

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет
Институт химии и энергетики

Ю.В. Черненко, И.В. Горохов

ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ И ПОДСТАНЦИЙ

Лабораторный практикум



© ФГБОУ ВО «Тольяттинский
государственный университет», 2021

ISBN 978-5-8259-1578-4

УДК 621.311.2:621.313/316

ББК 31.277.1

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой
«Электрооборудование и электрохозяйство предприятий,
организаций и учреждений» Казанского государственного
энергетического университета *Н.В. Роженцова*;
д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение
и электротехника» Тольяттинского государственного
университета *А.А. Кувшинов*.

Черненко, Ю.В. Электрооборудование электрических станций
и подстанций : лабораторный практикум / Ю.В. Черненко,
И.В. Горохов. – Тольятти : Изд-во ТГУ, 2021. – 1 оптический
диск. – ISBN 978-5-8259-1578-4.

В практикуме изложены цель, программа выполнения лабораторных работ, требования к содержанию отчёта; приведены контрольные вопросы, список используемых источников для углубленного изучения теоретического материала.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» основной профессиональной образовательной программы высшего образования.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader.

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2021



Редактор *Т.М. Воропанова*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

Дата подписания к использованию 28.04.2021.

Объем издания 13,2 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Заказ № 1-33-20.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 53-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

Введение	5
Лабораторная работа 1. Изучение конструкций разъединителей. Регулировка высоковольтного разъединителя	7
Лабораторная работа 2. Изучение конструкции высоковольтного выключателя	11
Лабораторная работа 3. Конструкции распределительных устройств. Системы измерений на подстанциях	16
Лабораторная работа 4. Исследование режимов работы нейтрали в электрической установке	19
Лабораторная работа 5. Заземляющие устройства электрических установок	34
Заключение	41
Библиографический список	42

ВВЕДЕНИЕ

Цель изучения дисциплины «Электрические станции и подстанции» — сформировать у студентов знания в области устройства электрооборудования и главных электрических схем электростанций и подстанций, а также умения и навыки, связанные с работой в составе электроэнергетической системы.

Задачи учебного курса:

✓ Научить студентов принципам работы основного и вспомогательного высоковольтного электрооборудования, устанавливаемого на электрических станциях и подстанциях.

✓ Научить студентов использовать нормативные правила и методики выбора основного и вспомогательного высоковольтного оборудования электрических станций и подстанций.

Лабораторные работы выполняются на стендах в лаборатории «Электрооборудование станций и подстанций». На занятиях студенты изучают оборудование и аппараты электрических станций и подстанций, схемы их первичных и вторичных цепей и конструкции распределительных устройств. В связи с этим цель занятий — сформировать у студентов знания в области устройства электрооборудования электрических станций и подстанций. Основные задачи: ознакомление обучающихся с назначением, основными параметрами, конструкцией и принципами работы электротехнического оборудования электростанций и подстанций; изучение схем электрических соединений электрических станций и подстанций, распределительных устройств.

В результате изучения данного курса студент должен

знать: схемы и основное электрооборудование электрических станций и подстанций; основные режимы работы электротехнического оборудования электрических станций и подстанций;

уметь: применять и эксплуатировать электрооборудование электрических станций и подстанций; анализировать техническую информацию по электрооборудованию, схемам электрических соединений электрических станций и подстанций; графически отображать схемы распределительных устройств;

владеть: навыками обоснования конкретного технического решения при создании электроэнергетического и электротехнического оборудования; навыками работы со справочной литературой и нормативно-техническими материалами.

В каждой лабораторной работе после определения цели и содержания даются методические указания по ее выполнению.

Лабораторная работа 1

Изучение конструкций разъединителей. Регулировка высоковольтного разъединителя

Цель работы — изучение конструкций разъединителей и условий применения в распределительных устройствах, способов испытания и регулировки высоковольтных разъединителей.

План проведения занятия и пояснения по его выполнению

Лабораторная работа выполняется в два этапа: дома и непосредственно в лаборатории.

Дома перед выполнением очередной лабораторной работы необходимо провести предварительную подготовку, для чего нужно: ознакомиться с содержанием предстоящей работы, уяснить ее цель; повторить теоретический материал по рекомендуемой литературе; ответить на контрольные вопросы, продумать план проведения работы; составить предварительный отчет со схемами, таблицами, расчетами (если имеются). При отсутствии предварительного отчета студент к работе не допускается.

В лаборатории ознакомиться с имеющимися конструкциями разъединителей, их типом, паспортными данными, приводом, устройством. Сделать эскиз одного из них. На основе предварительного отчета, конкретного задания и кратких методических указаний студенты получают допуск к работе, а потом под руководством лаборанта приступают к ее выполнению.

В лаборатории произвести проверку одновременности включения ножей трехфазного разъединителя.

Проверка одновременности включения ножей трехфазного разъединителя

Для проверки одновременности включения ножей пользуются схемой (рис. 1.1).

При отключенных ножах подают напряжение на разъединитель и медленно производят включение ножей. При загорании лампы снимают напряжение с установки и линейкой делают замер зазора между ножом и губкой каждой недовключенной фазы. Результаты измерения заносят в табл. 1.1.

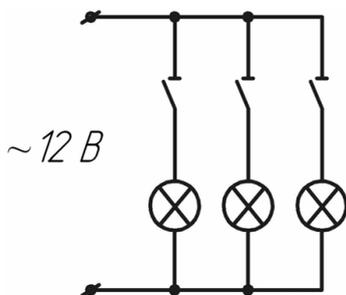


Рис. 1.1. Электрическая схема проверки одновременности включения ножей

Таблица 1.1

Результаты измерений одновременности включения ножей

Фаза	Замер, мм					Среднее
	1	2	3	4	5	
А						
В						
С						

Используя данные табл. 1.1, делается вывод о проверке одновременности включения ножей.

Требования к технике безопасности при выполнении работы

Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ после инструктажа по технике безопасности с личными подписями в специальном журнале. Ответственность за выполнение правил техники безопасности возлагается как на преподавателей, проводящих занятия в лаборатории, так и на студентов. Лица, не выполняющие правила безопасности или допускающие их нарушение, отстраняются от выполнения лабораторных работ. От студентов, работающих в лаборатории, требуется не нарушать правила безопасности самим и останавливать не выполняющих эти правила. Особые правила безопасности, характерные для конкретных лабораторных работ, указаны в соответствующих описаниях.

Собранную и проверенную схему показывают преподавателю или лаборанту и только после этого получают разрешение включать установку. При включении схемы надо внимательно следить за поведением приборов, если они имеются; при резких ударах стрелок приборов схема должна быть немедленно отключена от источника питания. По окончании работы и согласования с руководителем результатов испытаний схема должна быть разобрана и рабочий стол подготовлен для работы другой бригады. В качестве исполнительного отчета служит предварительный отчет, дополненный результатами испытаний и общими выводами. Далее студенты отчитываются за сделанную работу.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Программа выполнения работы.
4. Эскиз разъединителя (вариант задается преподавателем из табл. 1.2).
5. Результаты измерений и выводы.

