

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

Кафедра локомотивов

В. А. ЗАГОРЦЕВ, В. Н. ПОДОЛЬСКАЯ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

Пособие

Гомель 2020

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра локомотивов

В. А. ЗАГОРЦЕВ, В. Н. ПОДОЛЬСКАЯ

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области транспорта и транспортной деятельности для обучающихся
по направлению 1-37 02 01-02 «Тяговый состав железнодорожного
транспорта (электрический транспорт и метрополитен)»
специальности 1-37 02 01 «Тяговый состав железнодорожного
транспорта (по направлениям)»
и учебно-методическим объединением по образованию
в области энергетики и энергетического оборудования для студентов
специальности 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»
в качестве пособия*

Гомель 2020

УДК 621.315.6(075.8)

ББК 31.2

3-14

Рецензенты: заведующий кафедрой электротехники канд. техн. наук, доцент *В. Н. Галушко* (БелГУТ); главный специалист *В. А. Ивлев* (Институт «Белжелдор-проект»)

Загорцев, В. А.

3-14 Электротехнические материалы и техника высоких напряжений : пособие / В. А. Загорцев, В. Н. Подольская ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2020. – 47 с.

ISBN 978-985-554-936-0

Представлены методики выполнения лабораторных работ, разработанные в соответствии с учебными программами по дисциплинам «Электроснабжение электрического подвижного состава» и «Электротехнические материалы». Изложены теоретическая и практическая часть, основные сведения о порядке проведения лабораторных работ, техника безопасности при работе в высоковольтной лаборатории, а также необходимые сведения по содержанию отчета и контрольные вопросы для закрепления полученных студентами знаний.

Предназначено для студентов направления специальности «Тяговый состав железнодорожного транспорта (электрический транспорт и метрополитен)» и специальности «Электроснабжение (по отраслям)».

УДК 621.315.6(075.8)

ББК 31.2

ISBN 978-985-554-936-0

© Загорцев В. А., Подольская В. Н., 2020
© Оформление. БелГУТ, 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

Термины и определения	4
Введение	5
Техника безопасности при работе в высоковольтной лаборатории	6
Общие требования	6
Специальные требования	6
1 Техника измерения напряжений в высоковольтных лабораториях	8
1.1 Краткие сведения из теории	8
1.2 Описание установки	11
1.3 Порядок выполнения работы	12
2 Определение электрической прочности воздуха	14
2.1 Краткие сведения из теории	14
2.2 Описание установки	18
2.3 Порядок выполнения работы	18
3 Определение электрической прочности	20
3.1 Краткие сведения из теории	20
3.2 Описание установки	22
3.3 Порядок выполнения работы	22
4 Определение диэлектрических потерь и диэлектрической проницаемости электроизоляционных материалов	24
4.1 Краткие сведения из теории	24
4.2 Порядок выполнения работы	28
5 Исследование свойств магнитных магнитомягких материалов	30
5.1 Краткие сведения из теории	30
5.2 Описание установки	33
5.3 Порядок выполнения работы	35
6 Исследование распределения напряжения вдоль емкостных цепочек (гирлянды изоляторов)	37
6.1 Краткие сведения из теории	37
6.2 Описание установки	42
6.3 Порядок выполнения работы	42
Список литературы	45
Приложение А Разрядные напряжения шаровых разрядников	46

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Испытательное напряжение – напряжение заданной формы и длительности, которое прикладывают к изоляции для определения какой-либо ее характеристики.

Нормированное испытательное напряжение – испытательное напряжение, нормированное по значению.

Разрядное напряжение – испытательное напряжение, которое вызывает полный разряд.

Выдерживаемое (фактическое) напряжение – наибольшее значение испытательного напряжения, которое изоляция выдерживает с заданной вероятностью.

Импульс напряжения (импульс) – кратковременное напряжение, характеризующееся быстрым подъемом значения напряжения до максимального и последующим более медленным снижением значения напряжения.

Апериодический импульс напряжения (апериодический импульс) – импульс, форма которого может быть описана суммой двух экспоненциальных функций.

Колебательный импульс напряжения (колебательный импульс) – импульс, представляющий собой затухающие колебания значения напряжения около нулевого значения или около другой составляющей.

Испытательное переменное напряжение – синусоидальное напряжение частотой от 45 до 65 Гц, а также, в определенных случаях, синусоидальное напряжение повышенной частоты (до 400 Гц).

Полный разряд – электрический разряд, полностью шунтирующий изоляцию между электродами и вызывающий снижение значения напряжения между электродами практически до нуля.

Искровой разряд – полный разряд в газовом или жидком диэлектрике.

Перекрытие – полный разряд в газовом или жидком диэлектрике вдоль поверхности твердого диэлектрика.

Пробой – полный разряд в твердом диэлектрике.

Внутренняя изоляция – твердая, жидкая, газообразная изоляция (или их комбинация) внутренних частей электрооборудования, не подвергающаяся непосредственному влиянию атмосферных и других внешних факторов (загрязнение, увлажнение, воздействие животных).

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплины, изучающие электротехнические материалы и технику высоких напряжений, предназначены для получения знаний и навыков в области устройства и конструкции высоковольтного оборудования, испытательной и измерительной техники, изучения основных процессов, возникающих в электротехнических материалах под воздействием магнитного и электрического полей, а также дают понимание основных электрофизических явлений, возникающих в диэлектриках, классификацию материалов, применяемых в энергетике, методов защиты электрического оборудования от возникающих перенапряжений и методов их измерения.

Данное пособие по выполнению лабораторных работ направлено на закрепление и углубление полученных знаний, а также знакомит обучающихся с техникой измерения напряжений в высоковольтных лабораториях, методами определения электрической прочности воздуха, испытаниями твердых и жидких диэлектриков на электрическую прочность, выравниванием распределения напряжения по гирлянде и др.

Лабораторные работы составлены на основе учебных программ по дисциплинам «Электроснабжение электрического подвижного состава» для студентов специальности 1-37 02 01 «Тяговый состав железнодорожного транспорта (по направлениям)» и «Электротехнические материалы» специализации 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)» разработанных в соответствии с требованиями Образовательных стандартов высшего образования ОСВО 1-37 02 01-2013 и ОСВО 1-43 01 03-2013.

Основой для написания данного пособия послужило методическое указание по лабораторным работам «Электротехнические материалы и ТВН» авторов Переры Г. И. и Курилина С. Л. (1996 г.).

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ЛАБОРАТОРИИ

Общие требования

К работе в высоковольтной лаборатории допускаются только сотрудники и преподаватели кафедры, прошедшие специальный инструктаж по технике безопасности и имеющие группу по работе в электроустановках, а также знающие устройство и принцип работы оборудования высоковольтной лаборатории.

К работе над выполнением лабораторных занятий допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности. Инструктаж в студенческих группах проводит преподаватель, ведущий занятия, с соответствующей регистрацией в журнале по технике безопасности.

Лабораторные работы проводятся группами не более 5–6 человек под непосредственным наблюдением преподавателя и при наличии в лабораториях лаборанта, обслуживающего эти лаборатории. Самостоятельное выполнение работ в лаборатории студентами без наблюдения со стороны преподавателя категорически запрещено.

Работа в лаборатории связана с возможностью прикосновения к частям установки или оборудованию, находящемуся под высоким напряжением, и поэтому опасна. При работе в высоковольтной лаборатории особо важно соблюдать требования установленной дисциплины и правила техники безопасности.

Студенты, которые по каким-либо причинам нарушили дисциплину или правила техники безопасности, должны быть немедленно удалены из лаборатории. Для получения допуска к выполнению лабораторных работ после их удаления, студентам необходимо получить соответствующее разрешение в деканате факультета (ректорате университета), а также повторно изучить правила поведения, техники безопасности и сдать соответствующий зачет.

Специальные требования

Перед началом лабораторной работы студент должен изучить принципиальную схему лабораторной установки, ее порядок включения, использования и отключения, а также специальные условия техники безопасности (если таковые имеются). Перед началом выполнения работы необходимо проверить:

– исправность заземления пульта управления и других элементов установки согласно ее схеме;

- исправность защитной блокировки и плотность прилегания двери высоковольтной камеры при ее закрытии;
- наличие средств защиты от высокого напряжения (диэлектрических перчаток и бот).

Сборку схемы или установку испытуемых образцов разрешается производить только при отключенном высоковольтном или общем рубильнике и открытой двери, ведущей в высоковольтное помещение.

При производстве работ, связанных с высоким напряжением, необходимо соблюдать следующие условия:

- включение установок без разрешения преподавателя или лаборанта категорически запрещается;
- перед включением установки необходимо убедиться в том, что в высоковольтной камере никого нет, закрыть дверь, ведущую в нее, убедиться в срабатывании блокировки, громко сказать: «Включаю», только после этого включить установку;
- работать у пульта можно только в поверенных диэлектрических (электроизоляционных) перчатках, ботах и находясь при этом на электроизоляционном диэлектрическом коврикe.

При выполнении работ КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩАЕТСЯ ПРОТЯГИВАТЬ РУКИ ИЛИ КАКИЕ-ЛИБО ПРЕДМЕТЫ ЧЕРЕЗ БАРЬЕР, ОГРАНИЧИВАЮЩИЙ ВЫСОКОВОЛЬТНУЮ КАМЕРУ, ИЛИ ПЕРЕГИБАТЬСЯ ЧЕРЕЗ НЕГО.

Если необходимо войти в высоковольтное помещение, то для этого нужно снять высокое напряжение, затем открыть дверь в высоковольтное помещение и специальной разрядной штангой разрядить высоковольтные шины (электроды) установки. **БЕЗ СОБЛЮДЕНИЯ ЭТОГО ТРЕБОВАНИЯ ВХОДИТЬ В ВЫСОКОВОЛЬТНУЮ КАМЕРУ КАТЕГОРИЧЕСКИ ЗАПРЕЩЕНО!**

Запрещается подходить к установке, касаться любых ее деталей (в том числе изолированных проводов) при отключенном заземлении.

В случае поражения электрическим током быстро освободить пострадавшего от действия электрического тока, сняв питание с рабочего места. Следует оттянуть пострадавшего, обеспечив собственную безопасность. Не ожидая прибытия врача, приступить к оказанию первой помощи.

При отсутствии признаков жизни необходимо уложить пострадавшего лицом вверх. Запрокинув его голову, приступить к массажу сердца (при западании языка – вытащить его). Массаж сердца: ритм 50–60 надавливаний в минуту, искусственное дыхание 12–14 вдуваний в минуту. Искусственное дыхание продолжать до прибытия врача.

1 ТЕХНИКА ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛАБОРАТОРИЯХ

Цель работы. Изучить технику измерения напряжений в высоковольтных лабораториях. Построить градуированную шкалу испытательного трансформатора.

1.1 Краткие сведения из теории

В высоковольтных лабораториях приходится измерять постоянные, переменные и импульсные напряжения. В качестве измерительных устройств на высоком напряжении применяются: электростатические вольтметры, делители напряжения с вольтметрами или осциллографами, шаровые разрядники.

Электростатические вольтметры, благодаря большому входному сопротивлению, не потребляют заметной мощности при измерении. Поэтому они нашли широкое применение для непосредственного измерения на высокой стороне как постоянного напряжения, так и переменного. Основные их недостатки – необходимость установки в высоковольтной ячейке и ограниченные возможности по верхнему пределу измерения. Промышленностью выпускаются электростатические вольтметры до 75 кВ. Приборы на более высокие напряжения встречаются редко.

При более высоких напряжениях приходится применять делители напряжения. Делитель напряжения представляет собой измерительное устройство, которое может быть выполнено из последовательно соединенных резисторов (активный делитель), конденсаторов (емкостной делитель) или быть комбинированными. Кроме того, делитель напряжения в своем составе содержит низковольтное и высоковольтное плечи. К низковольтному плечу присоединяется измерительный прибор, а к высоковольтному – с одной стороны присоединяется к объекту, а с другой стороны – к низковольтному плечу.

