$ , град	$P_Y$ , Вт	$Q_Y$ , вар	$S_Y$ , ВА
Значения									

4. По данным работы в масштабе построить векторную диаграмму напряжений и токов (рис. 6.2). Векторная диаграмма выполняется на комплексной плоскости  $[+1; j]$  с учётом действующих значений и начальных фаз отображаемых величин. Длина вектора определяется действующим значением величины, а угол его поворота относительно оси  $+1$  – начальной фазой величины.

При выполнении диаграммы начальная фаза напряжения фазы  $A$  приёмника принимается равной нулю, т.е. его вектор является базисным и совпадает по направлению с осью действительных значений  $+1$ .

$$\dot{U}_A = U_\phi e^{j0^\circ}.$$

При построении диаграммы следует учитывать, что:

- вектор фазного тока  $\dot{I}_A$  совпадает с вектором фазного напряжения  $\dot{U}_A$ , так как в фазе А приёмника есть активное сопротивление  $R_L$ ;
- вектор фазного тока  $\dot{I}_B$  опережает вектор фазного напряжения  $\dot{U}_B$  на  $90^\circ$ , так как в фазе В есть реактивное ёмкостное сопротивление  $X_C$ ;
- вектор фазного тока  $\dot{I}_C$  отстает от вектора фазного напряжения  $\dot{U}_C$  на угол  $\varphi_C$ , так как в фазе С располагается реальная катушка индуктивности с полным сопротивлением  $Z_K$ .

5. В соответствии с первым законом Кирхгофа построить вектор тока в нейтральном проводе  $\dot{I}_N$  и сравнить с учетом масштаба полученное графически значение с измеренным экспериментально.

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C.$$

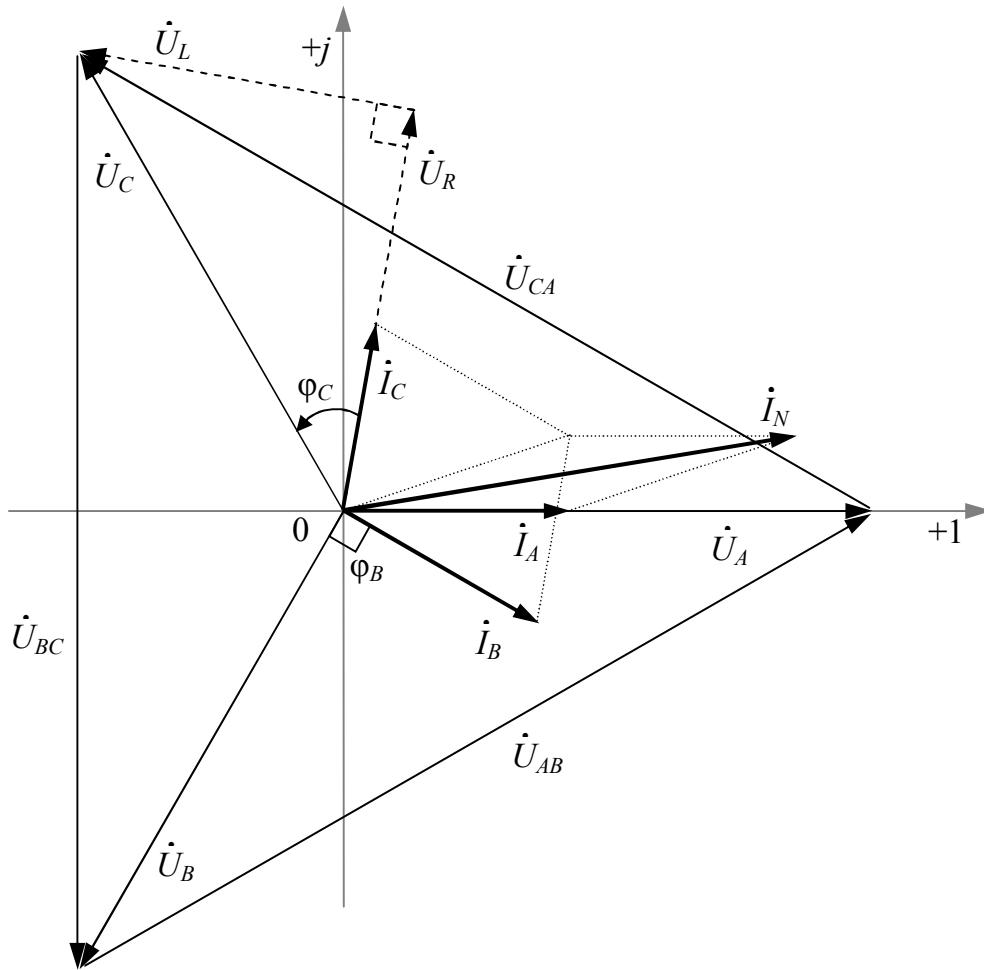


Рис. 6.2. Векторная диаграмма трёхфазной цепи с реактивным приёмником

## Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Изобразите схему четырёхпроводной трёхфазной цепи при соединении фаз реактивного приёмника по схеме «звезда».
2. Покажите на схеме трёхфазной цепи условно–положительные направления фазных и линейных токов и напряжений.
3. Каково назначение нейтрального провода?
4. Необходим ли нейтральный провод при работе трёхфазной цепи с реактивным приёмником?
5. Является ли нагрузка на сеть в работе симметричной?
6. Какое соотношение имеется между действующими значениями линейных и фазных напряжений в данной работе?
7. Поясните вычисления и параметры в табл. 6.2 и табл. 6.3.
8. Поясните построение векторной диаграммы.

## Лабораторная работа №7

### ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ ПРИЕМНИКА «ТРЕУГОЛЬНИКОМ»

**Цель работы:** исследование различных режимов работы трёхфазной электрической цепи при соединении фаз активного приёмника по схеме «треугольник».

#### Общие сведения

Основные теоретические сведения о трёхфазной системе ЭДС приведены в лабораторной работе № 5.

«Треугольником» называется такое соединение приёмника  $P$ , когда конец первой фазы  $X$  соединяется с началом второй фазы  $B$ , конец второй фазы  $Y$  соединяется с началом третьей фазы  $C$ , конец третьей фазы  $Z$  соединяется с началом первой фазы  $A$ . К точкам соединения подключаются линейные провода, идущие от генератора  $G$  (рис. 7.1). Соединение фаз приёмника «треугольником» не предусматривает использование нейтрального провода.

При соединении «треугольником» *фазные* напряжения приёмника  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  являются *линейными* напряжениями генератора  $G$ , т.к. фазы приемника располагаются между линейными проводами, т.е.:

$$\dot{U}_{\phi} = \dot{U}_{л}.$$

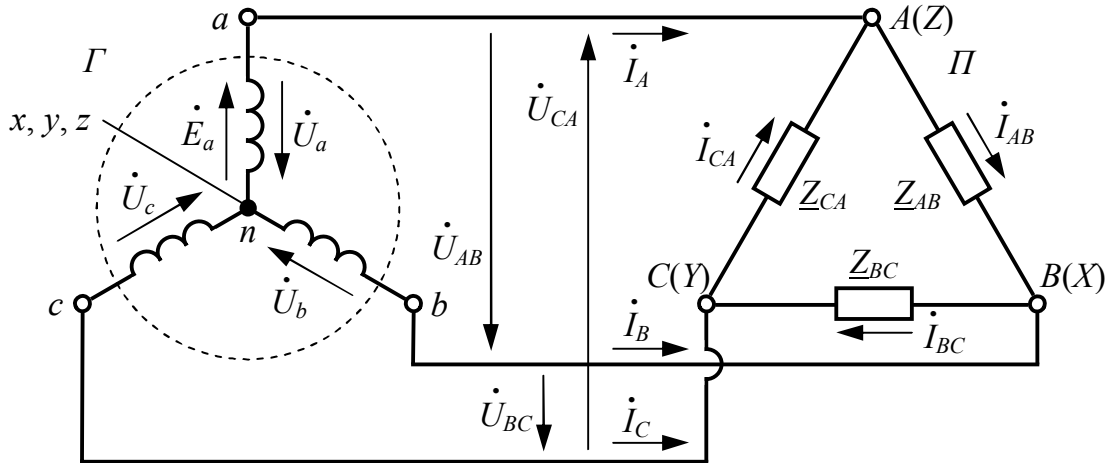


Рис. 7.1. Схема замещения трёхфазной электрической цепи при соединении фаз приёмника по схеме «треугольник»

Трёхфазную систему линейных напряжений при нулевой начальной фазе напряжения фазы  $A$  генератора можно записать в виде комплексных действующих значений:

$$\begin{cases} \dot{U}_a = U_\phi e^{j0^\circ}; \\ \dot{U}_{AB} = U_L e^{+j30^\circ}; \\ \dot{U}_{BC} = U_L e^{-j90^\circ}; \\ \dot{U}_{CA} = U_L e^{+j150^\circ}. \end{cases}$$

Линейные токи, протекающие по линейным проводам, обозначаются:  $I_A, I_B, I_C$ , а фазные, протекающие по фазам приёмника, —  $I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}$ . При соединении фаз приёмника «треугольником» между линейными и фазными токами имеется зависимость в соответствии с первым законом Кирхгофа для узлов  $A, B$  и  $C$

$$\begin{cases} \dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \\ \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \\ \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{cases}$$

Полные сопротивления фаз приёмника обозначают, как и фазные токи, с двумя индексами:  $Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA}$ .