Таблица 1.2

Варианты силовых разъединителей для эскизов

№ варианта	Тип разъединителя	№ варианта	Тип разъединителя
1	РП-330	13	РВ-10
2	РВФ-10	14	ДВФ/ЕК 500
3	РГ-110	15	РЛНД-1-10Б/400
4	РВП-10	16	РВПЗ-10
5	РПД-750	17	РЛНД-10
6	РЛНД-10	18	РГ-35
7	ДВФ/ЕК 220	19	РДС-500
8	РВЗ-35	20	РВПЗ-20
9	РГ-П-110	21	РВФЗ-10
10	РПД-500	22	РГНП-1-110
11	РДП-110Б	23	РВ-6
12	РГНП-2-110	24	РЛНД-2-10Б/1000

Контрольные вопросы

1. Назначение разъединителей.
2. Конструкции и обозначение типов разъединителей.
3. Условия выбора и проверки разъединителей.
4. Какие типы приводов применяются на разъединителях?
5. Основные производители разъединителей.

Литература для подготовки к лабораторным работам и самостоятельной работы [1; 3–8; 10–12].

Лабораторная работа 2

Изучение конструкции высоковольтного выключателя

Цель работы — изучить конструкции высоковольтных выключателей и приводов высоковольтных выключателей и провести профилактические испытания выключателя ВМП-10.

План проведения занятия и пояснения по его выполнению

Лабораторная работа выполняется в два этапа: дома и непосредственно в лаборатории.

Дома перед выполнением очередной лабораторной работы необходимо провести предварительную подготовку, для чего нужно: ознакомиться с содержанием предстоящей работы, уяснить ее цель; повторить теоретический материал по рекомендуемой литературе; ответить на контрольные вопросы, продумать план проведения работы; составить предварительный отчет со схемами, таблицами, с эскизом конструкции выключателя и привода (тип выключателя и привода задаётся преподавателем). При отсутствии предварительного отчета студент к работе не допускается.

В лаборатории произвести профилактические испытания выключателя ВМП-10 (в данной работе испытания в полном объеме не проводятся, проводят только проверку хода подвижных частей выключателя). На основе предварительного отчета, конкретного задания и кратких методических указаний студенты получают допуск к работе, а потом под руководством лаборанта приступают к ее выполнению.

Проверка хода подвижных частей выключателя

Проверка хода подвижных стержней в розеточных контактах выключателей всех типов серии ВМП-10 определяется с помощью штанги *I* (рис. 2.1). Медленным перемещением рычага ручного включения доводят подвижные стержни до касания с ламелями розеточного контакта. В этот момент делают первую метку *A* на штанге *I* и замеряют разновременность касания подвижных стержней при помощи электрических ламп, собранных по схеме (рис. 2.2).

Разновременность не должна превышать 5 мм.

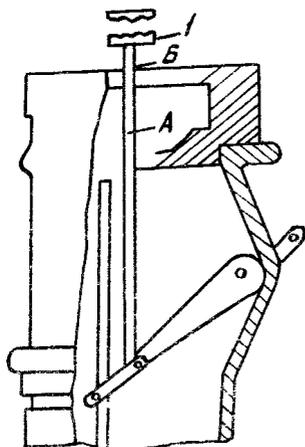


Рис. 2.1. Проверка хода подвижных стержней в розеточных контактах выключателей

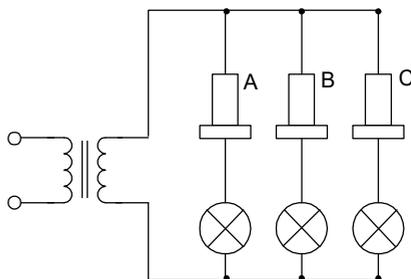


Рис. 2.2. Разновременность касания подвижных стержней при помощи электрических ламп

Ручку выключателя выводят до упора и делают вторую метку *Б* на штанге *А* (рис. 2.1), после чего производят замер хода в розеточном контакте между метками *А* и *Б*.

Замеры делают на всех трёх полюсах. Результаты измерений заносят в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Результаты измерений разновременности касания подвижных стержней

Фаза	Расстояние, мм
А	
В	
С	

Используя данные табл. 2.1, сделать вывод о разновременности касания подвижных стержней.

Требования к технике безопасности при выполнении работы

Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ после инструктажа по технике безопасности с личными подписями в специальном журнале. Ответственность за выполнение правил техники безопасности возлагается как на преподавателей, проводящих занятия в лаборатории, так и на студентов. Лица, не выполняющие правила безопасности или допускающие их нарушение, отстраняются от выполнения лабораторных работ. От студентов, работающих в лаборатории, требуется не нарушать правила безопасности самим и останавливать не выполняющих эти правила. Особые правила безопасности, характерные для конкретных лабораторных работ, указаны в соответствующих описаниях.

В качестве исполнительного отчета служит предварительный отчет, дополненный результатами испытаний и общими выводами. Далее студенты отчитываются за проделанную работу.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Программа выполнения работы.
4. Эскиз конструкции выключателя с описанием (вариант задается преподавателем из табл. 2.2).
5. Результаты измерений и выводы.

Таблица 2.2

Варианты силовых выключателей для эскизов

№ варианта	Тип выключателя
1	ВМЭ-6-200-I
2	ВМБ-10-200-1.25
3	С-35М-630-Ю У1
4	МКП-110-1000-20 У1
5	ВМГ-133
6	МГ-10
7	ВВУ-35-2000-40 ХЛ1
8	ВВТ-10
9	ВПМ-10
10	ВЭК-110Б
11	ВВБМ-330-2000-31, 5 ХЛ1
12	ВВЛ-35
13	ВВК-35
14	ВВТЭ-10
15	МГУ-10
16	ВВГ-20-2000-160 У1
17	ВМТ-110Б
18	ВГТ-1А1-220
19	ВВ-10
20	ВГГ-750
21	ВГК-500
22	ВВЭ-10
23	ВГТ-35
24	ВГМ-10
25	ВВК-110
26	ВМП-35ПТ
27	ВМТ-220Б
28	ВК-10
29	ВЭКТ-110

Контрольные вопросы

1. Назначение высоковольтных выключателей.
2. Конструкции и основные элементы выключателей.
3. Классификация и принцип действия масляных, воздушных, элегазовых и вакуумных выключателей.
4. Условия выбора и проверки высоковольтных выключателей.
5. Основные производители выключателей.
6. Назначение привода выключателя.
7. Конструкция и принцип действия различных видов приводов.

Литература для подготовки к лабораторным работам и самостоятельной работы [1; 3–8; 10–12].

Лабораторная работа 3

Конструкции распределительных устройств. Системы измерений на подстанциях

Цель работы — изучить конструкции распределительных устройств, требования к ним при сооружении и эксплуатации. Изучить системы измерений на подстанциях, способы расстановки измерительных приборов.

План проведения занятия и пояснения по его выполнению

Лабораторная работа выполняется в два этапа: дома и непосредственно в лаборатории.

