

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«МУРМАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Строительства,  
энергетики и транспорта

**Методические рекомендации к лабораторным работам**  
по дисциплине  
**«Техника высоких напряжений»**  
для всех форм обучения направления  
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
(профиль Электроснабжение)

**Мурманск**  
**2021**

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основная часть работы в лаборатории по курсу изоляции и защиты от перенапряжений заключается в более глубоком усвоении теоретической части курса, изучение применяемой высоковольтной аппаратуры и методов ее испытания и, наконец, в получении практических навыков по производству высоковольтных измерений и испытаний.

Отсюда вытекают два решающих требования к прохождению лабораторной работы: основательная предварительная теоретическая подготовка студента и тщательное проведение самой работы.

Подготовка к работе имеет большое значение, так как время, отводимое на проведение лабораторной работы, ограничено (не более 2 часов) и предназначено исключительно на сборку схемы, производство измерений и вычислений. Поэтому в лаборатории уже нет времени для изучения теории. Недостаточная подготовка к работе всегда приводит к механическому выполнению ее, т.е. к тому, что студент только автоматически производит указанные соединения и монтаж, механически отсчитывает показания приборов и не видит в получаемых числах физического смысла.

Непосредственную подготовку в каждой работе следует начинать с проработки ее по данному руководству. Однако ввиду того, что в нашем руководстве главное внимание уделено вопросам методики, следует в дополнение к лекционному материалу проработать теорию вопроса по источнику, указанному в конце каждой работы.

Порядок проведения работы определяется содержанием ее и указывается для каждой работы в отдельности. Однако во всех работах необходимо придерживаться следующего общего порядка:

- а) ознакомиться с аппаратами и приборами, которые будут использованы в работе, а также проверить их исправность;
- б) расположить аппараты и приборы так, чтобы избежать посторонних влияний, могущих исказить результаты измерения;
- в) надежно осуществить все предусмотренные схемой соединения проводами достаточного диаметра во избежание коронирования и обрыва во время работы;
- г) проверить с руководителем правильность сделанных соединений во избежание порчи аппаратуры и приборов;
- д) получаемые в процессе работы показания приборов сейчас же наносить в виде точек на график с тем, чтобы по ходу кривых контролировать правильность производимых отсчетов и, в случае необходимости, повторить измерения.

## **ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ**

Перед выполнением очередной лабораторной работы во внеучебное время необходимо провести предварительную подготовку,

для чего нужно ознакомиться с содержанием предстоящей работы, выяснить ее цель; повторить теоретический материал по рекомендуемой литературе, ответить на вопросы, указанные в конце каждой лабораторной работы; продумать план проведения работы; составить предварительный отчет со схемами, таблицами, векторными диаграммами и прочее.

При выполнении работы, монтаже схем рекомендуется:

Последовательные цепи соединить одинаковыми проводами (большого сечения и одного цвета).

1. Параллельные соединения выполнять проводом меньшего сечения и другого цвета.

2. Главную, последовательную цепь выполнить сначала, а затем произвести параллельные включения.

3. Сборку схемы вести от одного зажима источника питания и заканчивать на другом ее зажиме.

4. Проверку схемы сделать вначале по главному контуру цепи, а затем по параллельным соединениям.

5. Проверить правильность установки движков реостатов и положения стрелок измерительных приборов на нулевой точке шкалы.

Собранную и проверенную схему предъявить руководителю лабораторных работ и только после его разрешения включать установку. При включении схемы под напряжение надо внимательно следить за показаниями приборов, при резких ударах стрелок приборов схема должна быть немедленно отключена от источника питания.

По окончании работы и визировании у руководителя протокола испытаний схема должна быть разобрана и рабочий стол подготовлен для работы другой бригады.

Отчет по работе составляется каждым студентом в соответствии с требованиями руководства во внеурочное время и предъявляется руководителю перед началом следующего лабораторного занятия и выполняет ее в дни, назначенные кафедрой.