При симметричной нагрузке (равенство полных сопротивлений фаз  $Z_{AB} = Z_{BC} = Z_{CA}$  и фазовых углов нагрузки  $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA}$ ) токи всех фаз приёмника и линейные токи имеют одинаковую величину:

$$I_{AB} = I_{BC} = I_{CA};$$

$$I_A = I_B = I_C,$$

а между действующими значениями линейных и фазных токов в схеме «треугольник» имеется соотношение

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_\Phi.$$

### Вопросы для допуска к работе

1. Что называется трёхфазной электрической цепью?
2. Каковы фазовые сдвиги между линейными напряжениями?
3. Как соединить фазы приёмника «треугольником»?
4. Как измерить линейные и фазные токи?

### Методика проведения работы

Исследуемая трёхфазная цепь (рис. 7.2) состоит из трёх групп ламп накаливания, соединяемых «треугольником» и подключаемых к трёхфазной системе ЭДС распределительного блока БР.

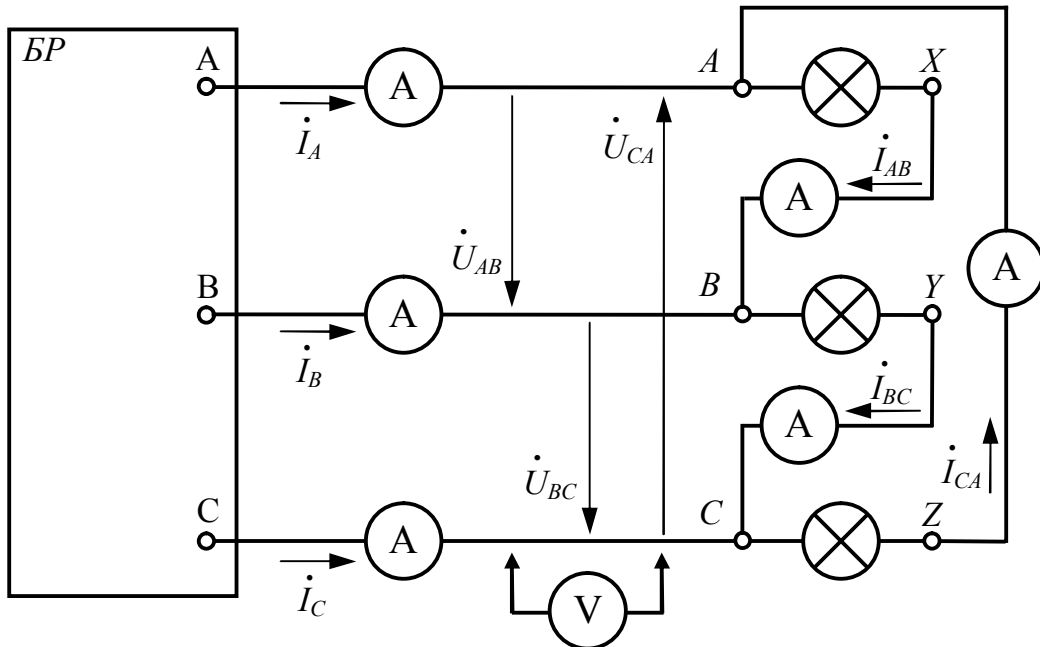


Рис. 7.2. Схема принципиальная исследуемой трёхфазной цепи

В процессе эксперимента необходимо измерить электрические величины трёхфазной цепи при соединении фаз активного приёмника «треугольником» для следующих режимов работы:

1) *симметричная нагрузка* – одинаковое количество включенных ламп в каждой фазе приёмника;

2) *несимметричная нагрузка* – уменьшенное количество включенных ламп в первой фазе приёмника, во второй и третьей фазах – одинаковое количество включенных ламп;

3) *обрыв фазы* – все лампы в первой фазе приёмника отключены, во второй и третьей фазах – одинаковое количество включенных ламп;

4) *обрыв линии* – разрыв цепи на участке протекания первого линейного тока при одинаковом количестве включенных ламп в каждой фазе приёмника.

Во время эксперимента все напряжения измеряются по очереди одним вольтметром, переключая его пределы измерения. В работе используются следующие измерительные приборы:

- вольтметр стрелочный с пределами измерения 150 В и 300 В;
- амперметры стрелочные с пределами измерения 1 А и 2,5 А.

## Порядок выполнения работы

### *Экспериментальная часть*

1. Убедиться в отсутствии напряжения на стенде, проверив главный выключатель и защитные автоматы-выключатели.

2. Произвести монтаж исследуемой цепи согласно схеме на рис. 7.2. С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.

3. Результаты измерений напряжений и токов в каждом опыте фиксируются с учетом цены деления приборов.

4. Смоделировать симметричную нагрузку, включив одинаковое количество ламп (4 – 5) в каждой фазе приёмника. Занести результаты измерений в табл. 7.1.

5. Смоделировать несимметричную нагрузку, выключив 2 – 3 лампы в фазе *AB*, во второй и третьей фазах остается прежнее количество включенных ламп. Занести результаты измерений в табл. 7.1.

6. Смоделировать обрыв фазы *AB*, выключив все лампы в фазе *AB* приёмника, во второй и третьей фазах остается прежнее количество включенных ламп. Занести результаты измерений в табл. 7.1.

7. Смоделировать обрыв линии *A*, выключив первый автомат-выключатель распределительного блока, при одинаковом количестве включенных ламп (4 – 5) в каждой фазе приёмника. Занести результаты измерений в табл. 7.1.

8. Выключить стенд. Результаты измерений показать преподавателю и с его разрешения разобрать цепь.



**Измеренные величины трёхфазной цепи при соединении «треугольником»**

Режим работы	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_{AB},$ А	$I_{BC},$ А	$I_{CA},$ А
Симметричная нагрузка									
Несимметричная нагрузка									
Обрыв фазы $AB$									
Обрыв линии $A$									

*Расчётно-графическая часть*

Для каждой строки табл. 7.1 в масштабе построить векторную диаграмму напряжений и токов. Векторная диаграмма выполняется на комплексной плоскости  $[+1; j]$  с учётом действующих значений и начальных фаз отображаемых величин. Длина вектора определяется действующим значением величины, а угол его наклона относительно оси  $+1$  – начальной фазой величины.

При выполнении диаграммы расположение векторов линейных напряжений  $U_{AB}, U_{BC}, U_{CA}$  принимается согласно их комплексным действующим значениям (см. Общие сведения).

В исследуемой цепи фазы приёмника образованы лампами накалывания, представляющими собой активные сопротивления, у которых фазовые углы  $\varphi_{AB} = \varphi_{BC} = \varphi_{CA} = 0$ . Поэтому векторы фазных токов  $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$  совпадают с векторами фазных напряжений приёмника  $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$  по направлению (рис. 7.3).

Построение векторов линейных токов ведётся путем графического сложения векторов фазных токов согласно первому закону Кирхгофа.

При симметричной нагрузке векторы фазных и линейных токов симметричны и соотносятся друг с другом в пропорции  $\sqrt{3}$ .

При соединении фаз приёмника «треугольником» изменение сопротивления одной из фаз приёмника вызывает изменение соответствующего фазного и двух зависящих от него линейных токов, но не влияет на величины фазных напряжений и токов других фаз, а также на величину третьего линейного тока.

Поэтому при несимметричной нагрузке изменяются фазный ток  $\dot{I}_{AB}$  и два зависящих от него линейных тока  $\dot{I}_A$  и  $\dot{I}_B$ , а при обрыве фазы  $AB$  линейные токи  $\dot{I}_A$  и  $\dot{I}_B$ , согласно первому закону Кирхгофа, становятся равными фазным токам соответственно  $-\dot{I}_{CA}$  и  $\dot{I}_{BC}$ .

При обрыве линии  $A$  линейный ток в ней отсутствует, но он не влияет на образование линейных напряжений  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$  и  $U_{CA}$ . Однако для приёмника цепь становится однофазной с общим напряжением  $U_{BC}$ . В данном случае приёмник образуют две параллельные ветви: первая – с одной группой ламп, а вторая – с двумя последовательно соединенными группами ламп. Первая ветвь находится под напряжением  $U_{BC}$ , а во второй ветви напряжение  $U_{BC}$  делится на два напряжения:  $U_{BA} = -U_{AB}$  и  $U_{AC} = -U_{CA}$ .