Делители напряжения в свою очередь должны удовлетворять основному требованию, что приложенное напряжение на низковольтном плече по форме должно повторять измеряемое напряжение, приложенное к высоковольтному плечу. На напряжения до 110 кВ применяются активные делители, на более высокие напряжения – емкостные или комбинированные. С помощью емкостных делителей можно измерять только переменные и импульсные напряжения. В последнем случае к делителю подключают осциллограф, что дает возможность дополнительно контролировать форму импульсного напряжения.

Наиболее простым и точным средством измерения амплитуды переменных, постоянных и импульсных напряжений является шаровой разрядник, схема включения которого представлена на рисунке 1.1.

Измерения высокого напряжения, проводимые с помощью шаровых разрядников, основаны на использовании зависимости значения пробивного напряжения воздушного промежутка между электродами от расстояния между ними. Для проводимых измерений следует использовать промежутки с однородным или слабонеоднородным полем, в которых значение напряжения возникновения условия самостоятельного разряда и напряжения искрового пробоя близки и имеют линейную зависимость от расстояния.

При этом формы электрических полей подразделяются на однородные, слабонеоднородные и резконеоднородные.

Однородная форма электрического поля характеризуется тем, что его напряженность постоянна вдоль силовых линий. Слабонеоднородное поле – поле, в котором напряженность изменяется вдоль силовых линий не более чем в 2–3 раза, при этом резконеоднородное поле характеризуется большими значениями изменения напряженности электрического поля. Характерная особенность неоднородного поля заключается в неравномерности распределения напряженности в пространстве между электродами. Коэффициент неоднородности K_n характеризует степень неоднородности электрического поля, возникающего между электродами.

$$K_n = \frac{E_{\max}}{E_{\text{cp}}}, \quad (1.1)$$

где E_{\max} – максимальная напряженность, кВ/мм;

E_{cp} – средняя напряженность поля между электродами, кВ/мм.

Средняя напряженность поля при этом

$$E_{\text{cp}} = \frac{U}{S}, \quad (1.2)$$

где U – напряжение, приложенное к электродам, кВ;

S – расстояние между электродами, мм.

Применение шаровых разрядников позволяет измерить высокие напряжения в широком диапазоне от десятков киловольт до нескольких мегавольт. При этом приемлемую точность, получаемую на практике при использовании шарового разрядника, можно получить при правильной методике измерения с соблюдением требований, определенных ГОСТ 17512–82 «Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением».

При определенных условиях расстояние между шарами может служить мерой напряжения, которое вызывает пробой воздушного промежутка. Зависимость пробивного напряжения от расстояния между шарами представлена на рисунке 1.2.

При малых расстояниях между шарами $h < (3..5)d$ пробой воздушного промежутка происходит без предварительной короны ($U_{\text{пр}}$). При больших

расстояниях разрядная характеристика раздваивается (возникает корона, $U_{кор}$), и эта зона отличается большой нестабильностью.

В диапазоне расстояний $0 < h < d$ электрическое поле между шарами почти равномерное, и при повышении напряжения разряд из темного самостоятельного сразу переходит в дуговой. Разрядная характеристика в этом диапазоне почти линейная и очень устойчива. Для точности измерения в пределах 3 % расстояние между шарами не должно превышать половины диаметра шара.

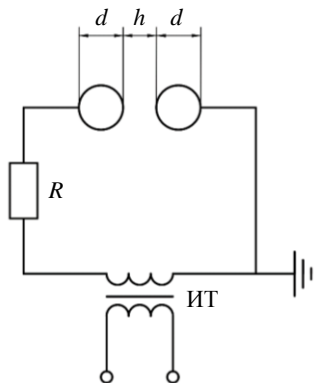


Рисунок 1.1 – Схема включения шарового разрядника

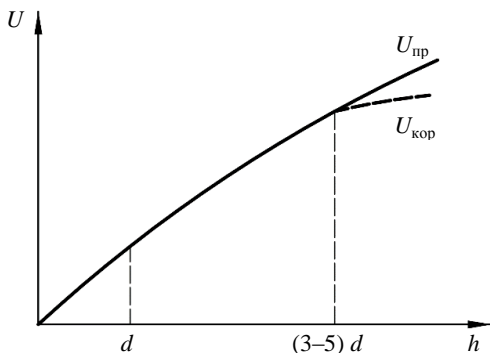


Рисунок 1.2 – Зависимость пробивного напряжения шарового разрядника от величины воздушного промежутка

Существуют международные таблицы разрядных напряжений шаровых разрядников (приложение А). В этих таблицах представлены амплитудные значения разрядных напряжений в зависимости от расстояния между шарами и диаметра шаровых разрядников для нормальных атмосферных условий: давление воздуха – 101,3 кПа (760 мм рт.ст.) и температура окружающего воздуха – 293 К (20 °С).

Если атмосферные условия отличаются от нормальных, то вводится поправочный коэффициент δ

$$\delta = \frac{0,386 p}{273 + t}, \quad (1.3)$$

где p – атмосферное давление, мм рт. ст.;

t – температура воздуха, °С.

Пробивное напряжение для конкретных условий измерения

$$U_{\delta} = \delta U_0, \quad (1.4)$$

где U_0 – пробивное напряжение при нормальных условиях, кВ.

Близость заземленных поверхностей или деталей, находящихся под напряжением, вызывает искажение электрического поля и, следовательно, увеличивает погрешность измерения.

В эксплуатации при профилактических испытаниях изоляции, а также в лабораториях для грубого измерения высокого напряжения, пользуются низковольтными вольтметрами, включенными в первичную цепь испытательного трансформатора: при этом показания вольтметра умножают на коэффициент трансформации испытательного трансформатора (ИТ). Однако такой способ является весьма неточным, так как отношение U_2/U_1 сильно зависит от нагрузки ИТ. С увеличением напряжения возрастают токи утечки по изоляции трансформатора и испытуемого образца. В результате увеличивается падение напряжения на внутреннем сопротивлении трансформатора, а напряжение на испытательных выводах ИТ уменьшается. Для снижения погрешности измерения вольтметр должен быть отградуирован по вторичному напряжению ИТ, измеренному любым из описанных выше способов. Кроме того, поверхности шаров должны быть чистыми, полированными. С этой целью перед измерением их тщательно протирают замшей, а первый разряд в качестве отсчетного не принимают.

Градуированная кривая А значительно отличается от прямой В, построенной по паспортному коэффициенту трансформации ИТ (рисунок 1.3).

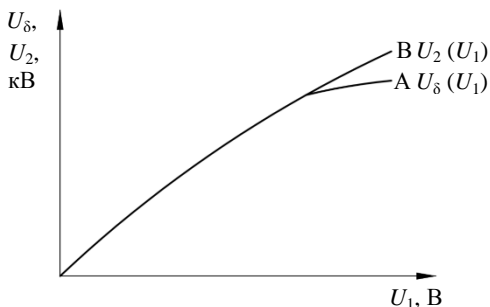


Рисунок 1.3 – Градуированная (А) и расчетная (В) кривые трансформатора

1.2 Описание установки

В лабораторной работе измерение напряжений производится в соответствии со схемой, представленной на рисунке 1.4.

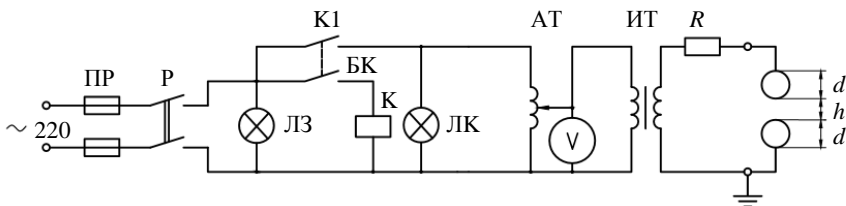


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема установки

При включении рубильника Р, расположенного в высоковольтной камере, загорается зеленая сигнальная лампочка ЛЗ, установленная над входом в высоковольтную камеру. ПР – плавкие предохранители, которые защищают установку в случае возникновения в цепи короткого замыкания. При закрытии двери и фиксации ее в закрытом состоянии замыкаются блок-контакты БК, после нажатия зеленой кнопки на кнопочном выключателе, загорается красная лампочка ЛК и напряжение 220 В поступает на пульт управления установкой. После включения автомата (нажатия белой кнопки) в схеме замыкается контакт К и напряжение 220 В подается на первичную обмотку лабораторного автотрансформатора АТ, которым регулируется напряжение, подаваемое на шаровые разрядники (от 0 до 100 В). Напряжение с автотрансформатора подается на первичную обмотку испытательного трансформатора ИТ, который повышает его в 500 раз (коэффициент трансформации $k = 500$). Ко вторичной обмотке ИТ подключаются разрядники, а также добавочное сопротивление R , для ограничения тока в цепи вторичной обмотки при пробое воздушного промежутка между шаровыми разрядниками.

1.3 Порядок выполнения работы

1.3.1 Ознакомиться со схемой испытательной установки и подготовить шаровые разрядники разного диаметра.

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

1.3.3 Исходя из таблицы разрядных напряжений (приложение А), наметить длины разрядных промежутков между шарами h в диапазоне от 0,5 до 2,0 см.

1.3.4 Подключить к испытательному трансформатору шаровые разрядники меньшего диаметра и установить соответствующее наименьшее расстояние между шарами.

1.3.5 Установить рукоятку автотрансформатора АТ в нулевое положение и рубильником подать напряжение на установку.

1.3.6 Выйти из камеры, закрыть дверь и зафиксировать ее в закрытом положении. **ВНИМАНИЕ! УСТАНОВКА ПОДГОТОВЛЕНА К ВКЛЮЧЕНИЮ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ.**

1.3.7 Надеть диэлектрические перчатки и диэлектрические боты. Встать на диэлектрический коврик. Плавно повышать напряжение до момента пробоя разрядника. В момент пробоя зафиксировать показание вольтметра V . Повторить измерения несколько раз. При повторных измерениях необходимо напряжение на ИТ предварительно снизить до нуля. В качестве отсчетного 1-й и 2-й пробои не принимать. По коэффициенту трансформации на ИТ определить напряжение U_2 на его высоковольтной обмотке.

1.3.8 Повторить действия по пп. 1.3.4–1.3.7 для остальных намеченных промежутков для разрядников с разным диаметром шаров. Перед изменени-

ем расстояния между шарами разрядить специальной разрядной штангой высоковольтный электрод ИТ.

1.3.9 Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты измерений

№	d	h	U_1	U_2	U_0	δ	U_δ	Примечание
	мм		В	кВ	кВ	–	кВ	
1	20	5						1 Давление p , мм рт. ст. 2 Температура t , °С
2		10						
3		15						
4		20						
1	50	5						
2		10						
3		15						
4		20						

1.3.10 Напряжение $U_{0\max}$ берется из таблицы приложения А, а поправочный коэффициент δ рассчитывается по формуле (1.3).

$$U_0 = \frac{U_{0\max}}{\sqrt{2}} . \quad (1.5)$$

По полученным данным построить градуированную кривую испытательного трансформатора и на этот же график нанести прямую, рассчитанную по паспортному коэффициенту трансформации ИТ.

Содержание отчета

- 1 Наименование и цель работы.
- 2 Схема испытательной установки.
- 3 Результаты измерений и расчетов в табличной форме.
- 4 Графики, построенные в одной системе координат.
- 5 Анализ полученных результатов и краткие выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Расскажите устройство и принцип работы испытательной установки.
- 2 Каков порядок выполнения измерений?
- 3 Какие существуют способы измерения высоковольтных напряжений?
- 4 Как выполняется построение градуировочной шкалы трансформатора?
- 5 Для чего применяется поправочный коэффициент?
- 6 Какие способы защиты от высокого напряжения применяются при работе с установкой?
- 7 Почему ограничивают максимальное расстояние между шаровыми разрядниками при проведении высоковольтных испытаний?

2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ВОЗДУХА

Цель работы. Экспериментально определить электрическую прочность воздуха, выявить особенности пробоя воздуха при использовании электродов различной формы и установить зависимость пробивного напряжения от полярности электродов.

2.1 Краткие сведения из теории

Диэлектриками называются вещества, основным электрическим свойством которых является способность поляризоваться в электрическом поле. Диэлектрики по агрегатному состоянию могут быть твердыми, жидкими и газообразными.