Оформление отчета является немаловажным этапом в проведении лабораторной работы, ибо отчет по работе показывает умение правильно и рационально записывать наблюдаемые явления и делать из них выводы.

Для лабораторных работ рекомендуется иметь отдельную тетрадь, в которой компенсируется материал, изучаемый в процессе подготовки к каждой работе, и ведутся отчеты в виде протоколов по всем видам работ.

Без представления и проверки руководителем конспекта данной работы и отчета по предыдущей работе студента к выполнению работы допускать не рекомендуется.

В каждом отчете должны быть отмечены следующие моменты:

- а) порядковый номер и назначение;
- б) цель работы;
- в) схемы включения или эскизы;
- г) таблицы записей показаний;
- д) графики;
- е) выводы или анализ полученных результатов.

При построении графиков необходимо уделить внимание выбору масштаба. Масштаб должен быть общепринятым и удобным для пользования. Для того, чтобы студенты научились этот выбор делать самостоятельно, в описании каждой работы графики не имеют масштабов. Масштаб надо указать на каждом графике и притом не просто в виде цифры или масштабной линейки, а в виде шкал по осям координат.

Обязательным и общим для всех работ заданием на предварительную подготовку является изучение основных закономерностей рассматриваемого в работе физического явления. При этом для самопроверки необходимо ответить на приведенные в конце работы контрольные вопросы.

Перед проведением работы производится обсуждение контрольных вопросов в лаборатории либо программированный контроль знаний в компьютерном классе.

# ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

## ГРАДУИРОВКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ШАРОВЫМ РАЗРЯДНИКОМ

### 1.1. Назначение работы

Назначением работы являются приобретение навыков в работе с испытательным трансформатором и шаровым разрядником, а также построение зависимости вторичного напряжения испытательного трансформатора от подводимого к нему первичного напряжения.

### 1.2. Краткая характеристика оборудования

Испытательный трансформатор является основным элементом оборудования всякой высоковольтной лаборатории – научно-исследовательской, учебной или испытательной станции.

Особенностью высоковольтных испытаний трансформаторов, по сравнению с силовыми трансформаторами, является то, что они предназначаются для широкой регулировки напряжения. Для испытательного трансформатора зависимость вторичного напряжения от первичного может представляться некоторой кривой  $B$  в отличие от прямой  $A$  при постоянном отношении напряжений (рис. 1.1). Поэтому необходимо опытным путем найти зависимость  $U_2$  от  $U_1$  и представить ее в виде графика (градуировочная кривая трансформатора). Тогда при всевозможных испытаниях, проводимых с данным трансформатором, напряжение  $U_2$  легко определяется из графика по вольтметру, измеряющему напряжение  $U_1$ , например, записанное в момент разряда на испытуемом объекте.

Для непосредственного измерения напряжения вторичной обмотки высоковольтного трансформатора ИОМ 100/100 удобнее всего воспользоваться шаровым разрядником ИШР-125.

### 1.3. Задание

1. Произвести градуировку испытательного трансформатора с помощью шарового разрядника, т.е. получить зависимость  $U_2 = f(U_1)$ .
2. Определить коэффициент трансформации испытательного трансформатора.
3. Произвести градуировку измерительного киловольтметра.

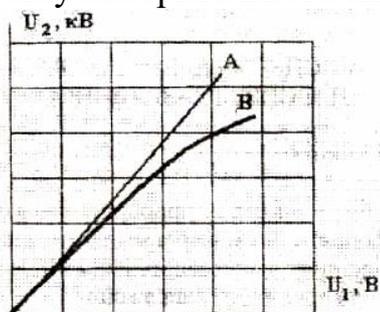


Рисунок 1.1 – Кривые зависимости вторичного напряжения испытательного трансформатора от первичного напряжения

#### 1.4. Краткие методические указания

На рис. 1.2 представлена схема соединений приборов и испытательного трансформатора.