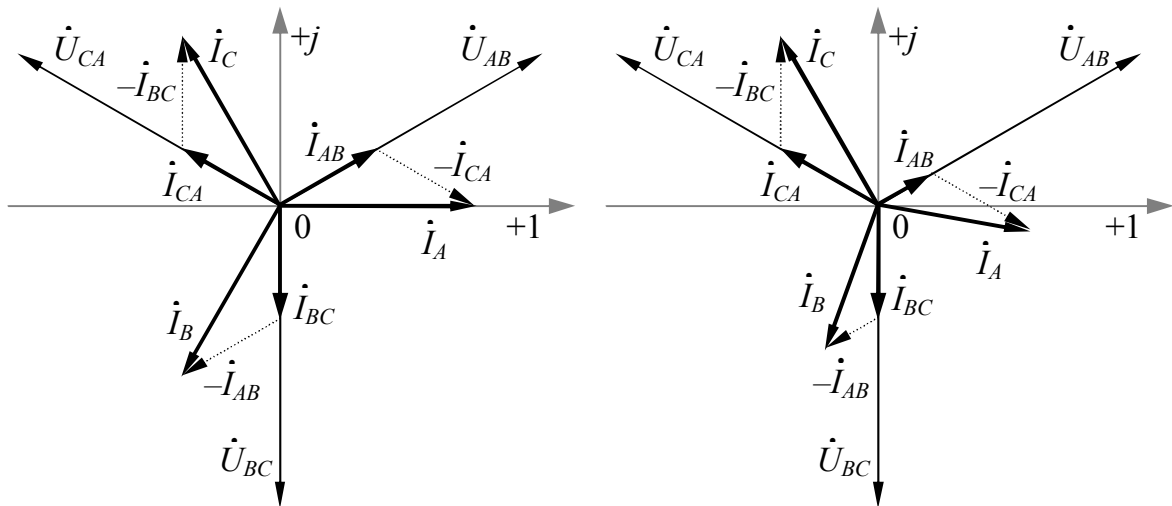


Диаграмма симметричной нагрузки

Диаграмма несимметричной нагрузки

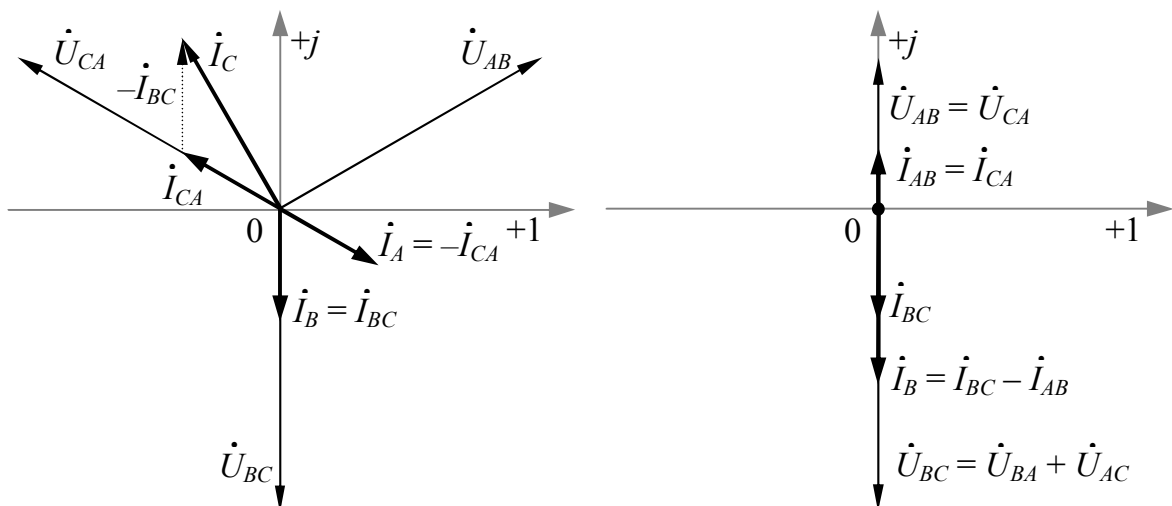


Диаграмма обрыва фазы  $AB$

Диаграмма обрыва линии  $A$

Рис. 7.3. Векторные диаграммы трёхфазной цепи при соединении фаз активного приёмника по схеме «треугольник»

## Вопросы и задания для защиты лабораторной работы

1. Изобразите схему трёхфазной цепи при соединении фаз приёмника «треугольником».
2. Покажите на схеме трёхфазной цепи условно–положительные направления фазных и линейных токов и напряжений.
3. Запишите для соединения фаз приёмника «треугольником» уравнения по законам Кирхгофа.
4. Необходим ли нейтральный провод при работе трёхфазной цепи при соединении фаз приёмника «треугольником»?
5. Какой режим работы трёхфазной цепи называется симметричным?
6. В каком случае линейные токи равны и какое соотношение имеется между действующими значениями линейных и фазных токов при соединении фаз приемника «треугольником»?
7. Как по векторной диаграмме определить линейный ток?
8. Поясните построение векторных диаграмм.

## Лабораторная работа №8

### ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

**Цель работы:** ознакомиться с устройством, принципом работы и методами экспериментального определения параметров и характеристик однофазного трансформатора.

#### Общие сведения

*Трансформатором* называется статический электромагнитный аппарат, имеющий две (или более) индуктивно связанные обмотки и служащий для преобразования энергии переменного тока с одними параметрами в энергию переменного тока с другими параметрами.

Трансформаторы позволяют передавать мощность от источника к приёмнику при разных напряжениях и токах. Трансформаторы используются для преобразования электрической энергии при передаче её на расстояния и во вторичных источниках электропитания, в различных электронных схемах.

Трансформатор выполнен на базе замкнутого магнитопровода (сердечника), собранного из листов электротехнической стали, на котором имеются обмотки. Трансформатор обычно имеет одну первич-

ную и одну или несколько вторичных обмоток (рис. 8.1). Обмотки связаны только индуктивно и не имеют гальванической связи.

Обмотка, подключаемая к сети с более высоким напряжением, называется обмоткой *высшего напряжения* (ВН), а вторая обмотка – обмоткой *низшего напряжения* (НН). Каждая обмотка характеризуется количеством витков ( $w_1$  – у первичной и  $w_2$  – у вторичной), активным  $R_i$ , реактивным индуктивным  $X_i$  и полным  $Z_i$  сопротивлениями.

К первичной обмотке А–Х подводится питающее напряжение  $U_1$  с частотой  $f_1$ . С вторичной обмотки а–х снимается напряжение  $U_2$ , которое подводится к потребителю электрической энергии.

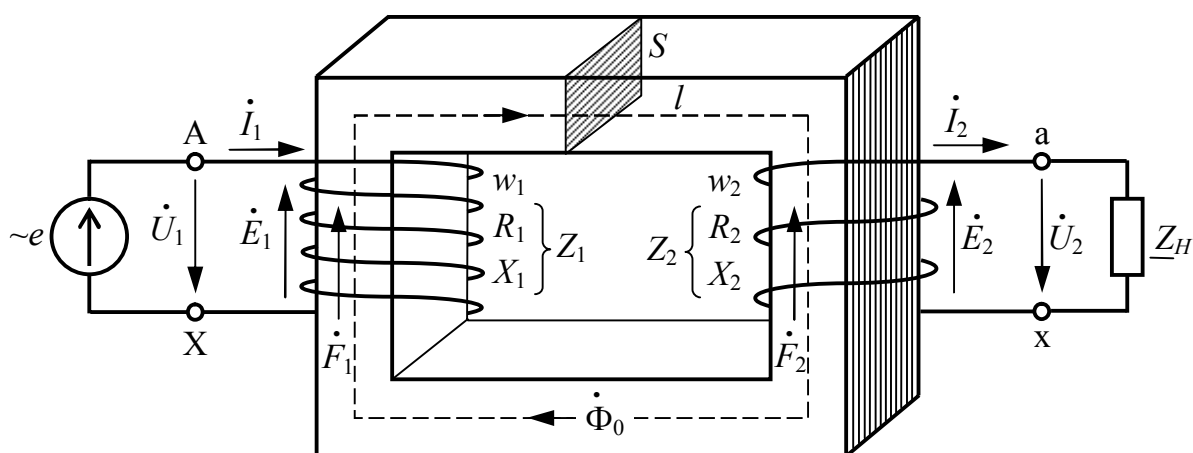


Рис. 8.1. Электромагнитная схема однофазного трансформатора

Под действием напряжения, приложенного к первичной обмотке, в ней протекает ток  $I_1$ , произведение  $I_1 w_1$  является МДС первичной обмотки  $F_1$ , а произведение  $I_2 w_2$  – МДС вторичной обмотки  $F_2$ . Результирующая МДС  $F_0$  определяет величину *основного переменного магнитного потока*  $\Phi_0$ , замыкающегося по магнитопроводу:

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 - \dot{F}_2 = \dot{I}_1 w_1 - \dot{I}_2 w_2; \quad (8.1)$$

$$\dot{\Phi}_0 = \frac{\dot{F}_0}{R_M} = \frac{\mu_a S}{l} \dot{F}_0, \quad (8.2)$$

$$\Phi_0 = \Phi_{0\max} \sin \omega t, \quad (8.3)$$

где  $R_M$  – магнитное сопротивление материала сердечника;  $l$  – длина средней магнитной линии сердечника;  $S$  – площадь сечения сердечника,  $\mu_a$  – абсолютная магнитная проницаемость материала сердечника.

Основной переменной магнитный поток  $\Phi_0$  наводит ЭДС *самоиндукции* в первичной обмотке  $E_1$  и ЭДС *взаимоиндукции*  $E_2$  во вторичной обмотке, действующие значения которых равны:

$$E_1 = \omega w_1 \Phi_{0\max} / \sqrt{2} = 4,44 f w_1 \Phi_{0\max}; \quad (8.4)$$

$$E_2 = \omega w_2 \Phi_{0\max} / \sqrt{2} = 4,44 f w_2 \Phi_{0\max}. \quad (8.5)$$

*Коэффициент трансформации* трансформатора находится как отношение действующего значения ЭДС обмотки высшего напряжения к действующему значению ЭДС обмотки низшего напряжения или как отношение числа витков обмоток:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (8.6)$$

На основании второго закона Кирхгофа можно записать уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмоток:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + \underline{Z}_1 \dot{I}_1; \quad (8.7)$$

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \underline{Z}_2 \dot{I}_2. \quad (8.8)$$

ЭДС  $E_1$ , согласно правилу Ленца, препятствует изменению тока  $I_1$  и совместно с падением напряжения  $Z_1 I_1$  уравнивает питающее напряжение  $U_1$ . Напряжение на вторичной обмотке  $U_2$  меньше ЭДС  $E_2$  на величину падения напряжения  $Z_2 I_2$  на этой обмотке.