Газообразные диэлектрики, особенно атмосферный воздух, часто используются в качестве электрической изоляции. Кроме воздуха широкое применение получили неполярные газы – азот, водород, углекислый газ, инертные газы (аргон, гелий, ксенон, неон), а также полярные газы – фреоны, элегаз (электрический газ) и др.

В таблице 2.1 приведено сравнение газообразных диэлектриков по некоторым основным параметрам.

Таблица 2.1 – Отношения $E_{пр}^Г$ некоторых газов к $E_{пр}^В$ воздуха

Газ	Химический состав	Температура кипения, °С/К	$E_{пр}^Г / E_{пр}^В$
Азот	N ₂	–195,8/77,4	1,0
Водород	H ₂	–252,8/20,4	0,6
Гелий	He	–269,0/4,2	1,0
Элегаз (Гексафторид серы)	SF ₆	–63,8/209,3	2,3
Фреон (Дихлорфторметан)	CCl ₂ F ₂	–28/245,1	2,4

Воздух при атмосферных условиях представляет собой смесь азота, кислорода и инертных газов и является естественной изоляцией многих электротехнических конструкций (изолирующей и охлаждающей средой) во многих электрических установках, например: линий электропередачи, трансформаторов, конденсаторов, воздушных выключателей и т. д.

Воздух как газообразный диэлектрик имеет как положительные, так и отрицательные свойства. К положительным свойствам воздуха относят:

- быстрое восстановление своей электрической прочности после пробоя;
- отсутствие старения, т. е. ухудшения свойств с течением времени;
- малые диэлектрические потери.

При этом отрицательные свойства представлены:

- достаточно невысокой электрической прочностью;
- способностью увлажняться;
- возможностью образовывать окислы и поддерживать горение;
- относительно низкой теплопроводностью.

Любой диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойства изоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. При этом между токоведущими частями (электродами) образуется кратковременно или длительно (постоянно) сквозной токопроводящий канал. Это явление называется пробоем диэлектрика.

Напряжение $U_{пр}$, вызвавшее пробой изоляции электрооборудования или образца электроизоляционного материала, называется пробивным напряжением, а способность диэлектрика противостоять пробую – электрической прочностью $E_{пр}$. Численно электрическая прочность в случае однородного поля (в случае неоднородного поля определяется среднее значение пробивного напряжения) определяется по формуле

$$E_{пр} = \frac{U_{пр}}{h}, \quad (2.1)$$

где h – расстояние между электродами (толщина изоляции в месте пробоя).

В основе развития пробоя газа лежит процесс ударной ионизации. Электроны под действием электрического поля на пути свободного пробега между двумя столкновениями с молекулами набирают энергию, достаточную для ионизации, т. е. для начала ударной ионизации необходимо, чтобы кинетическая энергия электронов, разгоняемых электрическим полем, стала больше энергии ионизации. Столкнувшись с молекулами (газа), они выбивают новые электроны, которые в свою очередь ионизируют соседние молекулы. В результате образуется проводящий канал газоразрядной плазмы.

Если энергии электрона недостаточно, то при соударении он не ионизирует, а только возбуждает атом или молекулу, которые отдают избыточную энергию в виде кванта света – фотона. Фотоны также образуются в результате рекомбинации электронов и ионов. Фотон, двигаясь со скоростью света ($3 \cdot 10^8$ м/с), может быть поглощен атомом (молекулой), расположенным далеко впереди первичной лавины и ионизироваться (*фотоионизация*). Вторичные электроны фотоионизации начинают процесс ударной ионизации и образуют новые электронные лавины, движущиеся впереди первичной лавины. На пути следования каждой лавины образуется канал – *стример*, состоящий из электронов и положительных ионов, плотность которых увеличивается в геометрической прогрессии.

Электрический ток (проводимости) может протекать только в том случае, если в среде имеются свободные заряженные частицы (электроны и ионы). Газ не проводит электрический ток при номинальных условиях (в нормальном состоянии), так как его частицы (атомы и молекулы) являются нейтральными. Однако под действием внешнего электрического поля в газах возникают свободные заряды в виде электрона, а также положительно и отрицательно заряженные ионы.

В однородных и слабонеоднородных полях ударная ионизация охватывает одновременно весь промежуток между электродами и пробой происходит мгновенно. Такое поле можно получить между двумя электродами сферической формы при условии, если расстояние между шарами будет значительно меньше, чем их радиусы.

Воздушная изоляция часто работает в резко неоднородном поле, в котором напряженность может изменяться вдоль силовой линии на несколько порядков. В этом случае, если приложить к воздушному промежутку сравнительно низкое напряжение, на некотором участке напряженность поля может достигнуть величины, при которой в нем начнется процесс ударной ионизации. Но весь газовый промежуток пробит не будет, так как напряженность в большей его части будет недостаточной для пробоя. Чтобы произошел пробой всего воздушного промежутка, нужно повысить приложенное напряжение.

Процесс частичной ионизации газа носит название коронного разряда. Резко неоднородное поле можно получить между электродами игла-плоскость. На величину пробивного напряжения кроме формы оказывает влияние и полярность электродов.

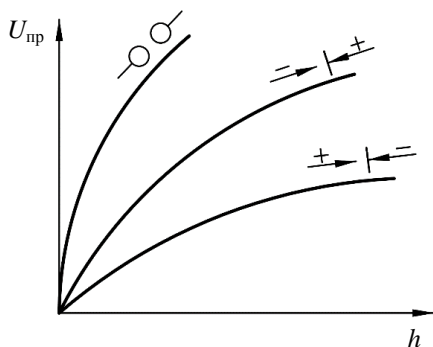


Рисунок 2.1 – Зависимость $U_{пр}$ воздушного промежутка от формы и полярности электродов

Примерный вид зависимостей от расстояния между электродами при различной форме и полярности электродов представлен на рисунке 2.1. В результате ионизации вблизи острия образуются электроны и ионы. При положительной полярности острия электроны быстро нейтрализуются на нем, а менее подвижные положительно заряженные ионы создают объемный положительный заряд, который фактически является продолжением острия и сокращает эффективную длину разрядного промежутка.

При отрицательной полярности острия объемный положительный заряд играет роль экрана, сглаживающего неоднородности поля в разрядном промежутке.

В зависимости от конфигурации электрического поля, мощности источника и давления газа различают следующие **основные виды разрядов**.

Глеющий разряд возникает в промежутке при малых давлениях газа, когда плазма даже при высокой степени ионизации не может приобрести большую проводимость из-за недостаточного числа молекул газа в единице

объема. Тлеющий разряд обычно занимает все пространство между электродами (используется в газосветных трубках, лампах дневного света и др).

Искровой разряд образуется в промежутке при больших давлениях газа p и расстояниях между электродами s ($ps \gg 10\,000$ мм рт. ст.·мм) в случае, если мощность источника питания невелика или если напряжение приложено к промежутку на очень короткое время. При больших давлениях газа разряд уже не занимает всего поперечного сечения промежутка, а развивается в виде узкого канала. Концентрация ионов в плазме, заполняющей этот канал, может достигать больших величин, однако его величина ограничивается мощностью источника. Поэтому интенсивность термической ионизации (ионизация соударяющихся нейтральных молекул нагретого газа при их движении высокими скоростями) в канале может оказаться недостаточной для поддержания его проводимости и канал разряда распадается.

Дуговой разряд является следующей стадией искрового разряда при большой мощности источника. В этом случае через промежуток может проходить большой ток, который способствует разогреву канала, возрастанию его проводимости и дальнейшему увеличению тока до достижения состояния равновесия, когда тепловые потери из канала прекратят дальнейшее повышение температуры. Этот процесс характеризуется относительно большой длительностью. В канале разряда повышается температура до значительной величины, в котором присутствует существенная ионизация газа.

Коронный разряд является формой разряда, характерной для резконеоднородных полей, когда ионизация возникает только в небольшой области вблизи электрода. При этом между электродами не возникает сквозного проводящего канала, что исключает возможность прохождения большого тока независимо от давления газа и мощности источника. Таким образом, образование коронного разряда не означает полной потери газовым промежутком изолирующих свойств, однако является нежелательным, так как коронный (частичный) разряд:

- уменьшает напряжение пробоя изоляционного промежутка;
- расходует полезную мощность в виде тепловой и световой энергии;
- является источником радиопомех;
- в результате ионизации вызывает образование химически активных газов, вызывающих разрушение изоляции.

Под действием этих газов, особенно озона, в присутствии воды и при напряжениях низкой частоты (и постоянном) в твердой изоляции развиваются *водяные дендриты*, «прорастающие» в глубь материала подобно корням деревьев, что со временем приводит к пробое изоляции.

Основным методом борьбы с короной является уменьшение напряженности поля на поверхности провода, что достигается увеличением диаметра проводов и расщеплением фаз.

2.2 Описание установки

Описание (принцип работы) установки для выполнения лабораторной работы по определению электрической прочности воздуха соответствует схеме, представленной на рисунке 1.4, за исключением добавления в цепь вторичной обмотки испытательного трансформатора ИТ выпрямительного столба VD , построенного на базе полупроводниковых диодов, который необходим в схеме для получения постоянного (выпрямленного) напряжения и подачи его на электроды «игла–плоскость».

Постоянное напряжение с вывода выпрямительного столба (на его ввод напряжение поступает с высоковольтной обмотки трансформатора) соответствует положительной полярности электрода, при этом второй (заземленный) электрод будет иметь отрицательную полярность.

При использовании шаровых разрядников в качестве электродов, полярность напряжения, которое на них подается, не играет существенной роли, так как между сферическими электродами при малых расстояниях между ними образуется однородное электрическое поле и при смене их полярности подключения пробивное напряжение не изменяется.

Однако, при использовании электродов «игла–плоскость», между ними образуется неоднородное поле, в котором полярность электродов (главным образом электрода с меньшим радиусом кривизны, т. е. «иглы») уже оказывает влияние на пробивное напряжение.

2.3 Порядок выполнения работы

2.3.1 Подключить сферические электроды меньшего диаметра к высоковольтному выводу отрицательной полярности и к заземляющему проводнику. Установить начальное расстояние между электродами.

2.3.2 Включить рубильник в испытательной (высоковольтной) камере, при этом над ее входом загорается зеленая сигнальная лампа.

2.3.3 Выйти из камеры, закрыть и зафиксировать дверь. Нажать зеленую кнопку на кнопочном выключателе, при этом над камерой загорается красная лампочка, а на панели прибора загорается зеленая.

2.3.4 Надеть индивидуальные средства защиты и нажать белую кнопку «автомата на панели прибора», при этом на нем загорается красная сигнальная лампа.

2.3.5 Плавно поворачивая ручку регулятора выходного напряжения «Регулировка напряжения», поднимать напряжение со скоростью, не превышающей 2 кВ в секунду до момента пробоя. По киловольтметру зафиксировать величину пробивного напряжения и записать его в таблицу 2.2. Повторить пробой несколько раз.

2.3.6 Регулятор выходного напряжения вернуть в исходное положение (влево до упора). Открыть дверь камеры. С помощью разрядной штанги

разрядить высоковольтный электрод. Установить следующее расстояние между электродами. Повторить действия.

Примечание: установку расстояний между электродами при измерениях всегда следует производить при сближении электродов либо при их раздвижении, используя при этом специальные шаблоны в виде пластин.

2.3.7 Вместо сферических электродов установить электроды «игла–плоскость». Повторить действия по пп. 2.3.1–2.3.3. Для электродов игла (И) и плоскость (П). Все измерения произвести дважды при различной полярности электродов «игла–плоскость» с установкой одинаковых значений расстояний между ними.

2.3.8 По данным таблицы 2.2 в одной системе координат построить графики зависимостей $U_{пр} = f(h)$ с указанием формы и полярности электродов.