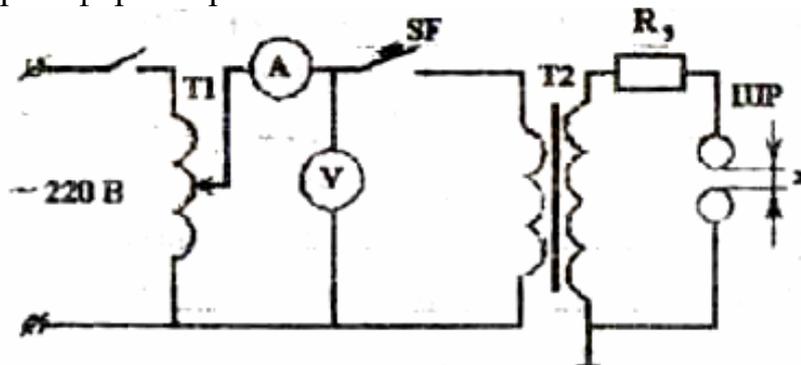


Рис. 1.2. Схема соединения приборов и испытательного трансформатора

Градуировка трансформатора шаровым разрядником ШР может быть осуществлена двумя методами. По первому методу устанавливается некоторое напряжение  $U_1$  на первичной обмотке, соответствующее целому числу делений шкалы вольтметра, и затем шары, предварительно разведенные на заведомо большее расстояние, сближаются до получения между ними разряда. После этого измеряется длина разрядного промежутка  $x$  и по таблицам или градуировочной кривой шарового разрядника определяется напряжение  $U_2$ , соответствующее данному напряжению  $U_1$  первичной обмотки. При использовании этого метода шаровой разрядник должен иметь приспособление для изменения длины разрядного промежутка  $x$  под напряжением, а также шкалу для отсчета величины  $x$ .

По второму методу между шарами устанавливается расстояние  $x$ , соответствующее некоторому выбранному напряжению  $U_2$ . Затем включается испытательный трансформатор и напряжение плавно увеличивается до тех пор, пока не произойдет разряд в промежутке  $x$ . В этот момент отмечается по вольтметру напряжение  $U_1$ . Преимущество этого метода состоит в том, что для градуировки можно применять разрядник, не имеющий дистанционного управления.

Перед измерением рекомендуется протереть замшей или тонкой наждачной бумагой шары. Измерения производить при расстояниях между шарами ( $x = 1,0; 2,0; 3,0; 4,0; 5,0$ ) см.

Для градуировки измерительного киловольтметра необходимо, определив по кривой 1  $U_{пр}$  при  $x = 2$  см (с учетом поправки на  $\delta$ ) и поставив на киловольтметре соответствующую шкалу, установить расстояние между колонками киловольтметра таким образом, чтобы в момент пробоя киловольтметр показывал соответствующее кривой 1 пробивное напряжение.

#### 1.5. Содержание работы

1. Ознакомиться со схемой и устройством испытательного трансформатора.

2. Произвести осмотр шарового разрядника и проверить соответствие шкалы и расстояния между шарами разрядника.

3. По барометру и термометру измерить давление и температуру окружающего воздуха.

4. Поочередно устанавливая намеренные промежутки, включать и регулировать напряжение до получения пробоя в шаровом разряднике.

В этот момент отмечать напряжение  $U_2$ , кВ. Для того, чтобы избежать случайных ошибок, пробой повторить три раза для каждого значения.

Результаты занести в табл. 1.

№ п/п	X, см	$U_1, В$				$U_2, кВ$ мах	$U_2', кВ$ мах	Примечание
		1	2	3	Сред.			
								Р
								Т

В табл. 1  $U_2$  – разрядные напряжения, полученные из приложения или соответствующего графика, т. е. напряжения при нормальных атмосферных условиях ( $p = 760$  мм рт. ст. и  $T = 20$  °С, кВ).