Основными рабочими параметрами трансформатора являются:

- номинальные первичное и вторичное напряжения  $U_{1H}$  и  $U_{2H}$ ;
- номинальная полная мощность  $S_H$ ;
- ток и потери холостого хода  $I_{10}$  ( $I_{XX}$ ) и  $P_{10}$  ( $P_{XX}$ );
- напряжение и потери короткого замыкания  $u_{k\%}$  и  $P_{1K}$  ( $P_{K3}$ );
- коэффициент трансформации  $k$ ;
- схема и группа соединений обмоток;
- коэффициент нагрузки трансформатора  $\beta$ ;
- коэффициент полезного действия (КПД)  $\eta$ .

Для определения параметров схемы замещения и характеристик трансформатора проводят опыты холостого хода, короткого замыкания и нагрузки.

### *Работа трансформатора в режиме холостого хода*

В режиме холостого хода (рис. 8.5) к первичной обмотке трансформатора А–Х подводится через лабораторный автотрансформатор ЛАТР напряжение  $U_{10}$ , равное его номинальному значению  $U_{1H}$ . Вторичная обмотка трансформатора а–х при этом разомкнута и ток в ней  $I_{20} = 0$ . В первичной обмотке трансформатора течет ток холостого хода  $I_{10}$  (примерно равен току намагничивания  $I_0$ ), значение которого обычно невелико и составляет 2 – 10% от величины номинального тока первичной обмотки  $I_{1H}$ . С увеличением номинальной мощности трансформатора относительное значение тока холостого хода снижается.

Пренебрегая влиянием падения напряжения на первичной обмотке трансформатора  $Z_1 I_{10}$  ввиду его небольшого значения по сравнению с  $E_1$ , коэффициент трансформации  $k$  приближенно можно определить по показаниям вольтметров при опыте холостого хода как отношение величины напряжения на первичной обмотке  $U_{10}$  к величине напряжения на вторичной обмотке  $U_{20}$ :

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_{10}}{U_{20}}. \quad (8.9)$$

Активная мощность  $P_{10}$ , потребляемая трансформатором в режиме холостого хода, характеризует магнитные потери в магнитопроводе  $P_M$  и электрические потери в первичной обмотке  $P_{\Sigma}$ .

Поскольку активное сопротивление первичной обмотки  $R_1$  и ток холостого хода  $I_{10}$  незначительны, то электрическими потерями можно пренебречь ( $P_{\Sigma 1} = R_1 I_{10}^2 \approx 0$ ) и считать, что вся мощность холостого хода, измеряемая ваттметром, представляет собой мощность магнитных потерь в магнитопроводе  $P_M$ , т.е.

$$P_{10} \approx P_M = R_0 I_{10}^2. \quad (8.10)$$

По результатам измерения электрических величин в опыте холостого хода, можно определить параметры ветви намагничивания схемы замещения холостого хода трансформатора (рис. 8.2):

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{I_{10}}; R_0 = \frac{P_{10}}{I_{10}^2} = Z_0 \cos \varphi_0; X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; \cos \varphi_0 = \frac{P_{10}}{U_{10} I_{10}}, \quad (8.11)$$

где  $R_0$ ,  $X_0$  и  $Z_0$  – активное, реактивное индуктивное и полное сопротивления ветви намагничивания при холостом ходе трансформатора;  $\cos \varphi_0$  – коэффициент мощности холостого хода.

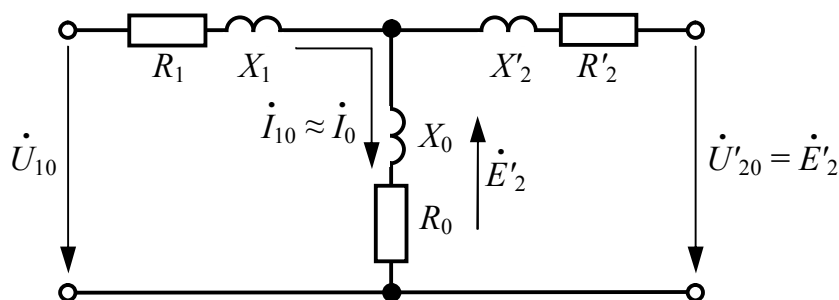


Рис. 8.2. Электрическая схема замещения холостого хода трансформатора

### Работа трансформатора в режиме короткого замыкания

При проведении опыта короткого замыкания трансформатора, в отличие от опасного режима короткого замыкания, возникающего в аварийных условиях самопроизвольно, к первичной обмотке трансформатора А–Х подводится через ЛАТР малое напряжение  $U_{1K}$  около 5% от  $U_{1H}$ , при котором в его первичной обмотке возникает ток, равный номинальному значению  $I_{1K} = I_{1H}$ . Вторичная обмотка трансформатора а–х при этом замкнута накоротко (рис. 8.6), и напряжение на ней равно нулю ( $U_{2K} = 0$ ), а ток приближается к номинальному значению  $I_{2K} = I_{2H}$ .

Коэффициент трансформации  $k$  приближенно можно определить при опыте короткого замыкания как отношение величины тока вторичной обмотки  $I_{2K}$  к величине тока первичной обмотки  $I_{1K}$ :

$$k = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{I_{2K}}{I_{1K}} = \frac{I_{2H}}{I_{1H}}. \quad (8.12)$$

Опыт короткого замыкания проводится в процессе исследований трансформатора для определения электрических потерь мощности в обмотках  $P_{\mathcal{E}}$ . При опыте короткого замыкания вся мощность  $P_{1K}$ , потребляемая трансформатором, идет на нагрев обмоток трансформатора, а магнитные потери в магнитопроводе  $P_M \approx 0$ . Мощность  $P_{1K}$ , измеряемая ваттметром, равна электрическим потерям мощности в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке, так как  $I_{1K} = I_{1H}$ :

$$P_{1K} \approx P_{\mathcal{E}} = R_1 I_{1K}^2 + R_2 I_{2K}^2 = R_K I_{1K}^2. \quad (8.13)$$

По результатам измерения электрических величин в опыте короткого замыкания, можно определить параметры трансформатора при коротком замыкании:

$$Z_K = \frac{U_{1K}}{I_{1K}}; R_K = \frac{P_{1K}}{I_{1K}^2} = Z_K \cos \varphi_k; X_K = \sqrt{Z_K^2 - R_K^2}; \cos \varphi_k = \frac{P_{1K}}{U_{1K} I_{1K}}, \quad (8.14)$$

где  $R_K$ ,  $X_K$  и  $Z_K$  – активное, реактивное индуктивное и полное сопротивление короткого замыкания трансформатора;  $\cos \varphi_k$  – коэффициент мощности короткого замыкания.

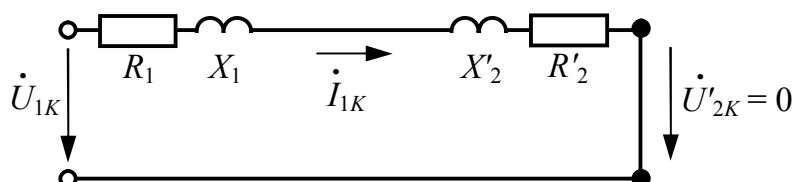


Рис. 8.3. Электрическая схема замещения короткого замыкания трансформатора

Отсюда можно вычислить параметры обмоток в схеме замещения короткого замыкания трансформатора (рис. 8.3):

$$R_1 = R_2' = R_2 k^2 = \frac{R_K}{2}; X_1 = X_2' = X_2 k^2 = \frac{X_K}{2}. \quad (8.15)$$

Напряжение короткого замыкания  $u_{k\%}$  является важным параметром трансформатора, на основании которого определяется изменение напряжения вторичной обмотки нагруженного трансформатора.

$$u_{k\%} = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} = \frac{Z_K I_{1H}}{U_{1H}} \cdot 100\%. \quad (8.16)$$

Чем выше номинальные напряжения обмоток трансформатора, тем больше  $u_{k\%}$ , так как с увеличением толщины изоляции проводов возрастают потокосцепления рассеяния, а следовательно, и индуктивные сопротивления рассеяния обмоток  $X_1$  и  $X_2$ .

#### *Работа трансформатора в режиме нагрузки*

В режиме нагрузки трансформатора (рис. 8.7) получают *нагрузочные характеристики* (рис. 8.4) – зависимости напряжения вторичной обмотки  $U_2$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi_1$  и КПД трансформатора  $\eta$  от тока нагрузки  $I_2$  при  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  и  $U_1 = \text{const}$ .

Зависимость  $U_2(I_2)$  является *внешней характеристикой* трансформатора. Согласно выражению (8.8), изменение тока нагрузки трансформатора  $I_2$  приводит к изменению напряжения  $U_2$  на зажимах его вторичной обмотки.



КПД трансформатора  $\eta$  в номинальном режиме обычно составляет от 80 до 95% и представляет собой отношение полезной мощности к мощности, потребляемой им из сети, а также может определяться через мощность нагрузки с учетом магнитных и электрических потерь.