Таблица 2.2 – Результаты измерений

Форма и полярность электродов	h , мм	Пробивное напряжение, кВ				$E_{пр}$, кВ/мм
		U_1	U_2	U_3	$U_{ср}$	
Шары						
И(+) П(-)						
И(-) П(+)						

Содержание отчета

- 1 Наименование и цель работы.
- 2 Принципиальная схема установки.
- 3 Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.
- 4 Анализ полученных результатов и краткие выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Как происходит пробой газообразного диэлектрика?
- 2 Что такое «ударная ионизация»?
- 3 Какие существуют виды ионизации газов?
- 4 Что такое однородное и неоднородное электрическое поле?
- 5 В чем различие пробоя газа в однородном и неоднородном электрических полях?
- 6 Как зависит электрическая прочность газа от его температуры и давления?
- 7 Как зависит электрическая прочность газа от частоты электрического поля и длительности воздействия приложенного напряжения?
- 8 Как зависит электрическая прочность газа от полярности электродов в неоднородном поле?
- 9 Назовите разновидности газообразных диэлектриков, применяемых в электроустановках, их достоинства и недостатки.
- 10 Какие существуют виды разрядов в газах?
- 11 Почему коронный разряд является нежелательным явлением?
- 12 Назовите способы «борьбы» с коронным разрядом.

3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

Цель работы. Ознакомиться с испытательной установкой и методами испытания твердых и жидких диэлектриков на электрическую прочность.

3.1 Краткие сведения из теории

Твердые диэлектрики объединяют широкий класс веществ, содержащий при этом вещества с радикально различающимися электрическими, теплофизическими, механическими свойствами.

Электрическая прочность твердых диэлектриков выше по сравнению с жидкими и газообразными, при этом на электрическую прочность твердых диэлектриков оказывает влияние время приложенного напряжения, температура, толщина диэлектрика, а также эффект полярности.

В зависимости от физической сущности процессов, приводящих к пробоем твердых диэлектриков, различают четыре вида пробоя: *тепловой*, *электрический*, *поверхностный* и *электрохимический*, связанный с развитием в диэлектрике необратимых процессов его разрушения.

Тепловой пробой (электротепловой) диэлектрика происходит тогда, когда количество тепла, выделяемого в диэлектрике из-за диэлектрических потерь, становится больше, чем он может отдать в окружающую среду. При тепловом пробое электрическая прочность в большой степени зависит от температуры окружающей среды, толщины материала, частоты электрического поля, условий охлаждения. При этом наблюдается снижение электрической прочности, в сравнении с электрическим пробоем. Неоднородность электрического поля при этом виде пробоя существенного влияния на величину электрической прочности диэлектрика не оказывает.

Электрический пробой твердого диэлектрика наступает в результате резкого увеличения числа свободных электронов под действием сильного электрического поля. К моменту наступления пробоя свободные электроны образуют лавину в каком-либо месте диэлектрика, что приводит к образованию сквозного токопроводящего канала. Вышеперечисленные факторы, снижающие $U_{пр}$ при тепловом пробое, на процесс электрического пробоя твердых диэлектриков существенного влияния не оказывают. Но в этом случае, на величину электрической прочности сильно влияет форма электрического поля.

Поверхностный пробой наблюдается вблизи поверхности твердого диэлектрика, возникающий в результате пробоя газа или жидкости. Вследствие возникновения поверхностного пробоя электрическая прочность твердого диэлектрика не нарушается, но образование проводящего канала на поверхности существенно ограничивает рабочие напряжения изолятора.

Электрохимический пробой, связанный с развитием необратимых процессов в твердых диэлектриках (таких как химические превращения, образование субмикро- и микротрещин, развитие частичных разрядов в диэлектрике) включает в себя два этапа: предпробойный период и период характерный для протекания самого пробоя. В течение первого периода происходит медленное изменение химического состава и структуры твердого диэлектрика, возникающее под воздействием электрического поля, при этом процесс сопровождается уменьшением его электрического сопротивления. При дальнейшем разрушении материала диэлектрика электрохимический пробой переходит в тепловой или электрический.

Жидкие диэлектрики нашли широкое применение как высоковольтные изоляционные материалы в электротехническом оборудовании (трансформаторы, кабели, конденсаторы, выключатели, разрядники и др.), так как по сравнению с газообразными диэлектриками они имеют большую электрическую прочность, за счет более высокой плотности (меньшего расстояния между молекулами). Пробивное напряжение жидких диэлектриков по сравнению с газообразными имеет достаточно большой разброс (отклонение от среднего значения пробивного напряжения может достигать 50–70 %).

Жидкие диэлектрики подразделяют на следующие группы:

- углеводороды минеральные (продукты перегонки нефти и каменного угля);
- углеводороды растительные (касторовое, льняное и другие масла);
- хлорированные углеводороды ароматического ряда (хлордифенил, совол);
- кремнийорганические и фторорганические соединения.

В жидких диэлектриках возможны следующие виды пробоя:

- 1) *электрический* – происходит в неполярных жидкостях в результате ударной ионизации;
- 2) *тепловой* – вследствие нагрева диэлектрика из-за диэлектрических потерь, особенно в местах наибольшего скопления примесей;
- 3) *ионизационный* – вследствие ионизации газовых включений.

На пробивное напряжение жидких диэлектриков оказывает влияние множество факторов: загрязнения (при контакте с атмосферным воздухом), процессы окисления при эксплуатации из-за высоких напряженностей электрического поля, контакта с кислородом воздуха, высокой температуры, попадания солнечного света и др. Самым значительным фактором, снижающим электрическую прочность жидких диэлектриков, является влага, а также примеси полярных веществ и воздуха.

В качестве жидкого электроизоляционного материала в электротехнических устройствах наибольшее применение имеет трансформаторное масло. Испытание масла на пробой производится в специальном фарфоровом сосуде вместимостью 500 см³, имеющем латунные дисковые электроды с закругленными краями диаметром 25 мм на расстоянии 2,5 мм.

3.2 Описание установки

Пробой твердых диэлектриков и трансформаторного масла осуществляется при помощи испытательной установки, принципиальная схема которой представлена на рисунке 1.4. Ее принцип работы подробно описан в п.1.2.

Цилиндрические латунные электроды (цилиндр и плоскость) для исследования пробоя твердых диэлектриков устанавливаются в испытательной (высоковольтной) камере. Цилиндрический электрод подключают к высоковольтному выводу испытательного трансформатора, а второй электрод в виде плоскости – заземляют.

В качестве испытуемых твердых диэлектриков используется электрокартон, не пропитанный и пропитанный трансформаторным маслом. Образцы представляют собой квадрат со стороной не менее 100 мм с толщиной 2–4 мм. Также в установке имеется специальная емкость – фарфоровый сосуд с трансформаторным маслом – установленная непосредственно внутри аппарата. В емкости имеются электроды с расстоянием между ними 4 мм для исследования электрической прочности жидких диэлектриков (трансформаторного масла). Для этого необходимо подключить незаземленный электрод фарфорового сосуда к высоковольтному выводу трансформатора и выполнять операции по определению электрической прочности трансформаторного масла аналогично твердым диэлектрикам.

3.3 Порядок выполнения работы

3.3.1 Ознакомиться с принципиальной схемой установки, а также способами испытания твердых и жидких диэлектриков.

3.3.2 Проверить положение рукоятки автотрансформатора (рукоятка должна быть повернута до упора против часовой стрелки).

3.3.3 Измерить толщину образца $\Delta_{обр}$ и записать в таблицу 3.1. Поместить испытуемый образец между электродами и подключить их к установке.

3.3.4 Включить рубильник Р. При этом над входом в высоковольтную камеру загорается зеленая сигнальная лампа ЛЗ.

3.3.5 Выйти из камеры, закрыть и зафиксировать дверь. Нажать зеленую кнопку на кнопочном выключателе, при этом над камерой загорается красная лампочка, а на панели прибора загорается зеленая.

3.3.6 Надеть индивидуальные средства защиты и нажать белую кнопку «автомата на панели прибора», при этом на нем загорается красная сигнальная лампа. **ВНИМАНИЕ! УСТАНОВКА ПОДГОТОВЛЕНА К ПОДАЧЕ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ.**

3.3.7 Плавно вращая рукоятку регулятора напряжения по часовой стрелке, повышать напряжение со скоростью 1 кВ в секунду до момента пробоя. В момент пробоя диэлектрика срабатывает реле максимального тока и ап-

парат выключается. Показание вольтметра в предшествующий пробую момент указывает на величину пробивного напряжения.

3.3.8 Повторить высоковольтные испытания для нескольких слоев таких же образцов. Каждый раз при замене образцов обязательно заземлять высоковольтный электрод специальной разрядной штангой. Затем, взяв образцы из пропитанного электрокартона и выполнить аналогичные измерения. Результаты занести в таблицу 3.1.

3.3.9 В одной системе координат построить графики зависимости пробивного напряжения от толщины испытываемых образцов $U_{пр} = f(h)$ для пропитанного и не пропитанного электрокартона.

Таблица 3.1 – Характеристики свойств электрических проводников при 20 °С

Число образцов (слоев) k	Картон				Примечание
	Непропитанный		Пропитанный		
	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	$U_{пр}$, кВ	$E_{пр}$, кВ/мм	
1					
2					
3					
4					

Содержание отчета

- 1 Наименование и цель работы.
- 2 Принципиальная схема установки.
- 3 Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.
- 4 Анализ полученных результатов и краткие выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое пробивное напряжение и электрическая прочность диэлектрика?
- 2 Какие существуют виды пробоя твердых диэлектриков?
- 3 Какие существуют виды жидких диэлектриков?
- 4 Что такое электрический пробой? От каких факторов зависит величина пробивного напряжения при электрическом пробое?
- 5 Что такое тепловой пробой? От каких факторов зависит величина пробивного напряжения при тепловом пробое?
- 6 Что такое ионизационный пробой? От каких факторов зависит величина пробивного напряжения при ионизационном пробое?
- 7 Что такое электрохимический пробой? От каких факторов зависит величина пробивного напряжения при электрохимическом пробое?
- 8 Что такое поверхностный пробой? От каких факторов зависит величина пробивного напряжения при поверхностном пробое?
- 9 Как изменяется пробивное напряжение электрокартона, если его пропитать трансформаторным маслом?
- 10 Какие факторы влияют на электроизоляционные свойства трансформаторного масла?
- 11 Как восстановить электрическую прочность трансформаторного масла?

4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы. Экспериментально определить значения ε и $\operatorname{tg} \delta$ изоляционных материалов и исследовать их зависимости от частоты и температуры.

4.1 Краткие сведения из теории

Диэлектрики (электроизоляционные материалы) представляют собой широкий класс электротехнических материалов, главное назначение которых заключается в электрической изоляции токоведущих частей друг от друга и которые являются неотъемлемой частью электротехнических устройств.

К диэлектрикам следует относить вещества, проводимость которых незначительна, при этом условной границей величины удельного сопротивления диэлектриков принято считать $\rho > 10^7$ Ом·м.

Диэлектрик, находящийся в электрическом поле (поляризованный диэлектрик), можно рассматривать как конденсатор с сосредоточенной или распределенной по длине емкостью (рисунок 4.1), в котором под действие внешнего электрического поля E происходит разделение зарядов внутри материала диэлектрика.

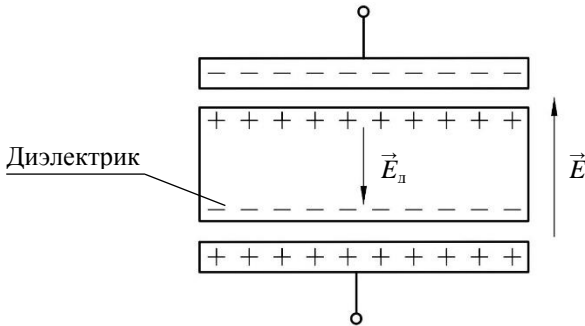


Рисунок 4.1 – Диэлектрик в электрическом поле

Емкость плоского конденсатора

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{h}, \quad (4.1)$$

где ε_0 – электрическая постоянная ($\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ Ф/м);

S – площадь обкладок конденсатора, м²;

h – толщина диэлектрика, м.

К основным электрическим характеристикам электроизоляционных материалов относят: электрическую прочность $E_{\text{пр}}$, МВ/м; удельное электри-

ческое сопротивление ρ , Ом·м; относительная диэлектрическая проницаемость ϵ ; тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$.