Затем необходимо внести поправку на температуру и давление воздуха во время работы, для чего подсчитывается значение

$$U_2 = \delta U_2,$$

где  $\delta = 0,386p/(273+T)$ ,  $\delta$  – относительная плотность воздуха;  $p$  – давление воздуха, мм рт. ст.;  $T$  – температура, °С.

5. По данным полученной таблицы 1 построить градуировочную кривую испытательного трансформатора.

6. По полученным данным (три измерения) определить среднее значение коэффициента трансформации.

### 1.6. Содержание отчета

Отчет должен содержать:

1. Работу, проделанную студентами по пунктам 1–5.

2. Схему установки.

3. Таблицы для записи результатов испытаний.

4. Выводы.

### 1.7. Контрольные вопросы

1. С какой целью в схеме установки последовательно с искровым промежутком включено водяное сопротивление?

2. На каком принципе действия работает установленный в схеме киловольтметр?

3. В чем состоит отличие испытательного высоковольтного трансформатора от силового?

4. Чем вызван разброс показаний вольтметра на первичной стороне высоковольтного трансформатора?

5. Как влияет на величину пробивного напряжения установка барьера в однородном поле?

6. Как изменяются показания электростатического киловольтметра при неизменном напряжении и увеличении расстояния между электродами киловольтметра?

7. Как влияет на величину разрядного напряжения в однородном поле наличие в промежутке паров воды?

8. Каким образом можно уменьшить разброс пробивного напряжения воздушного промежутка?

9. Каким образом можно повысить электрическую прочность воздушного промежутка при разряде в однородном поле?

10. Почему в схеме установки применена несимметричная схема измерения?

## **ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 РАЗРЯДЫ В ГАЗАХ**

### **2.1. Назначение работы**

Назначением работы являются ознакомление с особенностями разряда в воздухе при различных формах электродов, получение опытных данных об электрической прочности воздушных промежутков и сравнение результатов опытов с расчетами по эмпирическим формулам, а также ознакомление с влиянием барьеров на разряды в воздухе.

### **2.2. Краткая характеристика**

Электрическая прочность воздушного промежутка зависит от расстояния между электродами, причем эта зависимость имеет различный характер при разных формах и размерах электродов (различной кривизны поверхности электродов). Кроме этого, на величину разрядного напряжения воздушного промежутка оказывает влияние введение барьеров (экранов), установленных на различном расстоянии от электродов.

Пробивное напряжение в резконеоднородном поле (например, стержень-стержень или стержень-плоскость) сильно зависит от полярности электрода с малым радиусом кривизны.

Электроны, как более подвижные, устремляются в направлении электрода положительной полярности, а положительные ионы, вследствие своей малой подвижности, практически остаются в местах своего образования и создают положительный объемный заряд. Электроны по пути к аноду могут приставать к нейтральным атомам и образовывать отрицательные ионы, движущиеся также замедленно, то есть отрицательный объемный заряд. Наличие объемных зарядов в резконеоднородном поле и обуславливает эффект полярности.

Одним из способов повышения электрической прочности изоляционных промежутков является применение диэлектрических барьеров. Барьеры устанавливаются только в коронирующих промежутках перпендикулярно центральной силовой линии промежутка.

Влияние барьера обусловлено осаждением на его поверхности зарядов того же знака, что и коронирующий электрод. В результате этого напряженность электрического поля между коронирующим электродом и барьером снижается, что увеличивает прочность этого промежутка, но возрастает между барьером и другим электродом. Однако при этом поле в последнем промежутке становится более однородным, что и обеспечивает увеличение электрической плотности всего промежутка.

Электрическая прочность с промежутком зависит от положения барьера (рис. 2.1). Наибольшей прочности соответствует положение барьера от коронирующего электрода на расстояние  $1/5-1/6$  длины промежутка. Электрическая плотность промежутка при этом возрастает в  $1,2-1,3$  раза при отрицательной полярности коронирующего электрода. Если могут коронировать оба электрода разрядного промежутка, то барьеры устанавливаются вблизи обоих электродов.