Электрические потери  $P_{\Sigma}$  являются переменными, так как их величина зависит от величин токов в обмотках или от *коэффициента нагрузки* трансформатора  $\beta$ . При неизменном первичном напряжении ( $U_1 = \text{const}$ ) магнитные потери  $P_M$  постоянны, т. е. не зависят от нагрузки трансформатора. Максимально возможный КПД трансформатора достигается при чисто активной нагрузке  $\cos\varphi_2 = 1$ .

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_2}{P_2 + \beta^2 P_{\Sigma} + P_M} \cdot 100\%; \quad (8.17)$$

$$P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2; \quad (8.18)$$

$$\beta = I_2 / I_{2H}. \quad (8.19)$$

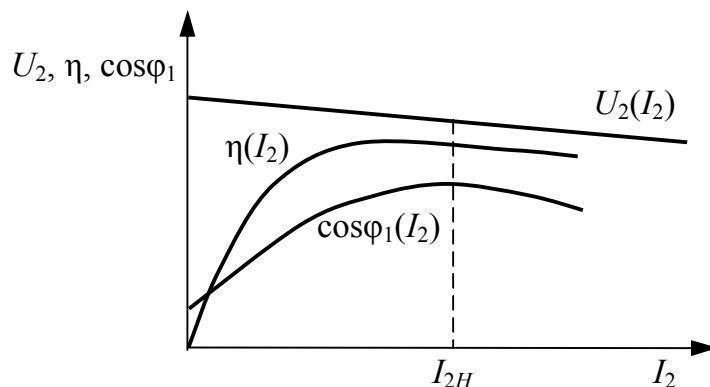


Рис. 8.4. Нагрузочные характеристики трансформатора

### Вопросы для допуска к работе

1. Для чего применяется трансформатор?
2. Каково устройство трансформатора?
3. Какие основные рабочие параметры имеет трансформатор?
4. Какие параметры и характеристики трансформатора определяются экспериментально?

## Методика проведения работы

Исследуемый однофазный трансформатор ТПП 280-220-50К имеет следующие рабочие параметры:

- частота питающего напряжения 50 Гц;
- номинальное напряжение на первичной обмотке  $U_{1H} = 220$  В;
- номинальное напряжение на вторичной обмотке  $U_{2H} = 21$  В;
- номинальный ток первичной обмотки  $I_{1H} = 0,42$  А;
- номинальный ток вторичной обмотки  $I_{2H} = 4,2$  А;
- номинальная активная мощность  $P_H = 72$  Вт.

В процессе эксперимента необходимо измерить электрические величины первичной и вторичной обмоток трансформатора при следующих режимах работы:

- 1) *холостой ход* – разомкнутая вторичная обмотка;
- 2) *короткое замыкание* – вторичная обмотка замкнута накоротко;
- 3) *режим нагрузки* – к вторичной обмотке подключается приёмник электрической энергии.

В качестве приёмника используется лабораторный реостат, представляющий собой регулируемое активное сопротивление с коэффициентом мощности  $\cos\varphi_2 = 1$ .

Для регулирования напряжения на первичной обмотке трансформатора  $U_1$  используется лабораторный автотрансформатор ЛАТР.

Во время эксперимента все напряжения измеряются по очереди одним вольтметром, переключая его пределы измерения. В работе используются следующие измерительные приборы:

- вольтметр стрелочный с пределами измерения 150 В и 300 В;
- амперметры стрелочные с пределами измерения 0,5 – 5 А;
- ваттметр стрелочный с пределами измерения 100 Вт и 150 Вт.

## Порядок выполнения работы

### *Экспериментальная часть*

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием стенда, используемым при выполнении работы, занести в отчет по лабораторной работе рабочие параметры исследуемого трансформатора.

2. Убедиться в отсутствии напряжения на стенде, проверив главный выключатель и защитные автоматы-выключатели.

3. Произвести монтаж цепи для опыта холостого хода трансформатора согласно схеме на рис. 8.5. С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.

4. Результаты измерений напряжений, токов и мощности в каждом опыте фиксируются с учетом цены деления приборов.

5. Провести опыт холостого хода трансформатора: с помощью ЛАТР установить напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_{10}$ , равное номинальному напряжению  $U_{1H}$ . Произвести однократное измерение напряжения  $U_{10}$ , тока  $I_{10}$ , мощности  $P_{10}$  в первичной обмотке и напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора  $U_{20}$ . Занести результаты измерений в табл. 8.1.

6. Выключить стенд. Произвести монтаж цепи для опыта короткого замыкания трансформатора согласно схеме на рис. 8.6. С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.

7. Провести опыт короткого замыкания трансформатора: плавно увеличивая с нуля напряжение на первичной обмотке с помощью ЛАТР, установить ток в первичной обмотке  $I_{1K}$ , равный номинальному току  $I_{1H}$ . Произвести однократное измерение напряжения  $U_{1K}$ , тока  $I_{1K}$  и мощности  $P_{1K}$  на первичной обмотке и тока во вторичной обмотке трансформатора  $I_{2K}$ . Занести результаты измерений в табл. 8.2.

8. Выключить стенд. Произвести монтаж цепи для опыта нагрузки согласно схеме на рис. 8.7. С разрешения преподавателя или инженера включить стенд.

9. Провести опыт нагрузки трансформатора: с помощью ЛАТР установить и поддерживать неизменным напряжение на первичной обмотке трансформатора  $U_1$ , равным номинальному  $U_{1H}$ . Изменяя сопротивление реостата во вторичной цепи, провести пять измерений напряжения  $U_1$ , тока  $I_1$ , мощности  $P_1$  первичной обмотки и напряжения  $U_2$  и тока  $I_2$  вторичной обмотки при различных токах нагрузки  $I_2$  в диапазоне  $(0,2 - 1,2)I_{2H}$ . Занести результаты измерений в табл. 8.3.

10. Выключить стенд. Результаты измерений показать преподавателю и с его разрешения разобрать цепь.

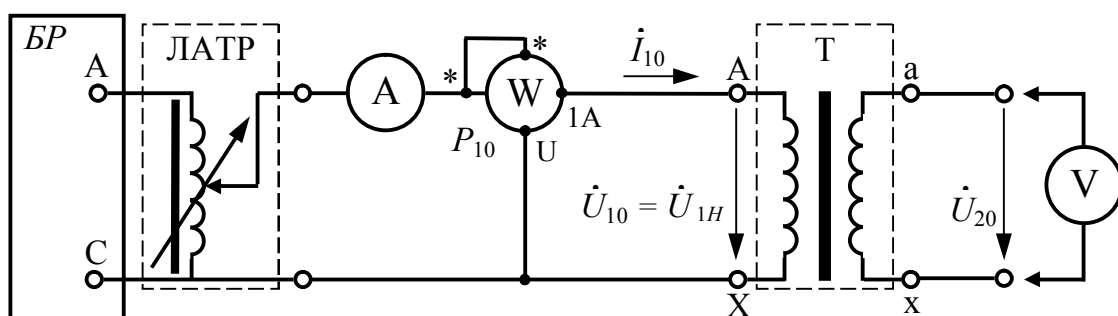


Рис. 8.5. Схема принципиальная опыта холостого хода трансформатора

Таблица 8.1

**Измеренные величины и вычисленные параметры опыта холостого хода**

Измерения			Вычисления					
$U_{10}, В$	$I_{10}, А$	$P_{10}, Вт$	$U_{20}, В$	$k, -$	$\cos\varphi_0, -$	$Z_0, Ом$	$R_0, Ом$	$X_0, Ом$

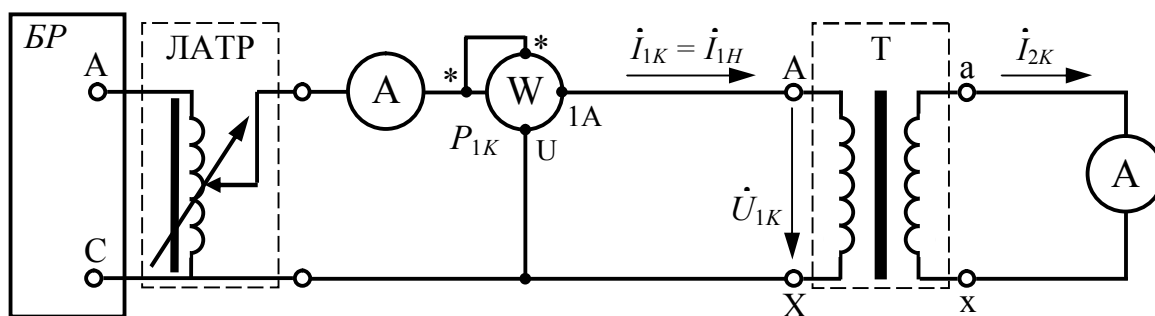


Рис. 8.6. Схема принципиальная опыта короткого замыкания трансформатора

Таблица 8.2

**Измеренные величины и вычисленные параметры опыта короткого замыкания**

Измерения				Вычисления					
$U_{1K}, В$	$I_{1K}, А$	$P_{1K}, Вт$	$I_{2K}, А$	$k, -$	$\cos\varphi_k, -$	$Z_K, Ом$	$R_K, Ом$	$X_K, Ом$	$u_k, \%$