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ является одной из важнейших характеристик электроизоляционных материалов, характеризует способность вещества к поляризации в электрическом поле и показывает, во сколько раз диэлектрик ($C_{\text{д}}$) увеличивает емкость конденсатора (C) по сравнению с вакуумом (C_0)

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0} = \frac{C_0 + C_{\text{д}}}{C_0} = 1 + \frac{C_{\text{д}}}{C_0}. \quad (4.2)$$

Под *поляризацией* следует понимать процесс, связанный со смещением связанных зарядов, или ориентацию дипольных (полярных) молекул под воздействием электрического поля.

Все существующие виды поляризации принято делить на две основные группы. К первой группе относится *упругая (мгновенная) поляризация*, которая проходит в диэлектрике за короткое время и без потерь энергии (электронная и ионная поляризации). Ко второй группе относится *релаксационная поляризация*, которая проходит замедленно во времени и сопровождается рассеянием энергии в диэлектрике (все остальные виды поляризации).

Электронная поляризация представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов под действием внешнего поля, она свойственна всем веществам, но играет определяющую роль в неполярных диэлектриках (газообразных, жидких и твердых), протекает практически мгновенно ($\tau = 10^{-15}$ с), без потерь энергии и не зависит от частоты поля.

Ионная поляризация заключается в смещении упруго связанных ионов в пределах межатомного расстояния и характерна для веществ с ионным строением, при этом время поляризации невелико ($\tau = 10^{-13}$ с), происходит практически без потерь энергии.

Дипольно-релаксационная поляризация обусловлена ориентацией дипольных молекул диэлектрика под действием внешнего электрического поля и характерна для полярных диэлектриков, протекает замедленно и сопровождается рассеиванием энергии в диэлектрике в виде тепла.

Ионно-релаксационная поляризация заключается в избыточном локальном перемещении ионов, под действием внешнего электрического поля с последующим их закреплением в местах локальных неоднородностей. Характерна для некоторых ионных кристаллических неорганических веществ с неплотной упаковкой ионов (неорганические стекла, электротехнический фарфор).

Электронно-релаксационная поляризация возникает под действием возбужденных тепловой энергией избыточных электронов или дырок, свойственна для диэлектриков с большой электронной проводимостью и высокими значениями диэлектрической проницаемости.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация наблюдается у диэлектриков, состоящих из областей (имеющих доменную структуру) в пределах которых электрические моменты дипольных молекул ориентированы в одном направлении, а электрические моменты отдельных доменов – в разные. При этом суммарная поляризованность материала незначительна. При наложении внешнего электрического поля электрические моменты отдельных доменов ориентируются вдоль линий электрического поля, что дает эффект сильной поляризации.

При заряде конденсатора часть энергии теряется (рассеивается) в виде тепла в диэлектрике. По особенностям протекания и физической природе диэлектрические потери разделяют на четыре основные группы: *потери от сквозной электропроводимости; потери, обусловленные релаксационной поляризацией; ионизационные потери; резонансные потери.*

Потери от сквозной проводимости протекают в диэлектриках, для которых характерна значительная объемная или поверхностная электропроводность. Данные потери обусловлены нагревом диэлектриков за счет токов сквозной проводимости.

Мощность диэлектрических потерь при сквозной проводимости не зависит от частоты приложенного поля, но тангенс угла диэлектрических потерь уменьшается по гиперболическому закону. Так как повышение температуры является результатом увеличения сквозной проводимости, следовательно, активная мощность будет также расти с повышением температуры по следующему закону

$$P_A = P_{AO} \exp[\alpha (T - T_0)], \quad (4.3)$$

где P_{AO} – потери в диэлектрике при температуре окружающей среды;

α – температурный коэффициент потерь;

T, T_0 – температура соответственно диэлектрика и среды.

Потери на релаксационную поляризацию характеризуются активными составляющими токов абсорбции и наличием максимумов на частотной и температурной зависимостях тангенса угла диэлектрических потерь. В результате циклического изменения электрического поля, дипольные молекулы, вращающиеся в вязкой среде, испытывают постоянное трение между молекулами, которое превращается в тепло (диэлектрик нагревается). Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg } \delta$ будет невелик в том случае, если температура будет низкая, а вязкость материала велика. При этих условиях диполи не успевают следовать за возникающими изменениями поля. Если температура высокая и ориентация молекул происходит практически без трения – $\text{tg } \delta$ будет уменьшаться.

Ионизационные диэлектрические потери в первую очередь характерны для газообразных диэлектриков и диэлектриков, в состав которых входят газовые включения. Ионизационные потери проявляются в неоднородных

электрических полях при напряженности поля, превышающей значение напряженности и соответствующей началу ионизации газа.

Резонансные потери свойственны для некоторых газов и твердых диэлектриков при некоторой строго обусловленной частоте и выражаются сильным поглощением энергии электромагнитного поля, когда частота вынужденных колебаний электрического поля равняется частоте собственных колебаний твердого тела.

В технических изоляционных материалах *добавляются потери*, связанные с токами в проводящих и полупроводящих включениях и ионизацией газовых включений.

Диэлектрик в схеме замещения можно представить параллельно соединенными идеальным конденсатором с емкостью C и резистором с проводимостью G (рисунок 4.2). На векторной диаграмме (рисунок 4.3) ток I представлен в виде суммы активной $I_a = G U$ и реактивной $I_c = j \omega C U$ составляющих.

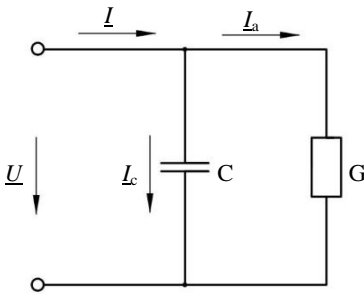


Рисунок 4.2 – Параллельная схема замещения диэлектрика с потерями

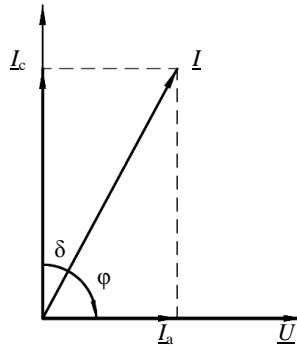


Рисунок 4.3 – Векторная диаграмма конденсатора с потерями

В такой схеме активная мощность, рассеиваемая в диэлектрике при поляризации, представлена как мощность, рассеиваемая на резисторе $P = G U^2$, а электрическая энергия, запасаемая в диэлектрике в виде собственного электрического поля, представлена как реактивная мощность конденсатора $Q = U^2 \omega C$. Угол δ , дополняющий угол ϕ сдвига фаз между напряжением U и током I до 90° , называется **углом диэлектрических потерь**

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{G}{\omega C} = \frac{P}{Q}. \quad (4.4)$$

Следовательно, $\operatorname{tg} \delta$ характеризует соотношение энергии, рассеиваемой в диэлектрике в виде тепла и энергии, запасаемой в электрическом поле конденсатора.

Значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ различных электроизоляционных материалов в большей или меньшей степени зависят от их температуры и частоты приложенного напряжения. Параметры схемы замещения также изменяются при изменении условий эксплуатации диэлектрика. При нагреве возрастает подвижность носителей заряда и молекул, что у большинства диэлектриков приводит к увеличению потерь сквозной проводимости и уменьшению поляризационных потерь. При увеличении частоты приложенного напряжения полярные молекулы вещества не успевают ориентироваться в электрическом поле, что приводит к уменьшению ϵ . Поляризационные потери возрастают до определенной частоты, а затем почти не меняются, соответственно $\operatorname{tg} \delta$ достигает максимума и затем снижается.

4.2 Порядок выполнения работы

4.2.1 Ознакомиться с инструкциями прибора по измерению емкости.

4.2.2 Размещая каждый из испытуемых образцов между латунными электродами, измерить емкость C и $\operatorname{tg} \delta$ образовавшегося «конденсатора»; рассчитать ϵ , используя формулу (4.1). Диаметр электрода $d = 0,044$ м. Частота $f = 100$ Гц. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Основные параметры испытуемых образцов

Материал	Толщина h , мм	Емкость C , нФ	$\operatorname{tg} \delta$	ϵ
Электротехническая бумага	0,16			
Полиэтилен	0,10			
Гетинакс	1,10			
Картон	0,90			

4.2.3 Исследовать зависимость ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ диэлектрика конденсатора от частоты. Для этого сначала измерить емкость C и $\operatorname{tg} \delta$ универсальным измерителем Е7-III на частоте 1000 Гц, а затем на частоте 100 Гц.

Рассчитать проводимость резистора параллельной схемы замещения конденсатора на частоте f и потери мощности при рабочем напряжении U по формулам

$$G = 2\pi f C \operatorname{tg} \delta; P = G U^2. \quad (4.5)$$

Определить относительное изменение измеренных и вычисленных величин. Полученные результаты занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты измерений

Материал	Напряжение U , В	Частота f , Гц	Емкость C , Ф · 10 ⁻⁹	$\operatorname{tg} \delta$	G , См · 10 ⁻⁹	P , Вт · 10 ⁻⁹
Электротехническая бумага		100				
		1000				
		<i>Изменение, раз</i>				

4.2.4 Исследовать зависимость емкости диэлектрика C от температуры. Для этого измерить емкость C конденсатора при комнатной температуре специальным прибором. Нагревая конденсатор, повторять измерения его емкости через равные промежутки времени. Полученные результаты измерений занести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Зависимость емкости диэлектрика от температуры

Время, с	60	120	180	240	300
$C, \Phi \cdot 10^{-9}$					

Построить график зависимости емкости диэлектрика C во времени при его нагреве.

Содержание отчета

- 1 Наименование и цель работы.
- 2 Схема замещения диэлектрика с потерями.
- 3 Основные расчетные формулы.
- 4 Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.
- 5 Анализ полученных результатов и краткие выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое диэлектрическая проницаемость ϵ ?
- 2 На какие две группы условно разделяют виды поляризации диэлектриков? В чем их основные различия?
- 3 Назовите какие виды поляризации диэлектриков относят к упругим видам. Объясните их физическую природу.
- 4 Назовите какие виды поляризации диэлектриков относят к замедленным видам. Объясните механизм дипольно-релаксационной поляризации.
- 5 Перечислите причины потерь энергии в изоляции электротехнических устройств.
- 6 Что такое угол диэлектрических потерь δ и тангенс этого угла $\operatorname{tg} \delta$?
- 7 Как влияют диэлектрическая проницаемость ϵ и тангенс угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$ изоляции на работу электрических устройств?
- 8 Почему диэлектрик можно представить в виде конденсатора, при объяснении механизма поляризации?
- 9 Как выглядит параллельная схема замещения диэлектрика для определения его потерь?
- 10 Как зависят параметры схемы замещения диэлектрика («конденсатора» с потерями) от величины диэлектрической проницаемости ϵ и тангенса угла диэлектрических потерь $\operatorname{tg} \delta$?
- 11 Назовите ориентировочные значения ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ некоторых электроизоляционных материалов.
- 12 Объясните зависимости ϵ и $\operatorname{tg} \delta$ исследованных диэлектрических материалов от частоты и температуры.
- 13 Как рассчитать мощность потерь в диэлектрике?

5 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАГНИТОМЯГКИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы. Экспериментально определить характеристики металлических и неметаллических магнитомягких магнитных материалов.

5.1 Краткие сведения из теории

Материалы, способные под действием внешнего магнитного поля намагничиваться, т. е. приобретать особые магнитные свойства, называются магнитными. В зависимости от таких параметров как напряженность магнитного поля, температура и других факторов выделяют две основные группы магнитных материалов:

- слабомагнитные материалы (диа-, пара- и антиферромагнетики);
- сильномагнитные материалы (ферро- и ферримагнетики).

Диамагнетики представляют собой вещества, намагничивающиеся против направления внешнего магнитного поля, у которых магнитная проницаемость меньше единицы и не зависит от напряженности приложенного внешнего магнитного поля (инертные газы, азот, водород, кремний, фосфор, висмут, цинк, медь, золото, серебро).