Дома перед выполнением очередной лабораторной работы необходимо провести предварительную подготовку, для чего нужно: ознакомиться с содержанием предстоящей работы, уяснить ее цель; повторить теоретический материал по рекомендуемой литературе; ответить на контрольные вопросы, продумать план проведения работы; составить предварительный отчет с планом и разрезом подстанции.

При отсутствии предварительного отчета студент к работе не допускается.

Изучение конструкции распределительных устройств. Системы измерения, применяемые на подстанциях

1. Начертить в масштабе план и разрез подстанции (тип и схема подстанции задается преподавателем по табл. 3.1).

2. По чертежу плана и разреза составить и нарисовать электрическую схему подстанции с указанием типов оборудования и аппаратов.

3. Расставить на электрической схеме подстанции необходимые измерительные приборы и объяснить назначение устанавливаемых в заданной схеме измерительных приборов.

Таблица 3.1

Тип и схема подстанции

№ варианта	Схема подстанции	Тип трансформатора	Тип выключателя	Тип разъединителя
1	110-4Н	Силовой трансформатор	Элегазовый	Качающийся
2	220-5АН	Силовой трансформатор	Вакуумный	Поворотный
3	330-6Н	Силовой трансформатор	Масляный	Рубящий
4	500-7	Силовой трансформатор	Элегазовый	Качающийся
5	35-5Н	Силовой трансформатор	Вакуумный	Поворотный
6	110-6	Силовой трансформатор	Масляный	Рубящий
7	110-7	Силовой трансформатор	Элегазовый	Качающийся
8	500-6Н	Силовой трансформатор	Вакуумный	Поворотный
9	35-5АН	Автотрансформатор	Масляный	Рубящий
10	330-7	Автотрансформатор	Элегазовый	Качающийся
11	220-6Н	Автотрансформатор	Вакуумный	Поворотный
12	35-4Н	Автотрансформатор	Масляный	Рубящий
13	220-6	Автотрансформатор	Элегазовый	Качающийся
14	110-5Н	Автотрансформатор	Вакуумный	Поворотный
15	220-4Н	Автотрансформатор	Масляный	Рубящий
16	110-4Н	Автотрансформатор	Вакуумный	Поворотный
17	220-5АН	Автотрансформатор	Масляный	Рубящий
18	330-6Н	Автотрансформатор	Элегазовый	Качающийся
19	500-7	Автотрансформатор	Вакуумный	Поворотный
20	35-5Н	Автотрансформатор	Масляный	Рубящий
21	110-6	Автотрансформатор	Элегазовый	Качающийся
22	110-7	Автотрансформатор	Вакуумный	Поворотный
23	500-6Н	Автотрансформатор	Масляный	Рубящий
24	35-5АН	Силовой трансформатор	Элегазовый	Качающийся
25	330-7	Силовой трансформатор	Вакуумный	Поворотный
26	220-6Н	Силовой трансформатор	Масляный	Рубящий
27	35-4Н	Силовой трансформатор	Элегазовый	Качающийся
28	220-6	Силовой трансформатор	Вакуумный	Поворотный
29	110-5Н	Силовой трансформатор	Масляный	Рубящий
30	220-4Н	Силовой трансформатор	Элегазовый	Качающийся

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Электрическая схема плана и разреза подстанции.
4. Электрическая схема подстанции с указанием типов оборудования и аппаратов, с расстановкой измерительных приборов.

Контрольные вопросы

1. Типы и конструкции распределительных устройств.
2. Какие электрические схемы применяются в распределительных устройствах разных видов напряжения?
3. Какое электрооборудование применяется на подстанциях?
4. Какой оперативный ток используется на подстанциях?
5. Назначение измерительных приборов.
6. Какие измерительные приборы применяются на подстанциях?

Литература для подготовки к лабораторным работам и самостоятельной работы [1–12].

Лабораторная работа 4

Исследование режимов работы нейтрали в электрической установке

Цель работы — закрепление теоретических сведений об особенностях режимов работы электрических сетей с различными способами заземления нейтрали.

План проведения занятия и пояснения по его выполнению

Лабораторная работа выполняется в два этапа: дома и непосредственно в лаборатории.

Дома перед выполнением очередной лабораторной работы необходимо провести предварительную подготовку, для чего нужно: ознакомиться с содержанием предстоящей работы — изучить работу сети с разными режимами нейтралей; уяснить цель работы; повторить теоретический материал по рекомендуемой литературе; ответить на контрольные вопросы, продумать план проведения работы; составить предварительный отчет со схемами, таблицами. При отсутствии предварительного отчета студент к работе не допускается.

В лаборатории провести три эксперимента режимов работы нейтрали.

Первый эксперимент. Определение влияния разземления нейтрали трансформатора на режим эффективного заземления нейтрали в электрической установке.

Электрическая схема соединений (рис. 4.1) соответствует схеме моделируемой электрической сети (рис. 4.2) [14]. Перечень аппаратуры представлен в табл. 4.1.

Источник G1 моделирует питающую электрическую систему С.

Источник G2 питает функциональные блоки электрической энергией напряжением 220 В/50 Гц и обеспечивает защиту работающих на стенде лиц от поражения электрическим током.

Трехфазные трансформаторные группы А1 и А2 моделируют соответственно трансформаторы Т1 и Т2.

Модели А3, А4 линий электропередачи имитируют линии электропередачи Л1 и Л2.

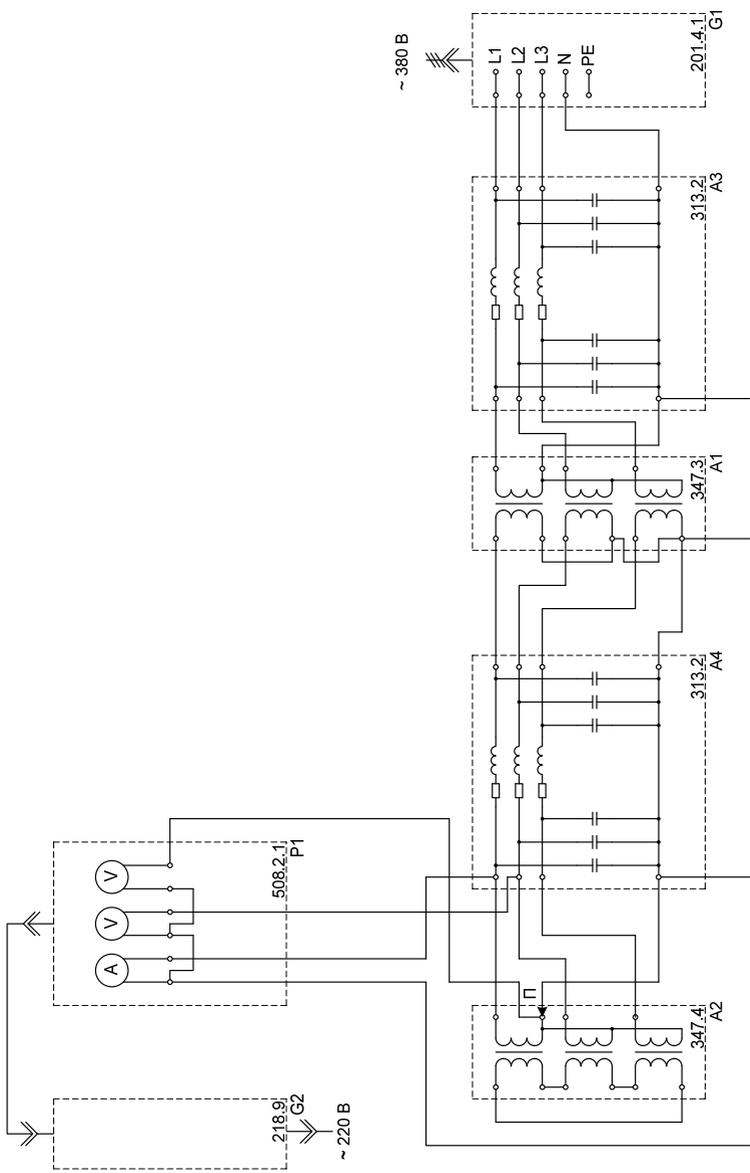


Рис. 4.1. Электрическая схема соединений

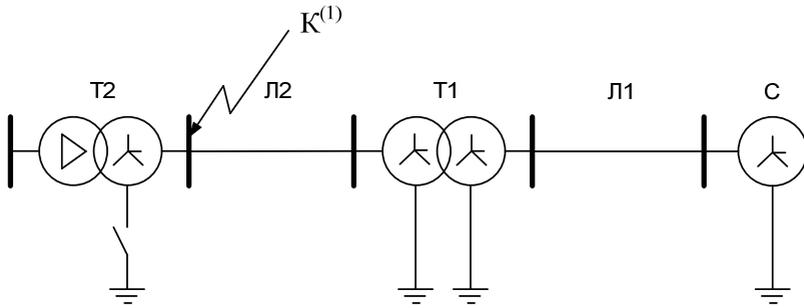


Рис. 4.2. Схема моделируемой электрической сети

Проводник П имитирует заземляющий нож в нейтрали трансформатора Т2.

Блок мультиметров Р1 позволяет производить измерение токов и напряжений в электрической цепи.

Таблица 4.1

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	201.4.1	~ 3×220 В / 6 А
G2	Однофазный источник питания	218.9	~ 220 В / 6 А
A1	Трёхфазная трансформаторная группа	347.3	3×80 В · А (звезда) 220, 225, 230 В / 133, 220, 225, 230, 235, 240, 245 В
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	347.4	3×80 В · А (треугольник) 230 В / 133, 220, 225, 230, 235, 240, 245 В
A3, A4	Модель линии электропередачи	313.2	400 В ~; 3 × 0,5 А
P1	Блок мультиметров	508.2.1	3 мультиметра ≅ 0...1000 В / ≅ 0...10 А / 0...20 МОм

Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления «⊕» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «PE» источника G1.
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений.
4. Установите переключателями исходные значения (варианты задаются преподавателем из табл. 4.2).

Таблица 4.2

Исходные значения

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_1 T_1, В$	220	225	230	235	220	225	230	235
$U_2 T_1, В$	133	133	133	133	133	133	133	133
$U_1 T_2, В$	235	230	225	220	235	230	225	220
$R_{Л1}, Ом$	0	50	0	50	0	50	0	50
$L_{Л1}, Гн$	1,2	0,9	1,2	0,9	1,2	0,9	1,2	0,9
$C/2_{Л1}, мкФ$	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
$R_{Л2}, Ом$	0	0	0	0	50	50	50	50
$L_{Л2}, Гн$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
$C/2_{Л2}, мкФ$	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18

5. Включите источник G2.
6. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и активизируйте используемые мультиметры.
7. Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
8. Занесите показания амперметра (ток устойчивого однофазного короткого замыкания $I^{(0)}$) и вольтметров (напряжения неповрежденной фазы U_{Φ} и нейтрали трансформатора U_N) блока мультиметров P1 в табл. 4.3 при заземленной нейтрали трансформатора T2.

Результаты измерения

	Нейтраль трансформатора Т2 заземлена	Нейтраль трансформатора Т2 разземлена (изолирована)
$I^{(1)}$, А		
U_{Φ} , В		
U_N , В		

9. Разземлите (изолируйте) нейтраль трансформатора Т2, отсоединив от нее проводник П.

10. Занесите показания амперметра (ток устойчивого однофазного короткого замыкания $I^{(1)}$) и вольтметров (напряжения неповрежденной фазы U_{Φ} и нейтрали трансформатора U_N) блока мультиметров Р1 в табл. 4.3 при разземленной (изолированной) нейтрали трансформатора Т2.

11. По завершении эксперимента отключите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и источники G1, G2.

12. Используя данные табл. 4.3, сделайте вывод о влиянии разземления нейтрали трансформатора на режим эффективного заземления нейтрали в электрической установке.

Второй эксперимент. Снятие зависимостей напряжений фаз, напряжения нейтрали заземляющего трансформатора и тока устойчивого однофазного короткого замыкания от активного сопротивления в месте замыкания в режиме компенсированной нейтрали электрической установки.

Электрическая схема соединений (рис. 4.3) соответствует схеме моделируемой электрической сети (рис. 1.4) [14]. Перечень аппаратуры представлен в табл. 4.4.

Источник G1 моделирует питающую электрическую систему С.

Источник G2 питает функциональные блоки электрической энергией напряжением 220 В/50 Гц и обеспечивает защиту работающих на стенде лиц от поражения электрическим током.

Трехфазная трансформаторная группа А1 моделирует трансформатор Т1.