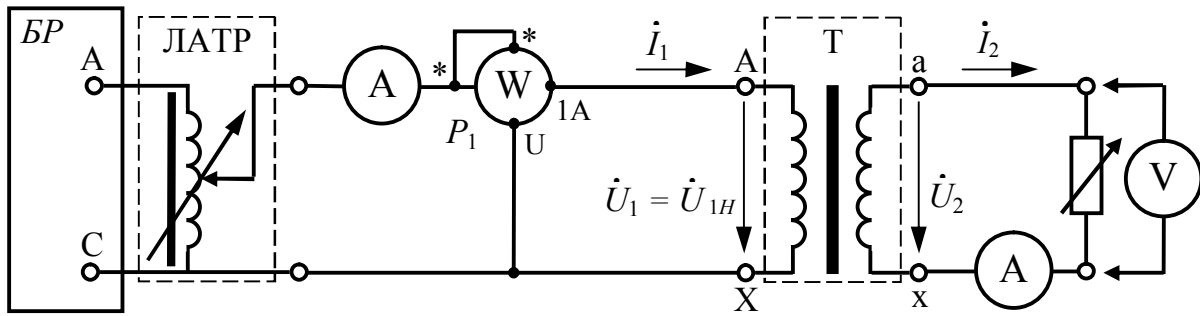


Рис. 8.7. Схема принципиальная опыта нагрузки трансформатора

Таблица 8.3

### Измеренные величины и вычисленные параметры режима нагрузки

Номер измерения	Измерения					Вычисления			
	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$P_2, \text{Вт}$	$\beta, -$	$\eta, \%$	$\cos\varphi_1, -$
1									
2									
3									
4									
5									

### Расчётно-графическая часть

1. По результатам измерений, проведенных в опыте холостого хода, определить:

- коэффициент трансформации  $k$  по формуле (8.9);
- параметры ветви намагничивания  $Z_0, R_0, X_0$  и коэффициент мощности при холостом ходе  $\cos\varphi_0$  по формулам (8.11).

2. По результатам измерений, проведенных в опыте короткого замыкания, определить:

- коэффициент трансформации  $k$  по формуле (8.12);
- параметры трансформатора при коротком замыкании  $R_K, Z_K, X_K$  и  $\cos\varphi_k$  по формулам (8.14);
- напряжение короткого замыкания  $u_{k\%}$  по формуле (8.16).

3. По результатам измерений, проведенных в опыте нагрузки, определить:

- мощность нагрузки трансформатора  $P_2$  по формуле (8.18);
- коэффициент нагрузки трансформатора  $\beta$  по формуле (8.19);
- КПД трансформатора  $\eta$  по формуле (8.17);
- коэффициент мощности  $\cos\varphi_1$  по формулам (8.11).

4. По данным табл. 8.3 в масштабе построить нагрузочные характеристики трансформатора  $U_2(I_2)$ ,  $\eta(I_2)$ ,  $\cos\varphi_1(I_2)$ .

### **Вопросы и задания для защиты лабораторной работы**

1. Что называется трансформатором?
2. Объясните устройство и принцип действия однофазного трансформатора.
3. Поясните условно–положительные направления электрических и магнитных величин на электромагнитной схеме трансформатора.
4. Запишите и поясните уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмоток.
5. Перечислите основные рабочие параметры трансформатора.
6. Расскажите, как и с какой целью проводится опыт холостого хода трансформатора.
7. Расскажите, как и с какой целью проводится опыт короткого замыкания трансформатора?
8. Расскажите, как и с какой целью проводится опыт нагрузки трансформатора?
9. Как коэффициент трансформации трансформатора определяется из опытов холостого хода и короткого замыкания?
10. Почему в опыте холостого хода можно пренебречь электрическими потерями мощности в обмотках трансформатора?
11. Почему при изменении тока нагрузки во вторичной обмотке трансформатора изменяется ток в первичной его обмотке?
12. При какой нагрузке достигается максимально возможный КПД трансформатора?
13. Что является внешней характеристикой трансформатора?
14. Изобразите и поясните схемы замещения трансформатора при холостом ходе и коротком замыкании.

## Библиографический список

1. *Белов, Н. В.* Электротехника и основы электроники : учебное пособие / Н. В. Белов, Ю. С. Волков. – СПб. : Лань, 2012. – 432 с. – Режим доступа к электрон. копии: [http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1\\_id=3553](http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=3553) (дата обращения: 05.06.2017).
2. *Иванов, И.И.* Электротехника и основы электроники [Электронный ресурс] : учебник / И.И. Иванов, Г.И. Соловьев, В.Я. Фролов. – Электрон. дан. – СПб. : Лань, 2016. – 736 с. – Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/71749>. – Загл. с экрана (дата обращения: 05.06.2017).
3. *Реброва, И. А.* Расчёт установившихся режимов в линейных электрических цепях : учебно-методическое пособие / И. А. Реброва. – Омск : СибАДИ, 2013. – 91 с. – Режим доступа к электрон. копии: <http://bek.sibadi.org/fulltext/EPD820.pdf> (дата обращения: 05.06.2017).
4. *Тихонов, Ю. Б.* Общая электротехника и электроника : учебное пособие / Ю. Б. Тихонов, Г. М. Третьяк. – Омск : СибАДИ, 2012. – 372 с. – Режим доступа к электрон. копии: <http://bek.sibadi.org/fulltext/epd626.pdf> (дата обращения: 05.06.2017).
5. Правила устройства электроустановок / ред. А.М. Меламед. – 7-е изд. – М. : НЦ ЭНАС, 2015. – 560 с.
6. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок : утв. приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 24.07.2013 г. №328н «Об утверждении Правил по охране труда при эксплуатации электроустановок». – М. : Омега-Л, 2017. – 141 с.

*Учебное издание*

Иван Васильевич Лазута,  
Ирина Анатолиевна Реброва

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Лабораторный практикум

\*\*\*

Редактор Н.В. Павлова

\*\*\*

Подписано к печати 08.06.2017  
Формат 60×90 1/16. Бумага писчая  
Оперативный способ печати  
Гарнитура Times New Roman  
Усл. п. л. 5,0  
Тираж 120 экз. Заказ №

\*\*\*

Издательско-полиграфический комплекс СибАДИ  
644080, г. Омск, пр. Мира, 5  
РИО ИПК СибАДИ. 644080, г. Омск, ул. 2-я Поселковая, 1

Отпечатано в типографии ИПК СибАДИ  
644080, г. Омск, пр. Мира, 5



## Лабораторная работа № 1

### ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

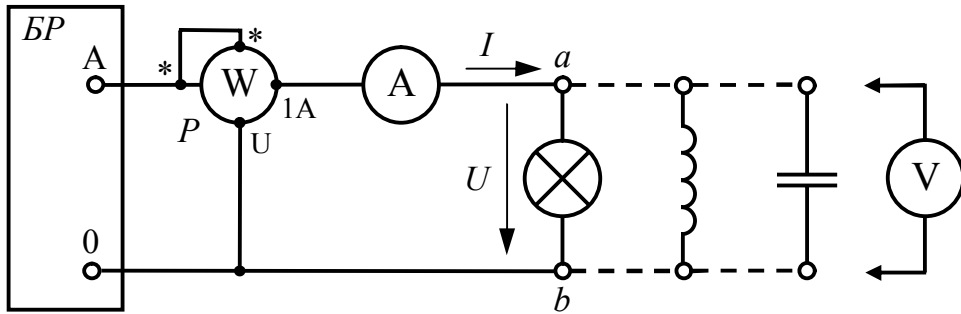


Схема принципиальная измерения электрических величин

### Параметры и показания измерительных приборов

Вид нагрузки	Амперметр				Вольтметр				Ваттметр			
	$N_{xI}$	$I_N$	$N_I$	$K_I$	$N_{xU}$	$U_N$	$N_U$	$K_U$	$N_{xP}$	$P_N$	$N_P$	$K_P$
	дел.	А	дел.	%	дел.	В	дел.	%	дел.	Вт	дел.	%
Лампы												
Катушка												
Конденсатор												

### Результаты и погрешности прямых измерений

Вид нагрузки	$C_I$	$C_U$	$C_P$	$I$	$U$	$P$	$\Delta I$	$\Delta U$	$\Delta P$	$\delta_I$	$\delta_U$	$\delta_P$
	$\frac{A}{\text{дел}}$	$\frac{B}{\text{дел}}$	$\frac{Bt}{\text{дел}}$	А	В	Вт	А	В	Вт	%	%	%
Лампы												
Катушка												
Конденсатор												

### Результаты и погрешности косвенных измерений

Вид нагрузки	$R$	$\cos\varphi$	$\Delta R$	$\Delta \cos\varphi$	$\delta_R$	$\delta_{\cos\varphi}$
	Ом	-	Ом	-	%	%
Лампы						
Катушка						
Конденсатор						