К *парамагнетикам* относятся вещества, молекулы которых обладают собственными магнитными моментами, которые под действием внешнего поля ориентируются вдоль него и тем самым создают результирующее поле, превышающее внешнее. В отсутствие внешнего магнитного поля парамагнетик не намагничен, так как из-за теплового движения собственные магнитные моменты атомов ориентированы совершенно беспорядочно. Магнитная проницаемость парамагнетиков немного больше единицы и не зависит от напряженности внешнего магнитного поля (алюминий, платина, щелочные и щелочноземельные металлы, а также сплавы этих металлов и др.). Парамагнетиками становятся ферро- и антиферромагнитные вещества при температурах, превышающих, соответственно, температуру Кюри или Нееля (температуру фазового перехода в парамагнитное состояние).

К *ферромагнетикам* относятся вещества (железо, кобальт, никель а также сплавы и соединения этих металлов с другими элементами) с ярко выраженными магнитными свойствами, которые в значительной степени зависят от напряженности приложенного внешнего магнитного поля. Магнитные материалы с ферромагнетизмом характеризуются внутренней упорядоченностью, выраженным наличием макроскопических областей, внутри которых существует параллельная ориентация магнитных моментов атомов даже при отсутствии внешнего магнитного поля. Главной особенностью веществ, обладающих ферромагнетизмом, является способность намагничиваться в относительно слабых магнитных полях.

Ферромагнетики – вещества, обладающие свойствами характерными для ферромагнетиков, но отличающиеся от них высоким удельным сопротивлением и низкой индукцией насыщения.

К *антиферромагнетикам*, в отличие от ферромагнетиков, относятся магнитные вещества, в которых ниже некоторой критической температуры (Нееля) возникает антипараллельная ориентация элементарных магнитных моментов электронов соседних атомов, в результате антиферромагнетики обладают очень малой магнитной восприимчивостью и ведут себя как слабые парамагнетики.

Все ферромагнетики характеризуются:

- большой магнитной проницаемостью (восприимчивостью);
- способностью намагничиваться до насыщения при обычных температурах даже в слабых полях;
- гистерезисом, т. е. способностью магнитных свойств зависеть от предшествующего состояния;
- точкой Кюри, т. е. способностью материала терять свои ферромагнитные свойства, находясь выше предельной температуры.

Поведение ферромагнитного материала в магнитном поле характеризуется начальной кривой намагничивания (рисунок 5.1) – зависимостью магнитной индукции B в материале от напряженности магнитного поля H .

Свойства магнитных материалов оценивают следующими магнитными характеристиками.

Абсолютная магнитная проницаемость μ_a представляет собой отношение магнитной индукции B к напряженности магнитного поля H в заданной точке кривой намагничивания материала (применяется только для расчетов)

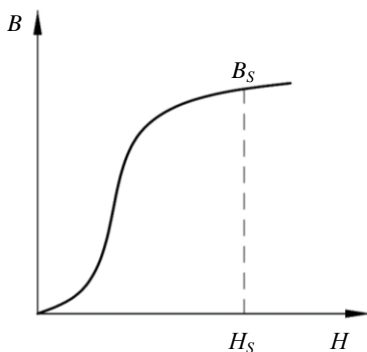


Рисунок 5.1 – Начальная кривая намагничивания ферромагнетика

$$\mu_a = \frac{B}{H}. \quad (5.1)$$

Относительная магнитная проницаемость μ – отношение абсолютной магнитной проницаемости к магнитной постоянной, применяется для оценки магнитных свойств материалов. Величина безразмерная, ее называют магнитной проницаемостью

$$\mu = \frac{\mu_a}{\mu_0}, \quad (5.2)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Большие значения μ_n (начальная) и μ_{\max} (максимальная) показывают, что материал легче намагничивается.

Индукция насыщения B_s . Чем больше B_s при заданной напряженности в области насыщения, тем лучше данный магнитный материал. Предельная (статическая) петля гистерезиса (рисунок 5.2). Это зависимость $B = f(H)$ в форме замкнутой петли, снятой при медленном изменении напряженности постоянного магнитного поля от $+H$ до $-H$ и обратно, когда магнитная индукция становится равной индукции насыщения B_s .

Динамическая петля гистерезиса (рисунок 5.3) образуется при перемагничивании материала переменным магнитным полем и имеет большую площадь, чем статическая.

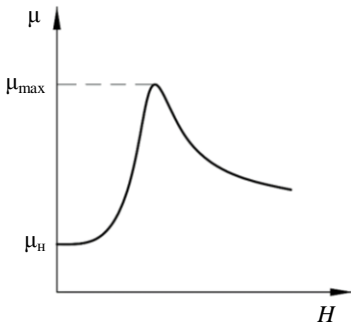


Рисунок 5.2 – Зависимость $\mu = f(H)$

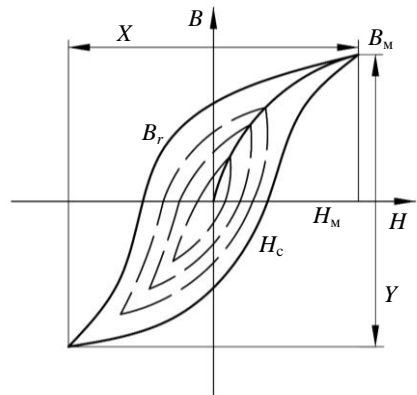


Рисунок 5.3 – Петля гистерезиса и динамическая кривая намагничивания

Отношение амплитуды индукции к амплитуде напряженности магнитного поля на динамической кривой намагничивания представляет собой *динамическую магнитную проницаемость*, Гн/м

$$\mu_d = \frac{B_M}{H_M}. \quad (5.3)$$

Остаточная магнитная индукция B_r наблюдается в ферромагнетике при его размагничивании, когда напряженность магнитного поля равна нулю.

Коэрцитивная (задерживающая) сила H_c – напряженность поля, при которой индукция равна нулю. Чем больше коэрцитивная сила, тем материал в меньшей степени способен размагничиваться.

Удельные потери энергии на гистерезис P_g – потери, затрачиваемые на перемагничивание материала за один цикл. Определяются площадью статической петли гистерезиса и зависят от магнитной индукции и частоты тока.

Потери энергии на вихревые токи P_v . Существуют только в переменных магнитных полях. Они пропорциональны квадрату толщины материала, квадрату амплитуды магнитной индукции, квадрату частоты переменного магнитного поля и обратно пропорциональны удельному электрическому сопротивлению и плотности материала.

По поведению в магнитном поле все магнитные материалы делятся на две основные группы – *магнитомягкие* и *магнитотвердые*. Магнитомягкие материалы характеризуются большими значениями μ_n и μ_{max} и малыми значениями H_c , легко намагничиваются и размагничиваются, имеют малые потери на гистерезис. Им соответствует узкая гистерезисная петля. Применяются в качестве сердечников различных электротехнических устройств и аппаратов.

Магнитотвердые материалы обладают большими значениями H_c и B_r , им соответствует широкая петля гистерезиса. Применяются для производства постоянных магнитов.

По составу все магнитные материалы делятся на *металлические*, *нематаллические* и *магнитодиэлектрики*. К металлическим магнитным материалам относят чистые металлы (железо, кобальт, никель) и магнитные сплавы некоторых металлов, к нематаллическим – ферриты, получаемые из порошкообразной смеси окисла железа и окислов других металлов. Ферриты, так же как и металлические материалы, могут быть магнитомягкими и магнитотвердыми. Магнитодиэлектрики представляют собой композиционные материалы, состоящие из 60–80 % порошкообразного магнитного материала и соответственно 40–20 % диэлектрика. Ферриты и магнитодиэлектрики отличаются от металлических магнитных материалов большим удельным электрическим сопротивлением, что резко снижает потери на вихревые токи. Это позволяет использовать их в технике высоких и сверхвысоких частот.

5.2 Описание установки

Принципиальная электрическая схема установки для снятия петли гистерезиса при помощи электронного осциллографа показана на рисунке 5.4.

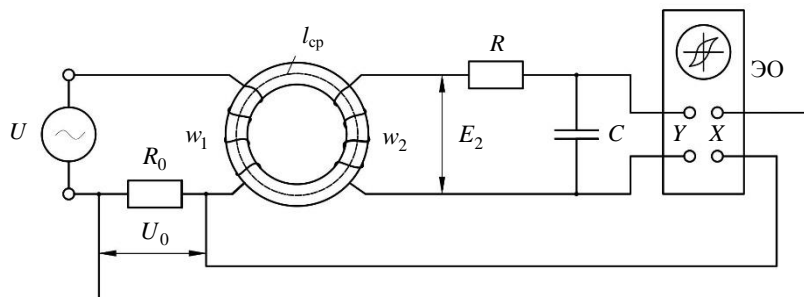


Рисунок 5.4 – Принципиальная электрическая схема для снятия петли гистерезиса магнитного материала

На горизонтальный вход X осциллографа ЭО подается напряжение U_0 , пропорциональное намагничивающему току I_1 и, соответственно, напряженности магнитного поля. На вертикальный вход Y осциллографа подается напряжение U_Y , которое благодаря интегрирующей цепочке RC пропорционально магнитной индукции. Измерив осциллографом максимальные значения напряжения $U_{0\max}$ и ЭДС E_{2m} вторичной обмотки и определив по координатной сетке размеры изображения петли, можно вычислить масштабы по осям B и H

$$m_B = \frac{2B_M}{Y} = \frac{2E_{2m}}{\omega w_2 S Y} \cdot 10^4; \quad (5.4)$$

$$m_H = \frac{2H_M}{X} = \frac{2U_{0\max} w_1}{l_{cp} R_0 X} \cdot 10^2; \quad (5.5)$$

где S – сечение образца, см^2 ;

l_{cp} – длина средней магнитной силовой линии, см ;

R_0 – образцовое сопротивление, Ом ;

ω – угловая частота, с^{-1} ;

w_1, w_2 – количество витков обмоток трансформатора;

X, Y – размеры изображения петли на экране осциллографа, мм ;

$U_{0\max}$ – максимальные значения падения напряжения на R_0 , измеряемое осциллографом, В

E_{2m} – ЭДС вторичной обмотки трансформатора, измеряемое осциллографом, В

Величины B_M и H_M определяются по формулам

$$B_M = \frac{Y}{2} m_B; \quad (5.6)$$

$$H_M = \frac{X}{2} m_H. \quad (5.7)$$

Удельные потери, Вт/кг

$$P_{ГВ} = \frac{S_{п} m_B m_H f}{\gamma}, \quad (5.8)$$

где $S_{п}$ – площадь динамической петли гистерезиса, мм²;
 γ – удельная плотность материала образца, кг/м³.

5.3 Порядок выполнения работы

5.3.1 Собрать схему по рисунку 5.4, подключив образец из электротехнической стали. В качестве источника напряжения использовать лабораторный автотрансформатор.

Исходные данные для расчетов представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Исходные данные

Материал	w_1	w_2	l_{cp}	S	R_0	R_1	C	γ
	–	–	см	см ²	Ом	кОм	мкФ	кг/м ³
Электротехническая сталь	1000	500	20	1,0	25	30	25	$7,75 \cdot 10^3$
Феррит	1000	500	18	1,9				$4,45 \cdot 10^3$
Пермаллой	500	100	18	0,5				$8,60 \cdot 10^3$

5.3.2 С помощью лабораторного автотрансформатора и рукояток усиления по входам Y и X осциллографа получить предельную динамическую петлю, имеющую размеры по осям Y и X заданные преподавателем.

5.3.3 С помощью осциллографа измерить значения $U_{0\max}$ и E_{2m} , при отключенных входах X и Y осциллографа соответственно. Параметры схемы и результаты измерений занести в таблицу 5.2. По формулам (5.4), (5.5) определить масштабы m_B и m_H .

Таблица 5.2 – Результаты измерений и расчетов

Материал	Масштаб		Измерено				Вычислено	
	X	Y	X	Y	$U_{0\max}$	E_{2m}	m_B	m_H
	В/дел		мм		В		Тл/мм	А/мм
Электротехническая сталь								
Феррит								
Пермаллой								

5.3.4 Все динамические петли (кривые намагничивания) изобразить в тетради в одной системе координат с указанием размерности по осям (см. рисунок 5.3).