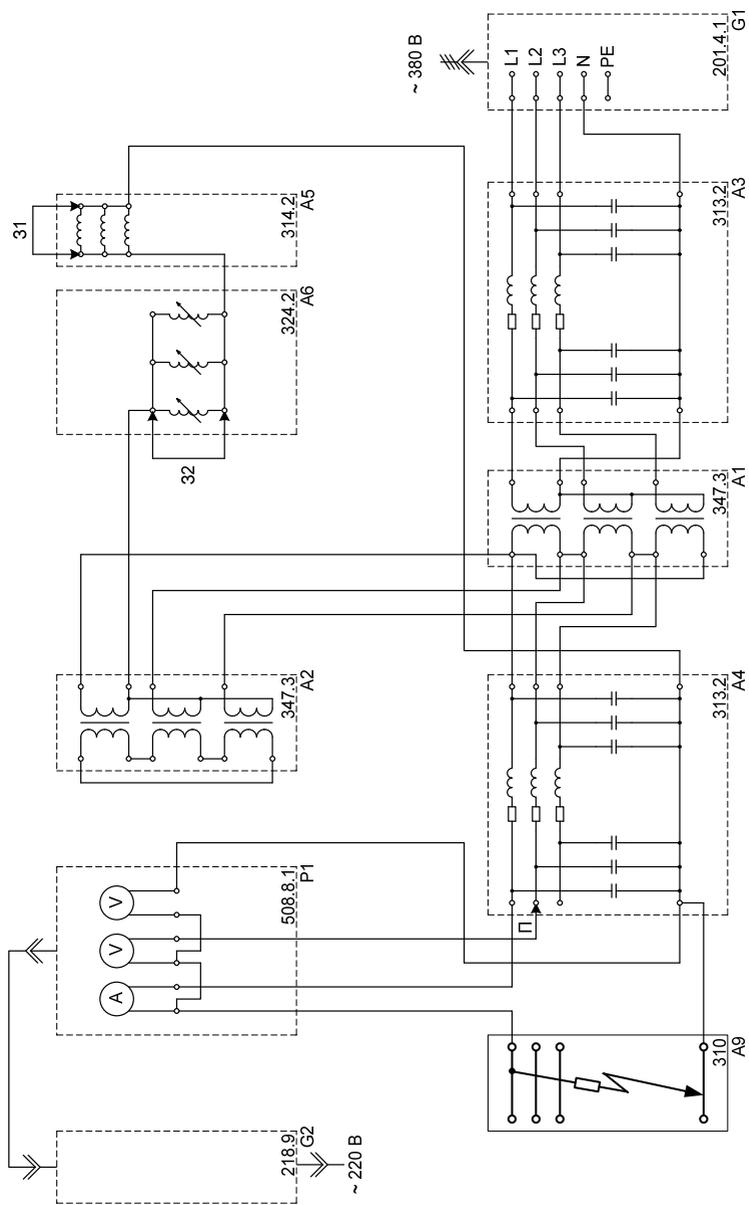


Рис. 4.3. Электрическая схема соединений

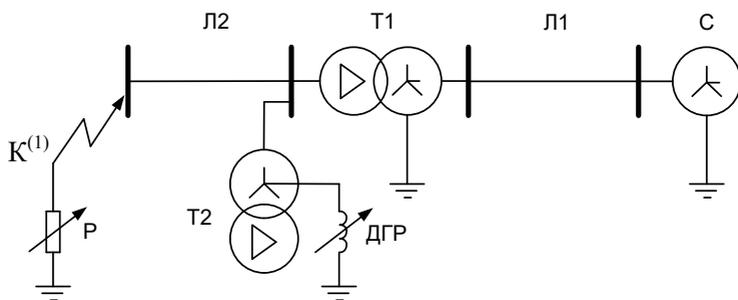


Рис. 4.4. Схема моделируемой электрической сети

Таблица 4.4

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	201.4.1	$\sim 3 \times 220 \text{ В} / 6 \text{ А}$
G2	Однофазный источник питания	218.9	$\sim 220 \text{ В} / 6 \text{ А}$
A1	Трёхфазная трансформаторная группа	347.3	$3 \times 80 \text{ В} \cdot \text{А}$ (звезда) 220, 225, 230 В / 133, 220, 225, 230, 235, 240, 245 В
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	347.4	$3 \times 80 \text{ В} \cdot \text{А}$ (треугольник) 230 В / 133, 220, 225, 230, 235, 240, 245 В
A3, A4	Модель линии электропередачи	313.2	$400 \text{ В} \sim; 3 \times 0,5 \text{ А}$
A5	Линейный реактор	314.2	$3 \times 0,3 \text{ Гн} / 0,5 \text{ А}$
A6	Индуктивная нагрузка	324.2	220/380 В; 50 Гц $3 \times 40 \text{ Вар}$
A9	Модель замыкания на землю	310	$380 \text{ В} \sim; 3 \times 0,5 \text{ А}$
P1	Блок мультиметров	508.2.1	3 мультиметра $\approx 0 \dots 1000 \text{ В} /$ $\approx 0 \dots 10 \text{ А} /$ $0 \dots 20 \text{ МОм}$

Трехфазная трансформаторная группа А2 моделирует заземляющий трансформатор Т2, в нейтраль которого последовательно включены линейный реактор А5 и индуктивная нагрузка А6, моделирующие дугогасящий реактор ДГР.

Модели А3, А4 линий электропередачи имитируют линии электропередачи Л1 и Л2.

Модель замыкания на землю А9 служит для создания устойчивого однофазного короткого замыкания с возможностью варьирования активного сопротивления в месте этого замыкания.

Блок мультиметров Р1 позволяет производить измерение токов и напряжений в электрической цепи.

Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления «⊕» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений, а закоротки 31 и 32 в ней выполните проводниками. При этом индуктивность $L_{\text{ДГР}}$ дугогасящего реактора ДГР в нейтрали трансформатора Т2 будет равна нулю.
4. Установите исходные данные (варианты взять из табл. 4.5)

Таблица 4.5

Исходные значения

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_1 T_1$, В	220	225	230	235	220	225	230	235
$U_2 T_1$, В	235	225	220	230	235	225	220	230
$U_1 T_2$, В	235	230	225	220	235	230	225	220
$R_{\text{Л1}}$, Ом	0	50	0	50	0	50	0	50
$L_{\text{Л1}}$, Гн	1,2	0,9	1,2	0,9	1,2	0,9	1,2	0,9
$C/2_{\text{Л1}}$, мкФ	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
$R_{\text{Л2}}$, Ом	50	0	50	0	50	0	50	0
$L_{\text{Л2}}$, Гн	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
$C/2_{\text{Л2}}$, мкФ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

5. Установите у модели А9 сопротивление замыкания на землю $R_{\text{зам}} = 2$. Включите источник G2.
6. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и активизируйте используемые мультиметры.
7. Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
8. Снимая закоротки 31 и 32, а также применяя различные схемы последовательно-параллельного включения фаз линейного реактора А5 и индуктивной нагрузки А6, увеличивайте индуктивность $L_{\text{ДГР}}$ дугогасящего реактора ДГР до достижения режима компенсированной нейтрали электрической установки (достижения минимума значения тока однофазного короткого замыкания, считываемого с амперметра блока P1).
9. Варьируя у модели А9 сопротивление замыкания на землю $R_{\text{зам}}$ от 2 до ∞ , занесите его и показания амперметра (ток устойчивого однофазного короткого замыкания $I^{(1)}$) и вольтметров (напряжения фаз U_A, U_B, U_C и напряжения нейтрали U_N трансформатора А2) блока мультиметров P1 в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Результаты измерения

$R_{\text{зам}}, \text{ Гн}$	0								∞
$I^{(1)}, \text{ А}$									
$U_A, \text{ В}$									
$U_B, \text{ В}$									
$U_C, \text{ В}$									
$U_N, \text{ В}$									

10. По завершении эксперимента отключите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и источники G1, G2.
11. Используя данные табл. 4.6, постройте искомые зависимости $I^{(1)} = f(R_{\text{зам}})$, $U_A = f(R_{\text{зам}})$, $U_B = f(R_{\text{зам}})$, $U_C = f(R_{\text{зам}})$, $U_N = f(R_{\text{зам}})$ и проанализируйте их.

Третий эксперимент. Снятие зависимостей напряжений фаз, напряжения нейтрали заземляющего трансформатора и тока устойчивого однофазного короткого замыкания от активного сопротивления в сети с резистивным заземлением нейтрали.

Электрическая схема соединений (рис. 4.5) соответствует схеме моделируемой электрической сети (рис. 4.6) [14]. Перечень аппаратуры представлен в табл. 4.7.

Источник G1 моделирует питающую электрическую систему С.

Источник G2 питает функциональные блоки электрической энергией напряжением 220 В/50 Гц и обеспечивает защиту работающих на стенде лиц от поражения электрическим током.

Трехфазная трансформаторная группа А1 моделирует трансформатор Т1.

Трехфазная трансформаторная группа А2 моделирует заземляющий трансформатор Т2, в нейтраль которого последовательно включены реостат А7 и активная нагрузка А8, моделирующие заземляющий резистор ЗР.

Модели А3, А4 линий электропередачи имитируют линии электропередачи Л1 и Л2.

Модель замыкания на землю А9 служит для создания устойчивого однофазного короткого замыкания с возможностью варьирования активного сопротивления в месте этого замыкания.

Блок мультиметров Р1 позволяет производить измерение токов и напряжений в электрической цепи.

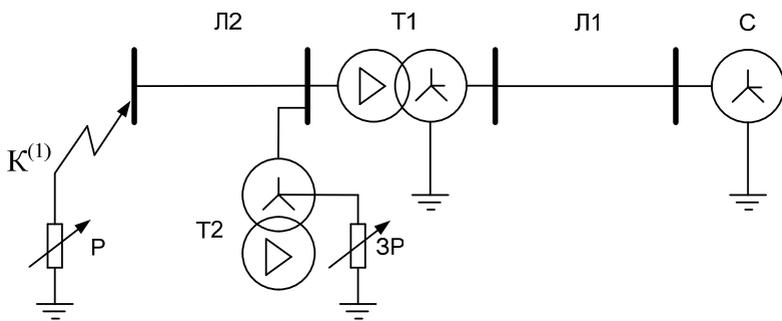


Рис. 4.6. Схема моделируемой электрической сети

Таблица 4.7

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	201.4.1	$\sim 3 \times 220 \text{ В} / 6 \text{ А}$
G2	Однофазный источник питания	218.9	$\sim 220 \text{ В} / 6 \text{ А}$
A1	Трёхфазная трансформаторная группа	347.3	$3 \times 80 \text{ В} \cdot \text{А}$ (звезда) 220, 225, 230 В / 133, 220, 225, 230, 235, 240, 245 В
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	347.4	$3 \times 80 \text{ В} \cdot \text{А}$ (треугольник) 230 В / 133, 220, 225, 230, 235, 240, 245 В
A3, A4	Модель линии электропередачи	313.2	400 В \sim ; $3 \times 0,5 \text{ А}$
A7	Реостат	323.4	$2 \times 0 \dots 100 \text{ Ом} / 1 \text{ А}$
A8	Активная нагрузка	306.5	220/380 В; 50 Гц $3 \times 50 \text{ Вт}$;
A9	Модель замыкания на землю	310	380 В \sim ; $3 \times 0,5 \text{ А}$
P1	Блок мультиметров	508.2.1	3 мультиметра $\approx 0 \dots 1000 \text{ В}$ / $\approx 0 \dots 10 \text{ А}$ / $0 \dots 20 \text{ МОм}$

Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления «⊕» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений, а закоротку З в ней выполните проводником.
4. Установите переключателями исходные значения, взятые согласно варианту из табл. 4.8.

Таблица 4.8

Исходные значения

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_1 T_1$, В	220	225	230	235	220	225	230	235
$U_2 T_1$, В	235	225	220	230	235	225	220	230
$U_1 T_2$, В	235	230	225	220	235	230	225	220
$R_{Л1}$, Ом	0	50	0	50	0	50	0	50
$L_{Л1}$, Гн	1,2	0,9	1,2	0,9	1,2	0,9	1,2	0,9
$C/2_{Л1}$, мкФ	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
$R_{Л2}$, Ом	50	0	50	0	50	0	50	0
$L_{Л2}$, Гн	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
$C/2_{Л2}$, мкФ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$R_{ЗР}$, Ом	1000	1000	1050	1050	1100	1100	1075	1075

5. Установите желаемое сопротивление заземляющего резистора в нейтрали трансформатора А2, например, 1000 Ом. Для этого снимите закоротку З, в одной фазе активной нагрузки А8 установите значение 100 %, а в двух других 0 % (активное сопротивление фазы и всей нагрузки А8 составит при этом 968 Ом) и установите сопротивление реостата равным 32 Ом.
6. Установите у модели А9 сопротивление замыкания на землю $R_{зам} = 2$.
7. Включите источник G2.
8. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и активизируйте используемые мультиметры.

9. Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
10. Варьируя у модели A9 сопротивление замыкания на землю $R_{\text{зам}}$ от 2 до ∞ , заносите его и показания амперметра (ток устойчивого однофазного короткого замыкания $I^{(1)}$) и вольтметров (напряжения фаз U_A , U_B , U_C и напряжения нейтрали U_N трансформатора A2) блока мультиметров P1 в табл. 4.9.

Таблица 4.9

Результаты измерения

$R_{\text{зам}}, \text{ Гн}$	0								∞
$I^{(1)}, \text{ А}$									
$U_A, \text{ В}$									
$U_B, \text{ В}$									
$U_C, \text{ В}$									
$U_N, \text{ В}$									

11. По завершении эксперимента отключите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и источники G1, G2.
12. Используя данные табл. 4.6, постройте искомые зависимости $I^{(1)} = f(R_{\text{зам}})$, $U_A = f(R_{\text{зам}})$, $U_B = f(R_{\text{зам}})$, $U_C = f(R_{\text{зам}})$, $U_N = f(R_{\text{зам}})$ и проанализируйте их.

**Требования к технике безопасности
при выполнении работы**

Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ после инструктажа по технике безопасности с личными подписями в специальном журнале. Ответственность за выполнение правил техники безопасности возлагается как на преподавателей, проводящих занятия в лаборатории, так и на студентов. Лица, не выполняющие правила безопасности или допускающие их нарушение, отстраняются от выполнения лабораторных работ. От студентов, работающих в лаборатории, требуется не нарушать правила безопасности самим и останавливать не выполняющих эти правила. Особые правила безопасности, характерные для конкретных лабораторных работ, указаны в соответствующих описаниях.

Собранную и проверенную схему показывают преподавателю или лаборанту и только после этого получают разрешение включать установку. При включении схемы надо внимательно следить за поведением приборов, если они имеются; при резких ударах стрелок приборов схема должна быть немедленно отключена от источника питания. По окончании работы и согласования с руководителем результатов испытаний схема должна быть разобрана и рабочий стол подготовлен для работы другой бригады. В качестве исполнительного отчета служит предварительный отчет, дополненный результатами испытаний и общими выводами. Далее студенты отчитываются за проделанную работу.

Содержание отчета

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Схемы моделируемой электрической сети по каждому режиму работы.
4. Результаты исследований режимов работы, представленных в виде таблиц и графиков.
5. Выводы о преимуществах и недостатках различных способов заземления нейтрали.