## Лабораторная работа № 2

### РАЗВЕТВЛЁННАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

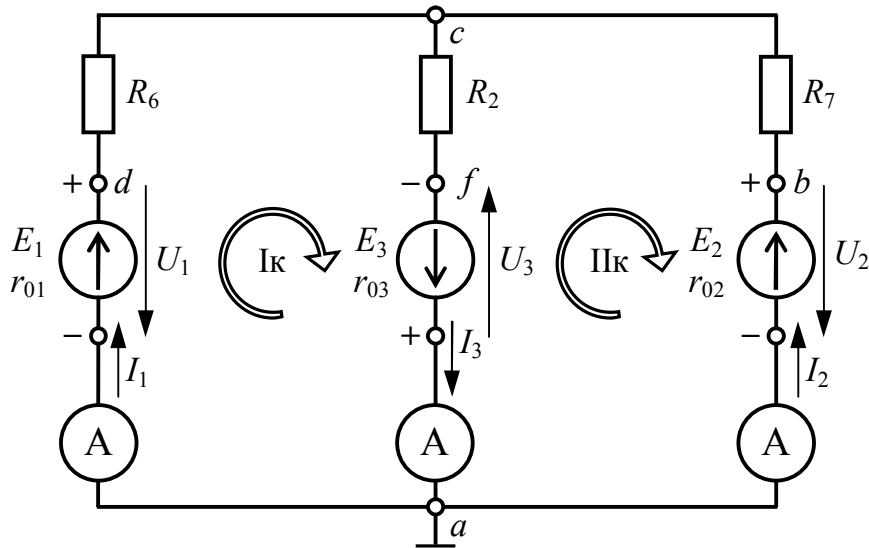


Схема принципиальная исследуемой цепи постоянного тока

#### Параметры источников и потребителей электрической цепи

$R_2$	$R_6$	$R_7$	$E_1$	$E_2$	$E_3$
Ом	Ом	Ом	В	В	В

#### Результаты измерений величин цепи постоянного тока

$I_1$	$I_2$	$I_3$	$\varphi_d - \varphi_a$	$\varphi_b - \varphi_a$	$\varphi_f - \varphi_a$	$\varphi_d - \varphi_c$	$\varphi_b - \varphi_c$	$\varphi_f - \varphi_c$
А	А	А	В	В	В	В	В	В

#### Результаты вычислений величин цепи постоянного тока

$R_{01}$	$R_{02}$	$R_{03}$	$\varphi_a$	$\varphi_b$	$\varphi_c$	$\varphi_d$	$\varphi_f$
Ом	Ом	Ом	В	В	В	В	В
			0				

### Лабораторная работа № 3

#### ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТИВНОГО, ИНДУКТИВНОГО И ЁМКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТОВ

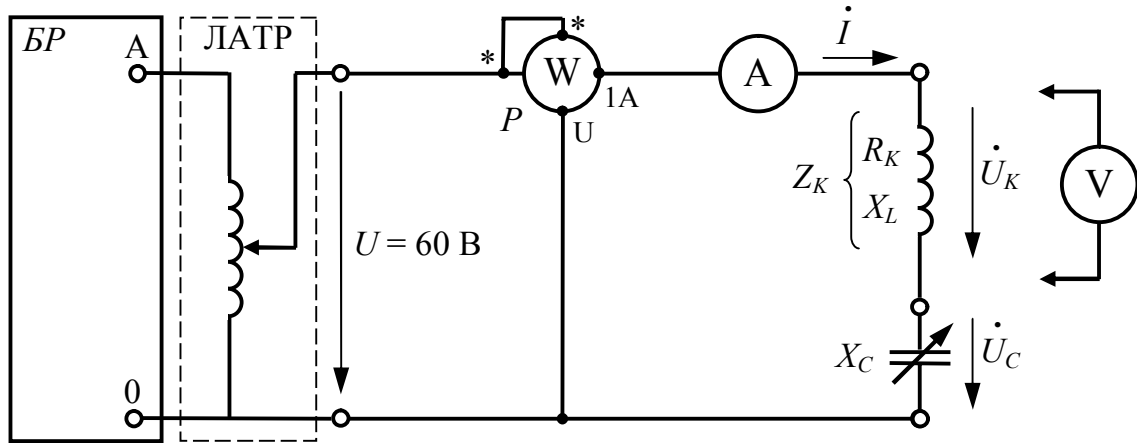


Схема принципиальная исследуемой последовательной  $RLC$  цепи

#### Результаты измерений величин последовательной $RLC$ цепи

№ опыта	$U$	$C$	$I$	$P$	$U_K$	$U_C$
	В	мкФ	А	Вт	В	В
1	60					
2						
3						
4						
5						

#### Результаты вычислений величин последовательной $RLC$ цепи

№ опыта	Параметры катушки					$X_C$	$U_R$	$U_L$	$\cos\varphi$
	$Z_K$	$R_K$	$X_L$	$L$	$\cos\varphi_K$				
	Ом	Ом	Ом	Гн	-				
1						Ом	В	В	-
2									
3									
4									
5									

## Лабораторная работа № 4

### ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТИВНОГО, ИНДУКТИВНОГО И ЁМКОСТНОГО ЭЛЕМЕНТОВ

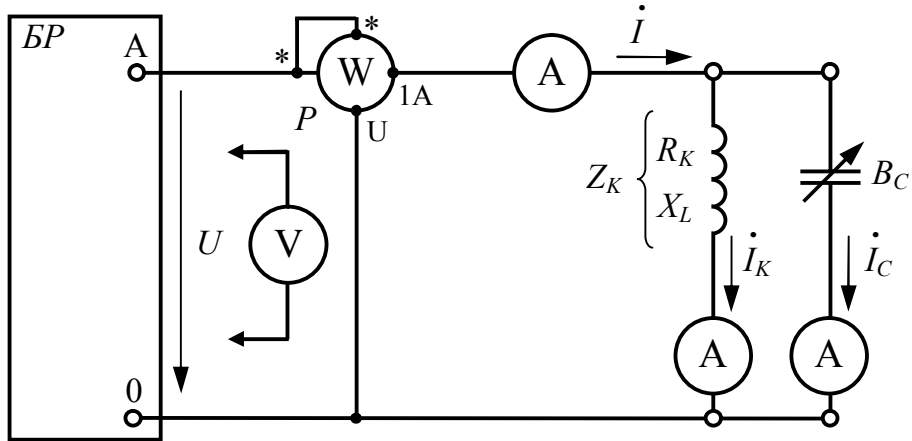


Схема принципиальная исследуемой параллельной  $RLC$  цепи

#### Результаты измерений величин параллельной $RLC$ цепи

№ опыта	$U$	$C$	$I$	$I_K$	$I_C$	$P$
	В	мкФ	А	А	А	Вт
1						
2						
3						
4						
5						

#### Результаты вычислений величин параллельной $RLC$ цепи

№ опыта	Параметры катушки					$B_C$	$I_G$	$I_L$	$\cos\varphi$
	$Z_K$	$R$	$X_L$	$G_K$	$B_L$				
	Ом	Ом	Ом	мСм	мСм	мСм	А	А	-
1									
2									
3									
4									
5									

## Лабораторная работа №5

### ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ ПРИЕМНИКА «ЗВЕЗДОЙ»

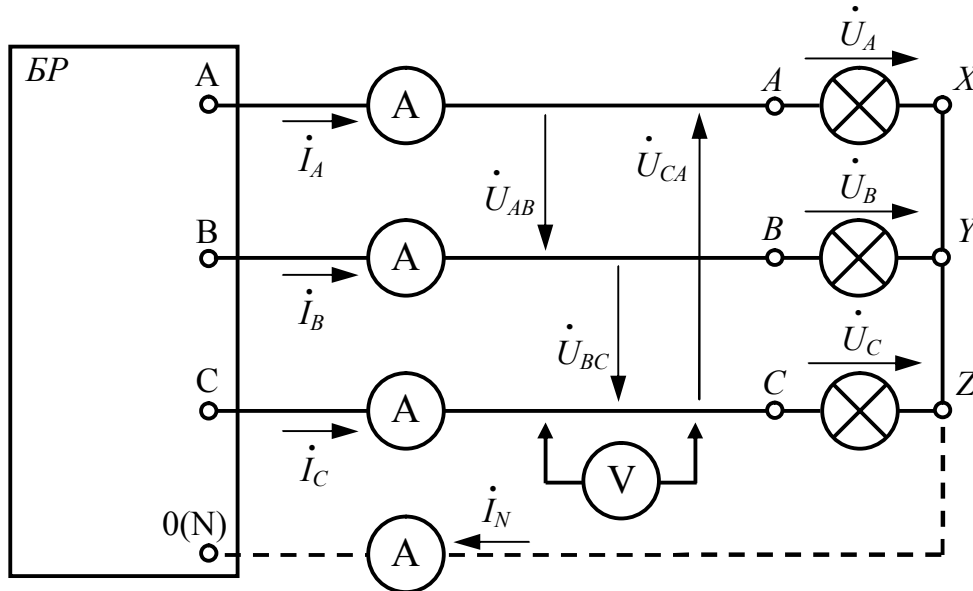


Схема принципиальная исследуемой трёхфазной цепи

#### Результаты измерений величин трёхфазной цепи с активным приёмником

Трёхпроводная цепь (без нейтрального провода)										
Режим работы	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$U_{nN}$
	В	В	В	В	В	В	А	А	А	В
Симметричная нагрузка										
Несимметричная нагрузка										
Обрыв фазы A										
Короткое замыкание фазы A										
Четырёхпроводная цепь (с нейтральным проводом)										
Режим работы	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_N$
	В	В	В	В	В	В	А	А	А	А
Симметричная нагрузка										
Несимметричная нагрузка										
Обрыв фазы A										

## Лабораторная работа №6

### ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ РЕАКТИВНОГО ПРИЕМНИКА «ЗВЕЗДОЙ»

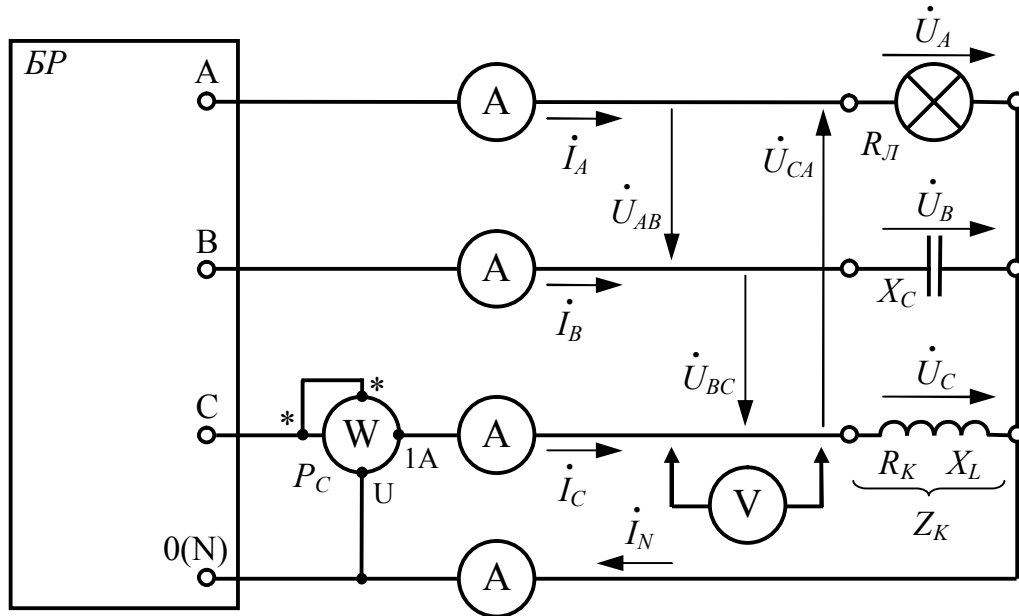


Схема принципиальная исследуемой трёхфазной цепи с реактивным приёмником

#### Результаты измерений величин трёхфазной цепи с реактивным приёмником

Измеренные величины	$U_L$	$U_\Phi$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_N$	$C$	$P_C$
	В	В	А	А	А	А	мкФ	Вт
Значения								

#### Результаты вычислений параметров фаз трёхфазного приёмника

Вычисленные параметры	$R_L$	$X_C$	$Z_K$	$R_K$	$X_L$	$L$	$\cos\varphi_K$
	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Гн	—
Значения							

#### Вычисленные параметры трёхфазной цепи с реактивным приёмником

Вычисленные параметры	$Z_A$	$Z_B$	$Z_C$	$\varphi_A$	$\varphi_B$	$\varphi_C$	$P_Y$	$Q_Y$	$S_Y$
	Ом	Ом	Ом	град	град	град	Вт	вар	ВА
Значения									

## Лабораторная работа №7

### ТРЕХФАЗНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ФАЗ ПРИЕМНИКА «ТРЕУГОЛЬНИКОМ»

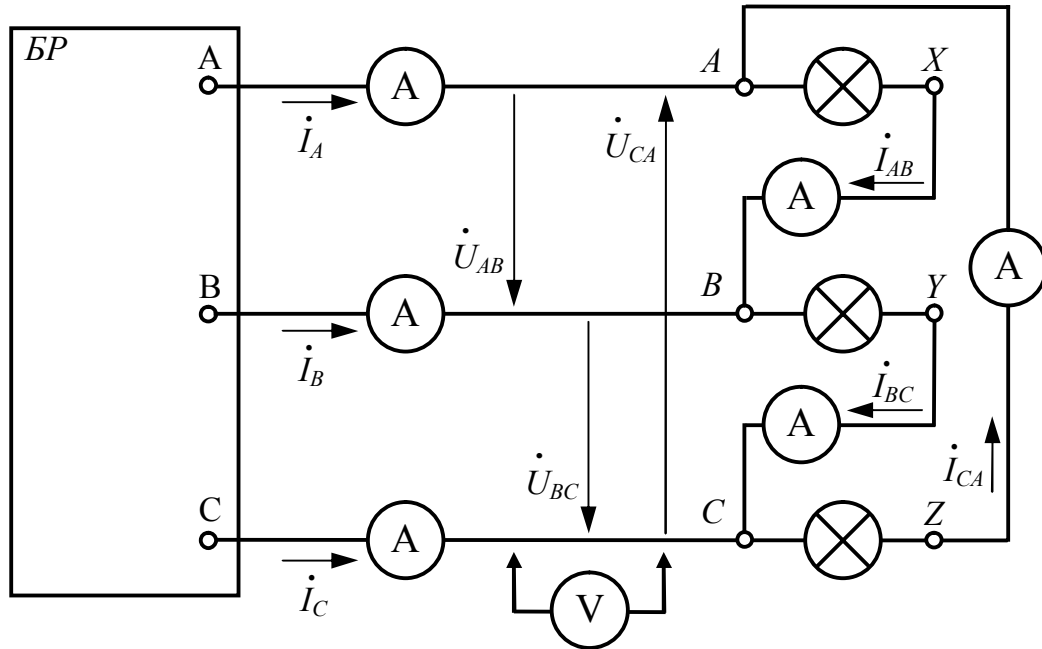


Схема принципиальная исследуемой трёхфазной цепи

#### Измеренные величины трёхфазной цепи при соединении «треугольником»

Режим работы	$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$	$I_A$	$I_B$	$I_C$	$I_{AB}$	$I_{BC}$	$I_{CA}$
	В	В	В	А	А	А	А	А	А
Симметричная нагрузка									
Несимметричная нагрузка									
Обрыв фазы AB									
Обрыв линии A									

## Лабораторная работа №8

### ОДНОФАЗНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР

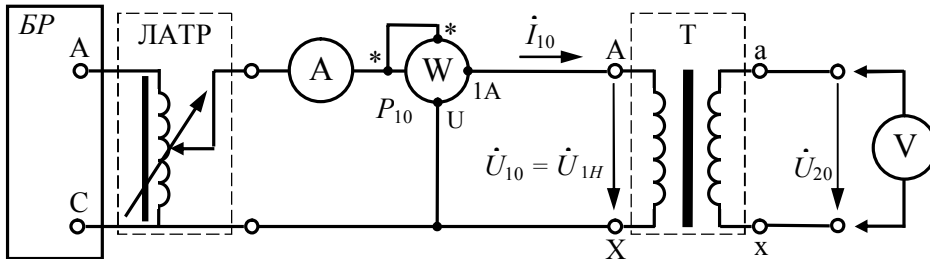


Схема  
опыта  
холодного  
хода

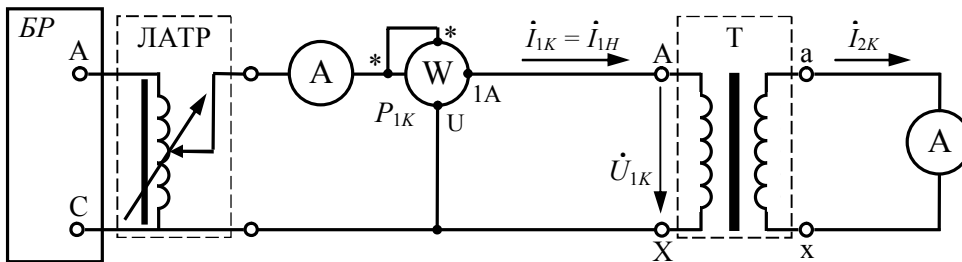


Схема  
опыта  
короткого  
замыкания

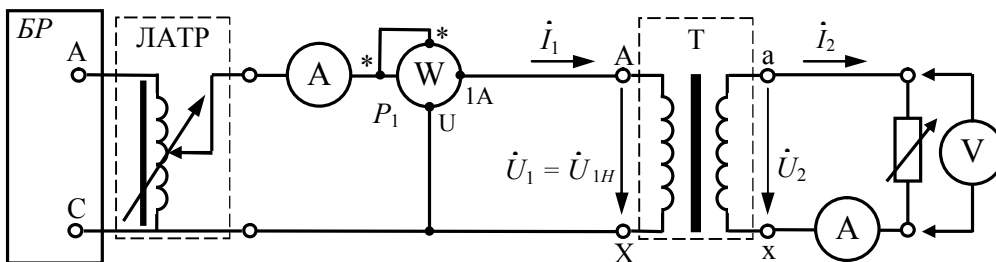


Схема  
опыта  
нагрузки

#### Измеренные величины и вычисленные параметры опыта холостого хода

Измерения				Вычисления				
$U_{10}, \text{В}$	$I_{10}, \text{А}$	$P_{10}, \text{Вт}$	$U_{20}, \text{В}$	$k$	$\cos\varphi_0$	$Z_0, \text{Ом}$	$R_0, \text{Ом}$	$X_0, \text{Ом}$

#### Измеренные величины и вычисленные параметры опыта короткого замыкания

Измерения				Вычисления					
$U_{1K}, \text{В}$	$I_{1K}, \text{А}$	$P_{1K}, \text{Вт}$	$I_{2K}, \text{А}$	$k$	$\cos\varphi_K$	$Z_K, \text{Ом}$	$R_K, \text{Ом}$	$X_K, \text{Ом}$	$u_K, \%$

#### Измеренные величины и вычисленные параметры режима нагрузки

№ измерения	Измерения					Вычисления			
	$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$U_2, \text{В}$	$I_2, \text{А}$	$P_2, \text{Вт}$	$\beta$	$\eta$	$\cos\varphi_1$
1									
2									
3									
4									
5									