5.3.5 С помощью рукоятки «Регулятор выхода» генератора, не изменяя положения рукояток усиления по осям осциллографа, устанавливать на экране осциллографа величины Y в заданных пределах. Данные измерений занести в таблицу 5.3. Произвести расчет указанных в таблице 5.3 характеристик магнитного материала.

Таблица 5.3 – Результаты измерений и расчетов

Материал	№	Измерено		Вычислено					
		$Y/2$	$X/2$	B_m	H_m	μ	$\mu = \mu/\mu_0$	S_p	$P_{гв}$
		мм		Тл	А/м	Гн/м	–	мм ²	Вт/кг
Электротехническая сталь	1								
	2								
	3								
Феррит	1								
	2								
	3								
Пермаллой	1								
	2								
	3								

5.3.6 По данным таблицы 5.3 построить кривые $B_m = f(H_m)$, $\mu = f(H_m)$, $P_{гв} = f(B_m)$.

Содержание отчета

- 1 Наименование и цель работы.
- 2 Принципиальная электрическая схема для снятия петли гистерезиса магнитного материала.
- 3 Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.
- 4 Анализ полученных результатов и краткие выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Что такое магнитные материалы и чем обусловлены их магнитные свойства?
- 2 На какие группы делятся магнитные материалы?
- 3 Чем обусловлены высокие магнитные свойства ферромагнетиков?
- 4 Назовите величины, характеризующие магнитные свойства материала.
- 5 Что такое магнитомягкие и магнитотвердые материалы?
- 6 Назначение и область применения магнитомягких и магнитотвердых материалов.
- 7 Виды потерь в магнитных материалах.
- 8 Способы снижения потерь в электротехнических устройствах.
- 9 От каких факторов зависят потери в магнитных материалах?

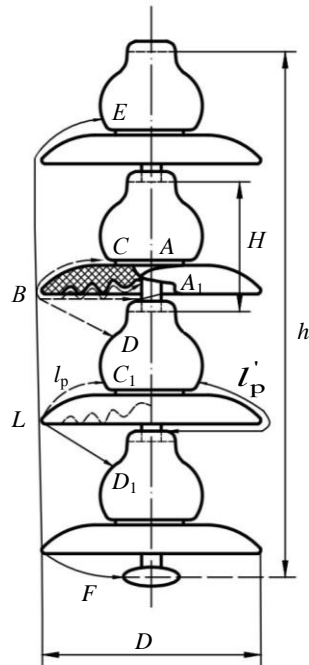
6 ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ВДОЛЬ ЕМКОСТНЫХ ЦЕПОЧЕК (ГИРЛЯНДЫ ИЗОЛЯТОРОВ)

Цель работы. Экспериментально исследовать распределение напряжения вдоль емкостных цепочек (вдоль гирлянды подвесных изоляторов) и ознакомиться с методами выравнивания распределения напряжения по гирлянде изоляторов.

6.1 Краткие сведения из теории

Электрическая прочность гирлянды не может быть достаточно точно оценена по разрядному напряжению отдельного изолятора и числу таких изоляторов в гирлянде. Это объясняется тем, что разрядное расстояние (наискратчайший путь по воздуху между электродами) для одиночного изолятора l_p' (рисунок 6.1) отличается от разрядного расстояния изолятора l_p , находящегося в гирлянде.

Рисунок 6.1 – Основные размеры гирлянды подвесных изоляторов:
 l_p' – разрядное расстояние одного изолятора;
 l_p – разрядное расстояние изолятора в гирлянде;
 L – разрядное расстояние гирлянды;
 D – диаметр тарелки;
 H – строительная высота изолятора;
 h – длина гирлянды



Разряд по гирлянде изоляторов может развиваться по одному из трех путей:
а) вдоль поверхности изоляторов по пути CBA или CBA_1 ;
б) по пути CBD с длиной $l_p n$ (где n – число изоляторов в гирлянде);
в) по пути EF (при большом числе изоляторов равен длине гирлянды).

Разрядное напряжение гирлянды зависит от того, по которому из этих путей развивается разряд.

Электрическая прочность по пути EF практически равна прочности воздушного промежутка между электродами стержень–стержень длиной L , так как разряд развивается почти полностью по воздуху.

Разряд по поверхности диэлектрика происходит при более низком напряжении, поэтому разрядное напряжение по пути CBD (частично или полностью по поверхности изолятора) ниже, чем по пути EF , несмотря на то, что $L < n l_p$.

Поэтому для увеличения разрядного напряжения гирлянды стремятся повышать соотношение l_p/H , приближая электрическую прочность по пути CBD к прочности по пути EF . Оптимальное соотношение l_p/H составляет 1,3. В этом случае разряд развивается по пути EF .

Для повышения соотношения l_p/H увеличивают диаметр тарелки или сокращают строительную высоту изолятора, уменьшая размеры шапок и длину стержня. Первый путь менее целесообразен, так как приводит к увеличению размеров и веса изолятора.

В условиях дождя напряжение почти полностью ложится на нижние мало смоченные поверхности изоляторов, поэтому увеличение соотношения l_p/H приводит также и к повышению мокроразрядного напряжения гирлянды.

Напряжение между изоляторами в гирлянде распределяется неравномерно. Наибольшее напряжение ложится на изоляторы, расположенные около провода, наименьшее – на изоляторы, находящиеся в середине гирлянды. Несколько повышенное напряжение приходится на изоляторы, расположенные у заземленного конца гирлянды.

В технике высоких напряжений в целях получения равномерного распределения общего приложенного напряжения по отдельным элементам применяют метод последовательного соединения одинаковых изоляторов. Если рассматривать каждый элемент как сосредоточенную емкость, то при одинаковых емкостях элементов равномерное распределение напряжения имеет место до тех пор, пока последовательное соединение емкостей не нарушается.

В реальных условиях в электрических установках помимо собственных (продольных) емкостей имеет место неравномерное распределение напряжения по отдельным элементам и участкам изоляции, т. е. имеются паразитные емкости элементов относительно земли и высоковольтного провода влияющие, в значительной степени, на распределение напряжения.

Совокупность собственных и паразитных емкостей принято называть цепью конденсаторов или емкостной цепочкой. Подобные цепочки могут

встречаться и при последовательном соединении резисторов (делители напряжения или разрядники) или катушек индуктивностей (в обмотке трансформаторов) и др. В этих случаях цепь конденсаторов определяет распределение напряжения при высоких частотах или процессах с очень высокой крутизной напряжения, в то время как при низкой частоте и малой крутизне напряжение распределяется по сопротивлениям или индуктивностям.

Для подвески проводов на линиях электропередач и подвески контактной сети применяются подвесные изоляторы, собираемые в гирлянды (рисунок 6.2, а). На гирляндах подвесных изоляторов, опорных изолированных колоннах, высоковольтных выводах трансформаторов, а также выключателях наблюдается наиболее неравномерное распределение напряжения.

Подвесные гирлянды, состоящие из отдельных тарелочных изоляторов, можно представить в виде частичных собственных емкостей dC и паразитных емкостей dC_3 и dC_{II} относительно земли и провода высокого напряжения. В схеме замещения (рисунок 6.2, б) гирлянда общей длиной l заменена распределенными частичными емкостями.

Если длина одного элемента dx стремится к нулю, то общие емкости можно выразить следующим образом: продольная емкость $C = dC dx/l$; емкость относительно земли $C_3 = dC_3 dx/l$; емкость относительно провода $C_{II} = dC_{II} dx/l$.

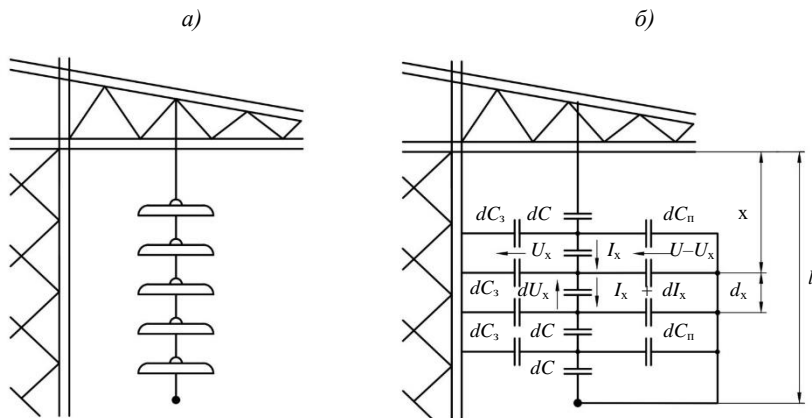


Рисунок 6.2 – Емкостные цепочки:

а – подвесная гирлянда изоляторов на решеточной мачте; б – схема замещения гирлянды

Тогда при синусоидальном напряжении с угловой частотой ω для элементарного участка dx можно записать

$$-dU_x = \frac{I_x + dI_x}{\omega C l} dx \quad \text{или} \quad \frac{dU_x}{dx} = -\frac{I_x}{\omega C l} - \frac{dI_x}{\omega C l}; \quad (6.1)$$

$$-dI_x = dI_3 - dI_{II}; \quad (6.2)$$

где частичные токи соответственно

$$dI_3 = U_x \omega C_3 \frac{dx}{l}; \quad dI_{II} = (U - U_x) \omega C_{II} \frac{dx}{l}. \quad (6.3)$$

Дифференцируя выражение (6.1) по x , пренебрегая вторым порядком малости $d^2 I_x$ и учитывая выражения (6.3), получим дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 U_x}{dx^2} = U_x \frac{C_{II} + C_3}{C} \frac{1}{l^2} - U \frac{C_{II}}{C} \frac{1}{l^2}. \quad (6.4)$$

Разделив обе части уравнения (6.4) на U и введя обозначения $\alpha = x/l$ (или $x = \alpha l$), $dx^2 = l^2 d\alpha^2$, $U_\alpha = U_x / U$, получим

$$\frac{d^2 U_\alpha}{d\alpha^2} = U_\alpha \frac{C_3 + C_{II}}{C} - \frac{C_{II}}{C}. \quad (6.5)$$

Решением дифференциального уравнения (6.5), как известно, является сумма общего решения уравнения без правой части и частного решения уравнения с правой частью, т.е.

$$U_\alpha = A e^{p\alpha} + B e^{-p\alpha} + D, \quad (6.6)$$

где A , B и D – постоянные интегрирования общего решения дифференциального уравнения;

p – корень характеристического уравнения;

$$p = \sqrt{\frac{C_3 + C_{II}}{C}};$$

$$D = \frac{C_{II}}{C_3 + C_{II}}.$$

Постоянные коэффициенты A и B определим из начальных условий: при $\alpha = 0$ и $U_\alpha = 0$; при $\alpha = 1$ и $U_\alpha = 1$. Тогда из выражения (6.6) получим уравнения

$$0 = A + B + D,$$

$$1 = A e^p + B e^{-p} + D.$$

Откуда

$$A = \frac{1-D}{2 \operatorname{Sh} p} + \frac{D e^{-p}}{2 \operatorname{Sh} p}; B = -\left(\frac{1-D}{2 \operatorname{Sh} p} + \frac{D e^p}{2 \operatorname{Sh} p}\right). \quad (6.7)$$

Подставляя выражения (6.7) в уравнение (6.6), получим

$$U = (1-D) \frac{\operatorname{Sh} p \alpha}{\operatorname{Sh} p} + D \left(1 - \frac{\operatorname{Sh} p(1-\alpha)}{\operatorname{Sh} p}\right); \quad (6.8)$$

или

$$U = \frac{1}{C_1 + C_2} \left(C_1 \frac{\operatorname{Sh} p \alpha}{\operatorname{Sh} p} + C_2 \left[1 - \frac{\operatorname{Sh} p(1-\alpha)}{\operatorname{Sh} p}\right] \right). \quad (6.9)$$

Выражение (6.9) показывает характер распределения напряжения при различных комбинациях параметров емкостной цепочки. Результаты вычислений показаны на рисунке 6.3.

В реальных устройствах емкости относительно земли обычно больше, чем емкости относительно провода, т. е. $C_3 > C_n$. Поэтому наибольшее напряжение ложится на ближайший к проводу изолятор. При напряжениях 150 кВ и выше это может привести к возникновению короны, так как корона появляется на изоляторе при $U = 20 \dots 24$ кВ.