Упрочняющий эффект барьеров имеет место при постоянном, импульсном и переменном напряжении. Однако при импульсных напряжениях барьерный эффект выражен слабее, так как барьер не успевает за короткое время зарядиться.

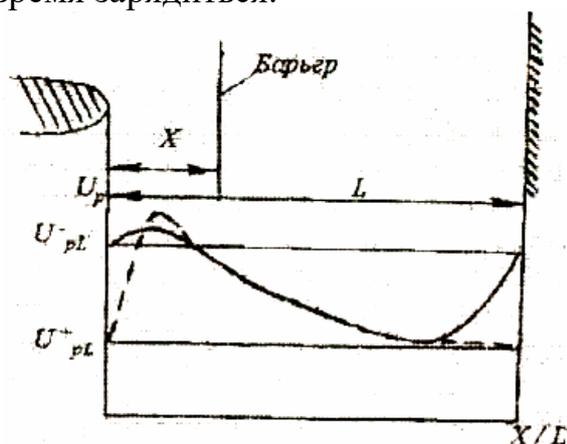


Рис. 2.1. Влияние положения барьера на пробивное напряжение промежутка стержень-плоскость при положительной (пунктир) и отрицательной (сплошные линии) полярности стержня. Постоянные напряжения  $U_{pL}^+$  и  $U_{pL}^-$  — разрядные напряжения промежутка без барьера соответственно при положительной и отрицательной полярности

### 2.3. Задание

1. Опытным путем получить зависимость пробивных напряжений от длины разрядного промежутка для следующих типов электродов:

- а) стержень-плоскость,
- б) стержень-стержень.

2. Опытным путем установить зависимость пробивных напряжений от длины разрядного промежутка для вышеуказанных типов электродов при внесении в промежуток барьеров (экранов) на различном расстоянии от электродов.

### 2.4. Краткие методические указания

Принципиальная электрическая схема установки показана на рис. 2.2. Пробивное напряжение  $U_2$  определяется, исходя из показаний вольтметра  $U_1$ , умноженных на коэффициент трансформации  $K$  определяемый по данным работы № 1. При проведении опытов последовательно с исследуемым разрядным промежутком включается защитное сопротивление порядка  $1 \text{ МОм}$ , чтобы ограничить ток при разряде и не допускать обгорания электродов. При всех измерениях напряжение обязательно следует поднимать с нуля до пробивного

значения со скоростью около 1 кВ/с, так как при большой скорости показания вольтметра  $U1$  будут занижены вследствие отставания стрелки вольтметра от действительных значений напряжений.

Все полученные результаты должны быть пересчитаны на нормальную плотность воздуха  $\delta = 1$ . Для этого необходимо перед проведением опытов записать температуру и давление воздуха в лаборатории.

При проведении опытов во всех случаях для каждого значения  $x$  длины разрядного промежутка значение  $U1$  берется как среднее из 3 отсчетов.

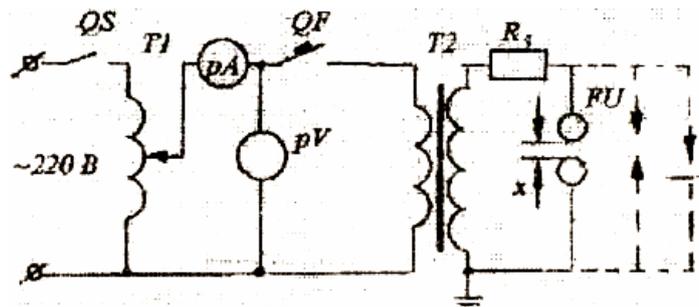


Рис. 2.2. Схема соединений для определения электрической прочности воздушных промежутков при разных формах электродов

Перед работой поверхность электродов следует очистить от пыли. Длину разрядного промежутка устанавливать либо по калибрам, либо по шкале станочка, удерживающего электроды. Перед началом опыта с каждым типом электродов следует проверить правильность установки нуля шкалы.

### 2.5. Содержание работы

1. Снять зависимость пробивного напряжения от длины разрядного промежутка  $U_p = f(x)$  для электродов стержень-плоскость (плоскость заземлена при значениях  $x = 11, 13, 15$  см. После каждой серии опытов с чисто воздушным промежутком (по 2 опыта на каждой точке) производить по 2 опыта с внесением в промежуток барьера (экрана), располагая его непосредственно у каждого из электродов и в середине промежутка.

2. Снять зависимость пробивного напряжения от длины разрядного промежутка  $U_p = f(x)$  для электродов стержень – стержень при значениях  $x = 11, 13, 15$  см после каждой серии опытов с чисто воздушным промежутком (по 2 опыта на каждой точке) производить по два опыта с внесением в промежуток барьера (экрана), располагая его непосредственно у каждого из электродов и в середине промежутка.

Результаты опытов занести в таблицу 2.

№ п/п	Вид электродов	Расстояние между электродами и $x$ , см	$U_{пр.}$ , В	$U_p$ , кВ	Пробивное напряжение с барьером, кВ			Примечание
					у заземленного электрода	в середине промежутка	у электрода под потенциалом	

*Учебно-методические материалы по дисциплине  
Рекомендуемая литература*

1. Быстрицкий Г.Ф. Основы энергетики. – М.: КноРус, 2013.-278 с. ил.
2. Герасименко А.А. Передача и распределение электрической энергии. – М.:КноРус, 2015.-724 с. ил.
3. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013.-672 с. ил.
4. Кудрин Б.И. Электроснабжение. – М.: Академия, 2013.-672 с. ил.
5. Шаров Ю.В. Электроэнергетика. – М.: Инфра-М, 2015.-384 с. ил.
6. Кудинов А.А. Тепловые электрические станции. Схемы и оборудование: Учебное пособие. – М.:Инфра-М, 2015. – 376 с. ил.
7. Грунтович Н.В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. – М.:Инфра-М, 2013. – 271 с. ил.
8. Анчарова Т.В. Электроснабжение и электрооборудование зданий и сооружений: Учебник. – М.:Инфра-М, 2015. – 416 с. ил.
9. Сибикин Ю.Д. Технология энергоснабжения: Учебник – 3-е изд., перераб. и доп. – М.:Форум, 2015. – 352 с. ил.
10. Сибикин Ю.Д. Электрические подстанции. – М.:РадиоСофт, 2014. – 141 с. ил.
11. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии/ под ред. В.В. Денисова. – М.:Феникс, 2015. – 382 с. ил.
12. Шабад В.К. Электромеханические переходные процессы в электроэнергетических системах. – М.:Академия, 2013. – 193 с. ил.
13. Сибикин Ю.Д., Сибикин М.Ю. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. – М.:КноРус, 2015. – 240 с. ил.
14. Важов В.Ф. Техника высоких напряжений: Учебник. – М.:Инфра-М, 2015. – 264 с. ил.
15. Ушаков В.Я. Электроэнергетические системы и сети. – М.:Юрайт, 2015. – 446 с. ил.
16. Климова Г.Н. Электроэнергетические системы и сети. Энергосбережение. 2-е изд. – М.:Юрайт, 2015. – 179 с. ил.
17. Бачаров Ю.Н. Техника высоких напряжений. –М.:Юрайт, 2015. – 264 с. ил.
18. Хрущев Ю.В. Электроэнергетические системы и сети. Электрические переходные процессы. – М.:Юрайт, 2015. – 153 с. ил.
19. Исмагилов Ф.Р. Основные вопросы проектирования воздушных линий электропередач: Учебное пособие. – М.:Машиностроение, 2015. – 211 с. ил.
20. Фролов Ю.М., Шелякин В.П. Основы электроснабжения. – СПб.:Лань, 2013. – 432 с. ил.