Контрольные вопросы

1. Классификация режимов работы нейтралей.
2. Преимущество и недостатки режимов работы сети с компенсированной нейтралью.
3. Преимущество и недостатки режимов работы сети с эффективно заземленной нейтралью.
4. Преимущество и недостатки режимов работы сети с резистивным заземлением нейтрали.
5. Преимущество и недостатки режимов работы сети с изолированной нейтралью.
6. Преимущество и недостатки режимов работы сети с глухозаземленной нейтралью.

Литература для подготовки к лабораторным работам и самостоятельной работы [1; 8; 12; 13].

Лабораторная работа 5

Заземляющие устройства электрических установок

Цель работы — закрепление теоретических сведений о применяемых заземляющих устройствах в электрических установках.

План проведения занятия и пояснения по его выполнению

Лабораторная работа выполняется в два этапа: дома и непосредственно в лаборатории.

Дома перед выполнением лабораторной работы необходимо провести предварительную подготовку, для чего нужно: ознакомиться с содержанием предстоящей работы — изучить конструкции заземляющих устройств; уяснить цель работы; повторить теоретический материал по рекомендуемой литературе; ответить на контрольные вопросы, продумать план проведения работы; составить предварительный отчет со схемами, таблицами. При отсутствии предварительного отчета студент к работе не допускается.

В лаборатории провести два эксперимента.

Первый эксперимент. Снятие зависимости напряжения прикосновения от расстояния до заземлителя.

Электрическая схема соединений представлена на рис. 5.1 [14]. Перечень аппаратуры представлен в табл. 5.1.

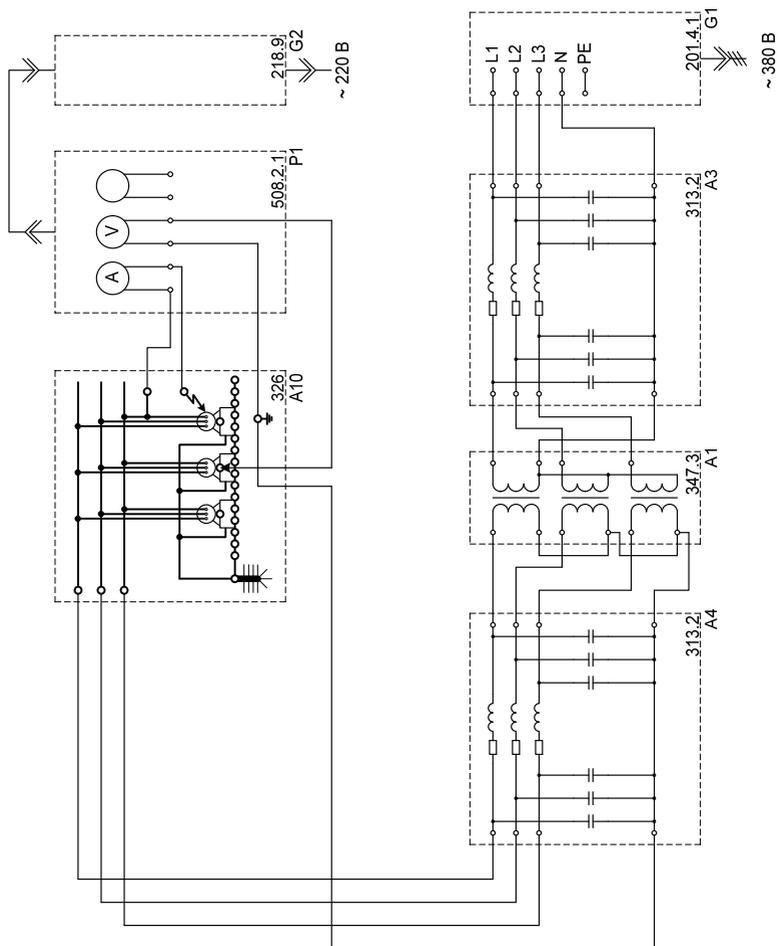


Рис. 5.1. Электрическая схема соединений

Таблица 5.1

Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трехфазный источник питания	201.4.1	$\sim 3 \times 220 \text{ В} / 6 \text{ А}$
G2	Однофазный источник питания	218.9	$\sim 220 \text{ В} / 6 \text{ А}$
A1	Трехфазная трансформаторная группа	347.3	$3 \times 80 \text{ В} \cdot \text{А}$ (звезда) 220, 225, 230 В / 133, 220, 225, 230, 235, 240, 245 В
A3, A4	Модель линии электропередачи	313.2	$400 \text{ В} \sim; 3 \times 0,5 \text{ А}$
A10	Модель заземлителя с вертикальным трубчатым электродом	326	$380 \text{ В} \sim; 3 \times 0,5 \text{ А}$
P1	Блок мультиметров	508.2.1	3 мультиметра $\approx 0 \dots 1000 \text{ В} /$ $\approx 0 \dots 10 \text{ А} /$ $0 \dots 20 \text{ МОм}$

Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления « \oplus » устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений.
4. Установите переключателями исходные значения, взятые согласно варианту из табл. 5.2.
5. Включите источник G2.
6. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и активизируйте используемые мультиметры.
7. Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.

Исходные данные

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_1 T_1, В$	220	225	230	235	220	225	230	235
$U_2 T_1, В$	235	225	220	230	235	225	220	230
$R_{л1}, Ом$	0	50	0	50	0	50	0	50
$L_{л1}, Гн$	1,2	0,9	1,2	0,9	1,2	0,9	1,2	0,9
$C/2_{л1}, мкФ$	0	0	0	0	0	0	0	0
$R_{л2}, Ом$	50	0	50	0	50	0	50	0
$L_{л2}, Гн$	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2
$C/2_{л2}, мкФ$	0	0	0	0	0	0	0	0
$\rho_1, Ом \cdot м$	20	20	40	40	100	100	100	40
$\rho_2, Ом \cdot м$	20	40	40	100	40	100	20	20

8. При заданном сопротивлении грунта ρ модели заземлителя А6 снимите с помощью вольтметра блока Р1 зависимость от расстояния x напряжения прикосновения $U_{np} = f(x)$ (вольтметр включать между гнездом «0» и гнездами, соответствующими расстоянию x). Данные также занесите в табл. 5.3.
9. Ток стекания в землю контролируйте с помощью амперметра блока Р1. Он не должен превышать 0,5 А!
10. По завершении эксперимента отключите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров Р1 и источники G1, G2.
11. Проанализируйте снятую зависимость $U_{np} = f(x)$.

Второй эксперимент. Снятие зависимости шагового напряжения от расстояния до заземлителя.

Электрическая схема соединений представлена на рис. 5.1. Перечень аппаратуры представлен в табл. 5.1.

Указания по проведению эксперимента

1. Убедитесь, что устройства, используемые в эксперименте, отключены от сети электропитания.
2. Соедините гнезда защитного заземления «⊕» устройств, используемых в эксперименте, с гнездом «РЕ» источника G1.
3. Соедините аппаратуру в соответствии со схемой электрических соединений.
4. Установите исходные данные согласно варианту из табл. 5.2.
5. Включите источник G2.
6. Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и активируйте используемые мультиметры.
7. Включите источник G1. О наличии напряжений на его выходе должны сигнализировать светящиеся лампочки.
8. При заданном сопротивлении грунта ρ модели заземлителя А6 снимите с помощью вольтметра блока P1 зависимость от расстояния x шагового напряжения $U_{\text{ш}} = f(x)$ (вольтметр включать между соседними гнездами, соответствующими расстоянию x). Данные также занесите в табл. 5.3.
9. Ток стекания в землю контролируйте с помощью амперметра блока P1. Он не должен превышать 0,5 А!
10. По завершении эксперимента отключите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1 и источники G1, G2.
11. Проанализируйте снятую зависимость $U_{\text{ш}} = f(x)$.

Таблица 5.3

Зависимость напряжения прикосновения от расстояния x
и шагового напряжения от расстояния x

$x_{\text{пр}}, \text{ м}$	$\rho_{\text{пр}}, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$	$U_{\text{пр}}, \text{ В}$	$x_{\text{шаг}}, \text{ м}$	$\rho_{\text{шаг}}, \text{ Ом} \cdot \text{ м}$	$U_{\text{шаг}}, \text{ В}$
0			0–0,8		
0,8			0,8–1,6		
1,6			1,6–2,4		
2,4			2,4–3,2		
3,2			3,2–4,0		
4,0			4,0–4,8		
4,8			4,8–5,6		
5,6			5,6–6,4		
6,4			6,4–7,2		
7,2			7,2–8,0		
8,0			8,0–8,8		
8,8			8,8–9,6		
9,6			9,6–10,4		
10,4			10,4–11,2		
11,2			11,2–12,0		
12,0					

Требования к технике безопасности при выполнении работы

Студенты допускаются к выполнению лабораторных работ после инструктажа по технике безопасности с личными подписями в специальном журнале. Ответственность за выполнение правил техники безопасности возлагается как на преподавателей, проводящих занятия в лаборатории, так и на студентов. Лица, не выполняющие правила безопасности или допускающие их нарушение, отстраняются от выполнения лабораторных работ. От студентов, работающих в лаборатории, требуется не нарушать правила безопасности самим и останавливать не выполняющих эти правила.

Особые правила безопасности, характерные для конкретных лабораторных работ, указаны в соответствующих описаниях.

Собранную и проверенную схему показывают преподавателю или лаборанту и только после этого получают разрешение включать установку. При включении схемы надо внимательно следить за поведением приборов, если они имеются; при резких ударах стрелок приборов схема должна быть немедленно отключена от источника питания. По окончании работы и согласования с руководителем результатов испытаний схема должна быть разобрана и рабочий стол подготовлен для работы другой бригады. В качестве исполнительного отчета служит предварительный отчет, дополненный результатами испытаний и общими выводами. Далее студенты отчитываются за проделанную работу.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Электрические схемы соединений по каждому эксперименту.
3. Результаты исследований режимов работы, представленных в виде таблиц и графиков.
4. Выводы по снятым зависимостям.

Контрольные вопросы

1. Назначение заземляющих устройств.
2. Опасность прикосновения к заземленным предметам. Нормирование допускаемых напряжений.
3. Конструкции заземляющих устройств.
4. Влияние сопротивления грунта при расчетах заземляющих устройств.
5. Нормирование заземляющих устройств.

Литература для подготовки к лабораторным работам и самостоятельной работы [1; 8; 12; 13].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Задания данного лабораторного практикума, предназначенные для самостоятельного выполнения на лабораторных занятиях под руководством преподавателя, дают возможность разобраться в принципах работы оборудования электрической части понижительных подстанций, уяснить и уточнить отдельные методики, а также сформировать необходимые умения по тематике учебного курса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ополева, Г.Н. Схемы и подстанции электроснабжения : справочник : учеб. пособие. – Москва : Форум : ИНФРА-М, 2006. – 480 с.
2. Кокин, С.Е. Схемы электрических соединений подстанций : учеб. пособие / С.Е. Кокин, С.А. Дмитриев, А.И. Хальясмаа. – Екатеринбург : Уральский федеральный университет : ЭБС АСВ, 2015. – 100 с.
3. Немировский, А.Е. Электрооборудование электрических сетей, станций и подстанций : учеб. пособие / А.Е. Немировский, И.Ю. Сергиевская, Л.Ю. Крепышева. – 2-е изд. доп. – Москва : Инфра-Инженерия, 2018. – 148 с.
4. Рожкова, Л.Д. Электрооборудование электрических станций и подстанций : учебник для сред. проф. образования / Л.Д. Рожкова, Л.К. Карнеева, Т.В. Чиркова. – 2-е изд., стер. – Москва : Академия, 2005. – 448 с.
5. Старшинов, В.А. Электрическая часть электростанций и подстанций : учеб. пособие / В.А. Старшинов, М.В. Пираторов, М.А. Козина. – Москва : МЭИ, 2015. – 296 с.
6. Рекомендации по технологическому проектированию подстанций переменного тока с высшим напряжением 35–750 кВ. – Москва : ЭНАС, 2017. – 79 с. // ЭБС IPR BOOKS : [сайт]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/76194.html> (дата обращения: 09.03.2021).
7. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : практическое пособие. – Москва : ИНФРА-М, 2017. – 262 с.
8. Правила устройства электроустановок. Раздел 4. Распределительные устройства и подстанции. Главы 4.1, 4.2. – 7-е изд. – Москва : НЦ ЭНАС, 2003. – 104 с.
9. СТО 56947007-29.240.30.010-2008 Схемы принципиальные электрические распределительных устройств подстанций 35–750 кВ. Типовые решения : дата введения : 2007-12-20 // URL: <http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/56947007-29.240.30.010-2008.pdf> (дата обращения: 8.09.2018).

10. СТО 56947007-29.240.10.248-2017. Нормы технологического проектирования подстанций переменного тока с высшим напряжением 35-750 кВ (НТП ПС) : дата введения : 2017-08-25 // URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/СТО_56947007-29.240.10.248-2017.pdf (дата обращения: 8.09.2018).
11. Ополева, Г.Н. Электроснабжение промышленных предприятий и городов : учеб. пособие / Г.Н. Ополева. — Москва : Форум : ИНФРА-М, 2017. — 416 с.
12. Библия электрика: ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. — 3-е изд. — Москва : Эксмо, 2016. — 750. — (Актуальное законодательство).
13. Электрическая часть станций и подстанций : учебник для вузов / А.А. Васильев, И.П. Крючков, Е.Ф. Наяшкова [и др.] ; под ред. А.А. Васильева. — Москва : Энергия, 1980. — 576 с.
14. Сенигов, П.Н. Режимы нейтрали и заземляющие устройства в электрических установках. Руководство по выполнению базовых экспериментов. РНЗУЭУ.001.1 РБЭ (999.0.1) / П.Н. Сенигов. — Челябинск : Учебная техника, 2015. — 57 с.