При атмосферных или коммутационных перенапряжениях появляется опасность возникновения разряда, переходящего в дугу. Для выравнивания распределения напряжения вдоль гирлянды используют защитную арматуру (металлические кольца, восьмерки или овалы, укрепляемые на конце гирлянды со стороны провода). Более благоприятные условия имеют место при расщеплении фаз на несколько проводов, поскольку в этом слу-

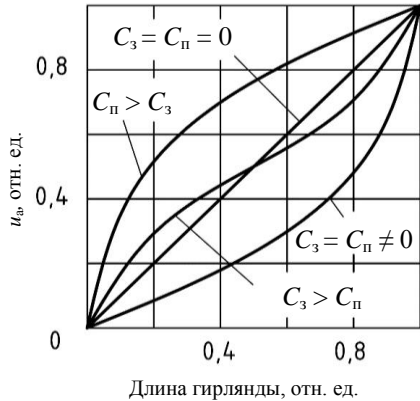


Рисунок 6.3 – Распределение напряжения вдоль емкостной цепочки

чае емкость изоляторов относительно проводов значительно больше (провода расщепленной фазы сами выполняют роль защитной арматуры).

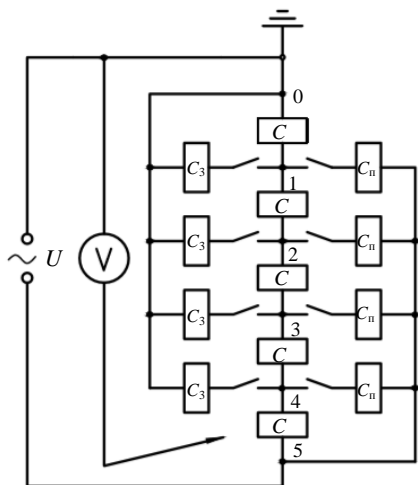


Рисунок 6.4 – Принципиальная схема для исследования распределения напряжения

6.2 Описание установки

Для экспериментального исследования распределения напряжения вдоль емкостной цепочки, а также влияния величин емкостей на характер распределения потенциалов используется лабораторный макет, собранный в соответствии со схемой на рисунке 6.4.

6.3 Порядок выполнения работы

6.3.1 Ознакомиться с теоретической частью работы, а также со схемой установки;

6.3.2 Используя параметры схемы и указания преподавателя, заполнить таблицу исходных данных (таблица 6.1).

Таблица 6.1 – Исходные данные

Количество продольных конденсаторов n	Соотношение емкостей $C_3:C_n$	Входное напряжение U , В	Частота f , Гц
5	10:2,5:1		

6.3.3 Рассчитать и занести в таблицу 6.2 значения коэффициентов уравнения (6.6) распределения напряжения вдоль емкостной цепочки в соответствующих режимах работы.

Таблица 6.2 – Расчетные коэффициенты уравнения

Режимы работы	Расчетные коэффициенты			
	A	B	D	p
Включены конденсаторы C	–	–	–	–
Включены конденсаторы C и C_n				
Включены конденсаторы C и C_3				
Включены конденсаторы C , C_n и C_3				

6.3.4 Произвести расчет распределения напряжения в относительных и абсолютных единицах во всех исследуемых режимах работы. Результаты расчетов свести в таблицу 6.3.

Таблица 6.3 – Распределение напряжения по емкостной цепочке

Режим работы	Порядковый номер элемента i	Координата $\alpha = i/n$	Распределение напряжения			
			Расчет		Эксперимент	
			$U_{\alpha i}$ отн. ед.	$\Delta U i$ В	$U_{\alpha i}$ отн. ед.	$\Delta U i$ В
Включены конденсаторы C	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
Включены конденсаторы C и C_{II}	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
Включены конденсаторы C и C_3	1					
	2					
	3					
	4					
	5					
Включены конденсаторы C , C_{II} и C_3	1					
	2					
	3					
	4					
	5					

6.3.5 Собрать схему по рисунку 1.3. Установить на выходе лабораторного автотрансформатора заданное напряжение (около 20 В). Вольтметром произвести измерения потенциалов точек 1, 2, 3, ..., n схемы:

- при отключенных S_1 и S_2 ;
- при включенном S_1 и отключенном S_2 ;
- при отключенном S_1 и включенном S_2 ;
- при включенных S_1 и S_2 .

Результаты измерений занести в таблицу 6.3.

6.3.6 По результатам таблицы 6.3 в одной системе координат построить расчетные и экспериментальные зависимости $U_{\alpha} = f(\alpha)$ и $\Delta U = f(\alpha)$. Дать анализ характера распределения напряжения вдоль конденсаторной цепи в различных режимах.

Содержание отчета

- 1 Наименование и цель работы.
- 2 Принципиальная схема для исследования распределения напряжения вдоль емкостной цепочки.
- 3 Результаты измерений и расчетов в виде таблиц и графиков.
- 4 Анализ полученных результатов и краткие выводы.

Контрольные вопросы

- 1 Какова схема замещения гирлянды подвесных изоляторов?
- 2 Почему изолятор в схеме замещения можно заменить конденсатором?
- 3 Почему по гирлянде изоляторов напряжение распределяется неравномерно?
- 4 К чему может привести неравномерное распределение напряжения по гирлянде изоляторов?
- 5 Как аналитически рассчитать распределение напряжения вдоль емкостной цепочки?
- 6 Какие существуют способы выравнивания распределения напряжения по гирлянде изоляторов?
- 7 Какие существуют способы обнаружения дефектных изоляторов?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 **Привалов, Е. Е.** Электротехническое материаловедение : учеб. пособие / Е. Е. Привалов. – М. : Берлин Директ-Медиа, 2015. – 234 с.
- 2 **Журавлева, Л. В.** Электроматериаловедение : учеб. для нач. проф. образования / Л. В. Журавлева. – 9-е изд., стер. – М. : Академия, 2013. – 352 с.
- 3 **Проничев, Д. В.** Электротехнические материалы : учеб.-метод. пособие / Д. В. Проничев, О. В. Слаутин. – Волгоград : ВолгГТУ, 2017. – 94 с.
- 4 **Долгопол, Т. Л.** Электротехническое материаловедение. Диэлектрики : учеб. пособие [Электронный ресурс] / Т. Л. Долгопол. – Кемерово : КузГТУ, 2012. – 76 с.
- 5 **Перерва, Г. И.** Электротехнические материалы и ТВН : метод. указания к лабораторным работам для студентов специальности «Электрический транспорт» / Г. И. Перерва, С. Л. Курилин. – Гомель : БелГУТ, 1996. – 52 с.
- 6 **Агеева, Н. Д.** Электротехническое материаловедение : учеб. пособие / Н. Д. Агеева, В. Н. Лифанов, Н. Г. Винаковская. – Владивосток : ДВГТУ, 2008 – 109 с.
- 7 Техника высоких напряжений : лабораторные работы (практикум) / В. А. Булат [и др.] ; под общ. ред. К. Ф. Степанчука. – Минск : БНТУ, 2006. – 82 с.
- 8 **Курилин, С. Л.** Электротехнические материалы и технология электромонтажных работ : учеб.- метод. пособие. В 3 ч. Ч. 2. Диэлектрические и магнитные материалы / С. Л. Курилин. – Гомель : БелГУТ, 2009. – 92 с.
- 9 ГОСТ 17512-82. Электрооборудование и электроустановки на напряжение 3 кВ и выше. Методы измерения при испытаниях высоким напряжением. – Введ. 01.01.1984. – М. : Изд-во стандартов, 1984. – 22 с.
- 10 **Закарюкин, В. П.** Техника высоких напряжений : конспект лекций / В. П. Закарюкин. – Иркутск : ИрГУПС, 2005. – 137 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
(справочное)

**РАЗРЯДНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ШАРОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
РАЗРЯДНИКОВ ПРИ ЗАЕМЛЕНИИ ОДНОГО ИЗ ШАРОВ
ДЛЯ НОРМАЛЬНЫХ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ**

Таблица А.1 – Разрядные значения постоянного напряжения обеих полярностей, амплитуды переменного напряжения частотой до 400 Гц, а также разрядные значения напряжений полных грозовых и более длинных импульсов отрицательной полярности

Расстояние между шарами, см	Разрядное напряжение, кВ									
	Диаметр шаров, см									
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100
0,05	2,8									
0,10	4,7									
0,15	6,4									
0,20	8,0	8,0								
0,25	9,6	9,6								
0,30	11,2	11,2								
0,40	14,4	14,3	14,2							
0,50	17,4	17,4	17,2	16,8	16,8	16,8				
0,60	20,4	20,4	20,2	19,9	19,9	19,9				
0,70	23,2	23,4	23,2	23,0	23,0	23,0				
0,80	25,8	26,3	26,2	26,0	26,0	26,0				
0,90	28,3	29,2	29,1	28,9	28,9	28,9				
1,0	30,7	32,0	31,9	31,7	31,7	31,7	31,7			
1,2	(35,1)	37,6	37,5	37,4	37,4	37,4	37,4			
1,4	(38,5)	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9	42,9			
1,5	(40,0)	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5	45,5			
1,6		48,1	48,1	48,1	48,1	48,1	48,1			
1,8		53,0	53,5	53,5	53,5	53,5	53,5			
2,0		57,5	58,5	59,0	59,0	59,0	59,0	59,0		
2,2		61,5	63,0	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	64,5	
2,4		65,5	67,5	69,5	70,0	70,0	70,0	70,0	70,0	
2,6		(69,0)	72,0	74,5	75,0	75,0	75,5	75,5	75,5	
2,8		(72,5)	76,0	79,5	80,0	80,5	81,0	81,0	81,0	
3,0		(75,5)	79,5	84,0	85,0	85,0	86,0	86,0	86,0	86,0
3,5		(82,5)	(87,5)	95,0	97,0	98,0	99,0	99,0	99,0	99,0
4,0		(88,5)	(95,0)	105	108	110	112	112	112	112
4,5			(101)	115	119	122	125	125	125	125
5,0			(107)	123	129	133	137	138	138	138
5,5				(131)	138	143	149	151	151	151
6,0				(138)	146	152	161	164	164	164
6,5				(144)	(154)	161	173	177	177	177
7,0				(150)	(161)	169	184	189	190	190
7,5				(155)	(168)	177	195	202	203	203
8,0					(174)	(185)	206	214	215	215
9,0					(185)	(198)	226	239	240	241

Окончание таблицы А.1

Расстояние между шарами, см	Разрядное напряжение, кВ									
	Диаметр шаров, см									
	2	5	6,25	10	12,5	15	25	50	75	100
10					(195)	(209)	244	263	265	266
11						(219)	261	286	290	292
12						(229)	275	309	315	318
13							(289)	331	339	342
14							(302)	353	363	366
15							(314)	373	387	390
16							(326)	392	410	414
17							(337)	411	432	438
18							(347)	429	453	462
19							(357)	445	473	486
20							(366)	460	492	510
22								489	530	555
24							515	565	595	610
26							(540)	600	635	655
28							(656)	635	675	700
30							(585)	665	710	745
32							(605)	695	745	790
34							(625)	725	780	835
36							(640)	750	815	875
55							(655)	(755)	845	915
38							(670)	(800)	875	955
40								(850)	945	1050
45								(895)	1010	1130
50								(935)	(1060)	1210
60								(970)	(1110)	1280
65									(1160)	1340
70									(1200)	1390
75									(1230)	1440

Примечания
 1 Значения в скобках даны с меньшей точностью.
 2 При измерении шаровыми измерительными разрядниками постоянного напряжения обеих полярностей погрешность данных, приведенных в таблице, не превышает 5 % для расстояний между шарами до 0,4 D.

Учебное издание

ЗАГОРЦЕВ Вадим Александрович
ПОДОЛЬСКАЯ Валерия Николаевна

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ
И ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ
Пособие

Редактор Я. В. Войтеховская
Технический редактор В. Н. Кучерова

Подписано в печать 10.11.2020 г. Формат 60×84 ¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,71. Тираж 100 экз.
Зак. № Изд. № 49.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя
и распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014.
№ 2/104 от 01.04.2014.
№ 3/1583 от 14.11.2017.
Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель.