

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

В.Ф. Важов, А.В. Мытников

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ
ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

*Рекомендовано в качестве практикума
Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета*

Издательство
Томского политехнического университета
2022

УДК 621.311:537(075.8)

ББК 31.27:22.379я73

В12

Важов В.Ф.

В12 Электрофизические процессы в диэлектрических средах при воздействии сильных электрических полей электроэнергетических систем: практикум / В.Ф. Важов, А.В. Мытников; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета. – 102 с.

В практикуме описаны основные процессы, возникающие в диэлектрических средах при эксплуатации высоковольтного электрооборудования электроэнергетических систем. Рассматриваются основные виды ионизационных процессов, приводящих к деградации свойств электроизоляционных материалов. Излагаются фундаментальные законы пробоя диэлектрических сред.

Предназначен для студентов бакалавриата и магистратуры, обучающихся по направлению «Электроэнергетика и электротехника».

УДК 621.311:537(075.8)

ББК 31.27:22.379я73

Рецензенты

Доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой физической электроники ТУСУРа
П.Е. Троян

Кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры физики ТУСУРа,
старший научный сотрудник лаборатории
высокочастотной электроники ИСЭ СО РАН
Ю.А. Андреев

© ФГАОУ ВО НИ ТПУ, 2022

© Важов В.Ф., Мытников А.В., 2022

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2022

ПРЕДИСЛОВИЕ

Практикум состоит из восьми разделов, охватывающих описание ряда основных электрофизических процессов, происходящих в диэлектрических средах при воздействии на них сильных электрических полей и имеющих существенное значение в практической работе специалистов указанного профиля: процессы на кривой Пашена, эффект поляризации в жидких диэлектриках, формирование канала пробоя по модели Фока–Семенова, процессы зажигания и развития коронного разряда и эффект внедрения канала пробоя в твердую среду на границе «жидкость – твердая среда» (открытие А.А. Воробьева).

Материал представлен с учетом последних достижений в рассматриваемых областях, а содержание соответствует утвержденным стандартам и программе подготовки бакалавров и магистров по направлениям 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника», получающих специализацию в области высоковольтной энергетики.

Каждый раздел содержит последовательное изложение теоретического материала конкретного раздела курса и завершается экспериментальной частью, которая представляет собой лабораторную работу, выполняемую на соответствующей технологической установке. Для более углубленного изучения отдельных разделов курса в конце каждой главы представлен список литературы.

Такая компоновка материала, состоящая из теоретической части, которая представляет собой расширенный конспект лекции по соответствующей теме и исследовательской части, предназначенной для приобретения студентом необходимых навыков инженерной практики, расчетов, измерений и анализа основных параметров и характеристик изучаемого технологического процесса, по мнению авторов, является удачным дидактическим ходом. Подобный подход к структуре изучаемого курса призван повысить эффективность учебного процесса и, как результат, качество подготовки специалистов.

ВВЕДЕНИЕ

Высоковольтная энергетика – область науки и индустрии, возникшая на стыке электрофизики и техники высоких напряжений. Имеет достаточно многогранный спектр применений во многих областях электроэнергетики и электротехники. Важное место техника высоких напряжений занимает в развитии энергетики и промышленности России XXI века для совершенствования существующих и разработки новых технологий различного профиля.

Знания о характере и путях развития электрофизических процессов в диэлектрических средах в сильных электрических полях, создаваемых рабочими напряжениями электроустановок и аппаратов, имеют важное прикладное значение для обеспечения надежной работы всех составных частей любой электроэнергетической системы, и прежде всего высоковольтной изоляции всей гаммы силового оборудования.

Сильные электрические поля используются в электрофизических установках для решения задач мощной импульсной энергетики: в ускорителях пучков заряженных частиц, мощных лазерах, установках управляемого термоядерного синтеза. Высокое напряжение применяется в технологических процессах, таких как электросепарация, электрофильтрация, электроокраска, магнитоимпульсная обработка, электрогидравлическая штамповка, плазмохимия, получение озона. Особая роль принадлежит такой быстроразвивающейся области нанотехнологии, как синтез наноструктурных материалов с новыми свойствами.

Создание нового раздела инженерной науки – электроимпульсной технологии бурения и резания твердых пород – стало возможным после открытия электрофизического эффекта, совершенного в научной школе профессора А.А. Воробьева, создавшего новое направление в инженерной электрофизике.

В связи этим знание закономерностей электрофизических процессов, происходящих в сильных электрических полях, приобретает все возрастающую значимость.

Глава 1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА ПАШЕНА

1.1. Теория процесса

Если к электродам, между которыми находится диэлектрик, приложить возрастающее во времени напряжение, то при некотором его значении в промежутке появляется канал высокой проводимости или весь промежуток становится проводящим (разряд в газе при низком давлении). Это явление получило название пробоя, а напряжение источника, при котором наблюдается явление пробоя, – пробивного ($U_{пр}$).

Пробой – крайне опасное явление, возникающее при эксплуатации электрооборудования. Чтобы разработать надежную изоляцию – основного компонента любого электрооборудования – надо знать закономерности пробоя различных диэлектриков в условиях эксплуатации. Широкие исследования ведутся в области газового разряда, так как процессы, происходящие при разряде в газах, используются в различных разрядниках, в газоразрядных трубках, электрофилтрах, в устройствах по получению и использованию плазмы, в устройствах по осуществлению термоядерного синтеза и т. д.

При приложении к промежутку между электродами электрического поля и в газе возникают процессы ионизации, в результате которых в промежутке образуются электроны и положительные ионы, движущиеся соответственно к аноду и катоду и создающие электрический ток между электродами. Но прохождение этого тока прекращается, как только все заряды нейтрализуются на электродах. Этот процесс еще нельзя назвать пробоем, так как он не стационарный. Чтобы он был непрерывным, необходим источник, постоянно поставляющий электроны для следующих актов ионизации, т. е. внешний ионизатор. Внешним ионизатором могут служить космическое излучение, излучение при радиоактивном распаде, источник коротковолнового излучения (вакуумный ультрафиолет, γ -лучи) и др.

Разряд, существующий при поддержке внешнего ионизатора, вызывающего возникновение свободных электронов, называется самостоятельным.

Критерием пробоя промежутка является выполнение условия самостоятельности разряда. Самостоятельным называется разряд, в котором появление заряженных частиц, необходимых для поддержания разряда, обусловлено ионизационными процессами, происходящи-

ми в самом газовом промежутке и на поверхности катода без облучения его посторонним источником излучения.

Процесс ионизации газа электронами и положительными ионами характеризуется **тремя коэффициентами**, которые ввел в своей теории газового разряда английский физик Дж. Таунсенд:

1. α – коэффициент ударной ионизации электронами, т. е. число свободных электронов, образуемых одним электроном на 1 см пути от катода к аноду при столкновении его с нейтральными атомами и молекулами.

Выражение для параметра α может быть получено при следующих допущениях:

а) электрон способен осуществить ионизационный процесс только тогда, когда его кинетическая энергия W_k равна или превышает энергию ионизации $W_{и}$, т. е. для появления пары носителей зарядов необходимо выполнение условия:

$$\left(\frac{m \cdot V^2}{2} \geq W_{и} \right), \quad (1.1)$$

где m – масса электрона; V – скорость электрона;

б) электрон набирает энергию только на длине свободного пробега λ и полностью ее теряет при соударениях с молекулами и атомами;

в) электрон движется вдоль силовых линий электрического поля.

Число ионизирующих столкновений на единице длины определяется как

$$\alpha = A \cdot p \cdot e^{-Bp/E}, \quad (1.2)$$

где $A \cdot p = 1/\lambda$; A – постоянная, зависящая от вида газа и от величины температуры, принятой неизменной; E – напряженность электрического поля; p – давление; $B = A \cdot U_{и}$ ($U_{и}$ – потенциал ионизации).

Обычно зависимость (1.2) записывается как

$$\frac{\alpha}{p} = A \cdot e^{-\frac{B}{E/p}} \text{ или } \frac{\alpha}{p} = f(E/p). \quad (1.3)$$

Графически зависимость (1.3) для воздуха представлена на рис. 1.1 и свидетельствует о том, что при неизменном отношении E/p коэффициент ударной ионизации электронами α прямо пропорционален давлению газа.

2. β – коэффициент ударной ионизации положительными ионами, т. е. число свободных электронов, образуемых одним положительным ионом при столкновении с нейтральными частицами газа на 1 см пути от анода к катоду.

3. γ – коэффициент поверхностной ионизации, т. е. число электронов, вылетевших с 1 см^2 поверхности катода в результате бомбардировки ее положительными ионами.

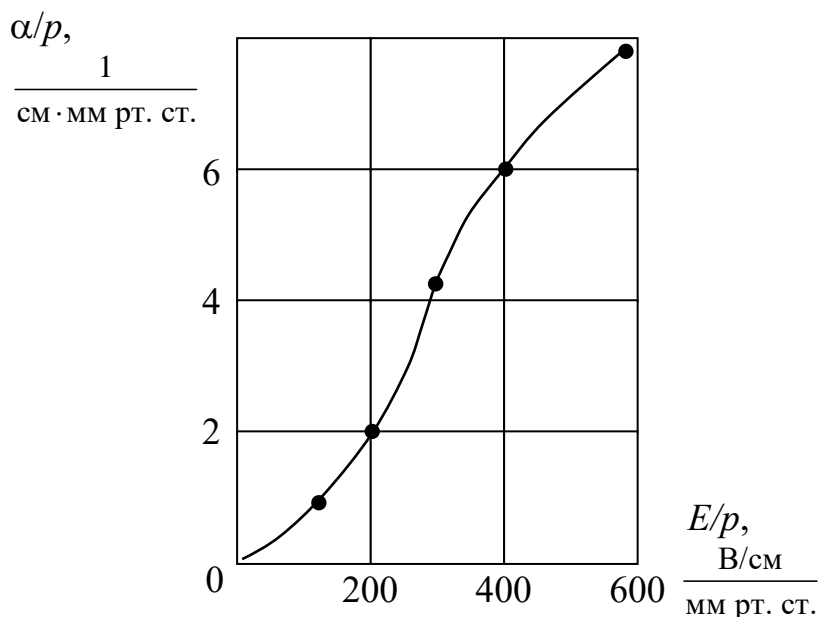


Рис. 1.1. Зависимость $\alpha / p = f(E / p)$ для воздуха

Электроны, образующиеся в результате ионизации газа, движутся к аноду в виде локального сгустка (существующего в виде своеобразного компактного облачка), именуемого **лавиной электронов**. По мере продвижения к аноду число электронов в лавине растет по экспоненциальному закону, достигая предельного значения. Для однородного поля количество электронов и плотность электронного тока у анода определяется выражениями:

$$\begin{aligned} n_a &= n_0 \cdot e^{\alpha \cdot S}, \\ j_a &= j_0 \cdot e^{\alpha \cdot S}, \end{aligned} \quad (1.4)$$

где S – расстояние между электродами; j_0 – ток, вызываемый внешним ионизатором; n_0 – число электронов в межэлектродном промежутке, появившихся вследствие действия внешнего ионизатора.

После прекращения действия внешнего ионизатора могут иметь место следующие 2 случая:

1. Объемная (β) и поверхностная (γ) ионизации положительными ионами недостаточны для поддержания разряда. Число электронов в последующей лавине меньше, чем в предыдущей. Разрядный ток уменьшается и разряд прекращается.

2. Число электронов в каждой последующей лавине равно числу электронов в предыдущей лавине. Ток постоянный, разряд продолжается.

Для выполнения случая 2 необходимо обеспечить условие, которое можно записать выражением

$$\gamma(e^{e \cdot S} - 1) \geq 1. \quad (1.5)$$

Это соотношение получило название условия самостоятельности разряда. Следовательно, в случае самостоятельного разряда начальный электрон, появившийся у поверхности катода, должен обусловить настолько интенсивную ударную ионизацию, чтобы образовавшийся в результате ее положительные ионы вырвали бы с катода также один электрон, который смог бы начать следующий процесс ионизации. При условии $\gamma(e^{e \cdot S} - 1) < 1$ разряд будет *затухающим несамостоятельным*. При условии $\gamma(e^{e \cdot S} - 1) = 1$ – *стационарным самостоятельным*. При условии $\gamma(e^{e \cdot S} - 1) > 1$ разряд будет *усиливающимся*.

Из условия самостоятельности разряда можно определить пробивное напряжение $U_{пр}$ газового промежутка. Деление соотношения (1.5) на коэффициент γ , перенесение единицы в правую часть и логарифмирование позволяет записать:

$$\alpha \cdot S = \ln(1 + 1/\gamma). \quad (1.6)$$

Решая совместно выражение (1.6) и уравнение (1.1), получим:

$$A \cdot p \cdot S \cdot e^{B \cdot p/E} = \ln(1 + 1/\gamma). \quad (1.7)$$

Подставив в выражение (1.7) отношение для пробивной напряженности $E_{пр} = \frac{U_{пр}}{S}$ и произведя логарифмирование, получим

$$\frac{B \cdot p \cdot S}{U_{пр}} = \ln \left(\frac{A \cdot p \cdot S}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right). \quad (1.8)$$

Отсюда

$$U_{пр} = \frac{B \cdot p \cdot S}{\ln \left[\frac{A \cdot p \cdot S}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right]}. \quad (1.9)$$

Из (1.9) следует, что разрядное напряжение в однородном поле является функцией произведения давления газа P и расстояния между электродами S :

$$U_{\text{пр}} = f(p \cdot S). \quad (1.10)$$

Это означает, что при неизменной температуре, при условии равенства произведения pS при различных значениях P и S пробивные напряжения будут иметь одинаковые значения. Такую закономерность экспериментально установил французский ученый Ф. Пашен еще до создания теории газового разряд Дж. Таунсендом. Функциональная зависимость (1.10) является законом Пашена, который, как следствие, вытекает из теории Таунсенда. Закон Пашена представлен графически на рис. 1.2. График носит название кривой Пашена, которая состоит из двух частей, или ветвей, с ярко выраженным минимумом.

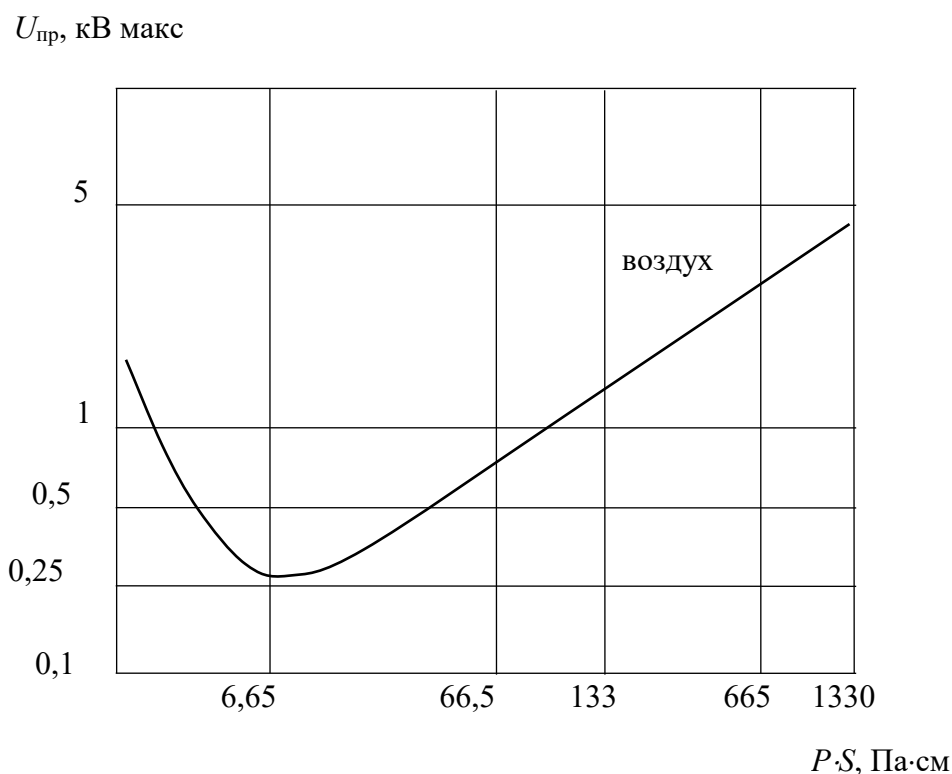


Рис. 1.2. Зависимость разрядного напряжения газовой среды от произведения $p \cdot S$

Характерной особенностью кривой на графике является наличие ярко выраженного минимума пробивного напряжения. Наличие правой и левой ветвей в кривых Пашена можно качественно объяснить следующим образом.

При постоянном межэлектродном расстоянии ($S = \text{const}$) повышение разрядного напряжения вправо от U_{\min} объясняется тем, что с увеличением давления P уменьшается длина свободного пробега электронов λ . Вследствие этого уменьшается кинетическая энергия, необходимая для акта ионизации. Чтобы увеличить кинетическую энергию до необходимого уровня, надо увеличить напряженность поля E , то есть поднять напряжение U . Увеличение разрядного напряжения $U_{\text{пр}}$ влево от U_{\min} при уменьшении давления связано с тем, что уменьшается число столкновений электронов с молекулами вследствие уменьшения концентрации молекул. Для увеличения числа столкновений, которые завершатся ионизацией, то есть увеличения вероятности ионизации, необходимо увеличить напряжение (U).

Если давление неизменно ($P = \text{const}$), то повышение $U_{\text{пр}}$ вправо от минимума можно объяснить тем, что при увеличении S уменьшается напряженность поля E . Это приводит к уменьшению вероятности ионизации. Чтобы поддержать ионизационные процессы на должном уровне, необходимо увеличить напряжение.

Повышение напряжения на левой части кривой при уменьшении S объясняется тем, что в этом случае длина межэлектродного промежутка становится соизмеримой с длиной свободного пробега электрона и меньше её, что уменьшает вероятность ионизации и кинетическую энергию, необходимую для ионизации.

Приведенная выше функциональная зависимость пробивного напряжения газового промежутка от давления и межэлектродного расстояния рассматривалась при неизменной температуре ($T = \text{const}$). Реально же изменение температуры вызывает изменение давления, следовательно, это явление необходимо учитывать.

Для оценки влияния температуры введем в уравнение (1.10):

$$1/\lambda = A \cdot T_0 \cdot \frac{P}{T} \quad \text{и} \quad B_1 = B \frac{T_0}{T}, \quad (1.11)$$

где $T_0 = 293 \text{ }^\circ\text{K}$ ($20 \text{ }^\circ\text{C}$).

Тогда

$$U_{\text{пр}} = \frac{B \cdot T_0 \cdot \left(\frac{p \cdot S}{T} \right)}{\ln \left[\frac{A \cdot T_0 \cdot \left(\frac{p \cdot S}{T} \right)}{\ln(1 + 1/\gamma)} \right]}. \quad (1.12)$$

Или в общем виде:

$$U_{\text{пр}} = f\left(\frac{p \cdot S}{T}\right) = f(\delta \cdot S), \quad (1.13)$$

где $\delta = 0,386 \cdot \frac{p}{T}$.

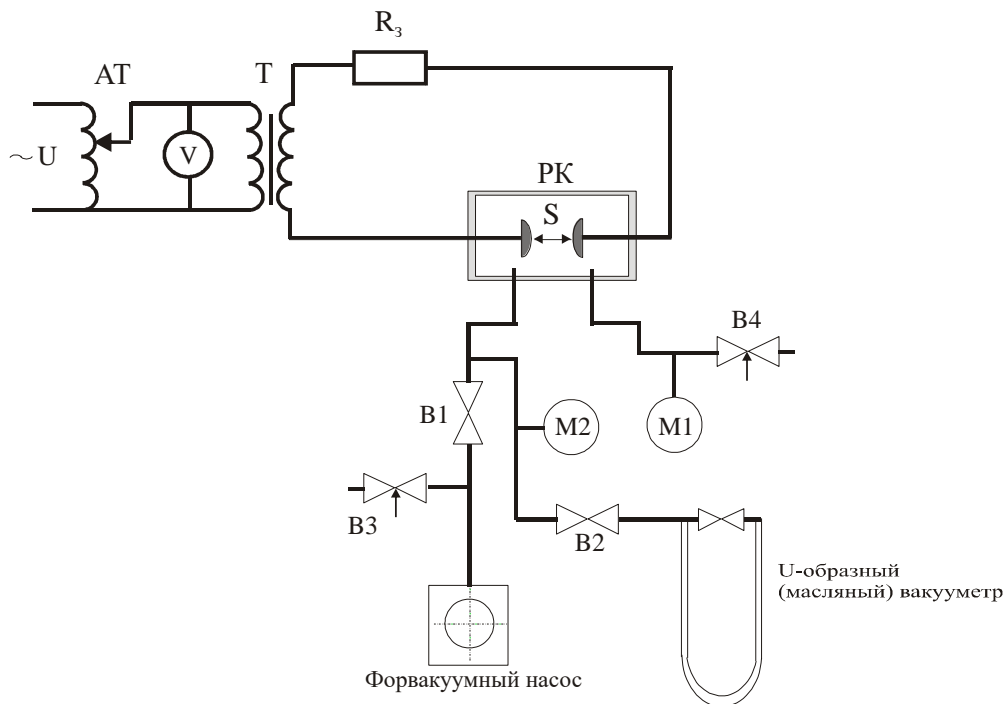
Закон Пашена гласит: **в однородном электрическом поле пробивное напряжение является функцией произведения расстояния между электродами и относительной плотности газа.**

1.2. Экспериментальная часть

Цель: получение зависимости пробивного напряжения газа от расстояния между электродами в разрядной камере с различным давлением путем экспериментальных измерений.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой (рис. 1.3) и правилами ТБ при выполнении работы.



*Рис. 1.3. Схема экспериментальной установки:
 R_3 – защитное сопротивление; ПК – разрядная камера;
M1 – манометрический преобразователь механического типа (ЭКВ-IV);
M2 – термометрический манометрический преобразователь (ВТ-2А);
B1, B2, B3, B4 – вентили*

В качестве источника высокого переменного напряжения используется трансформатор НОМ-10. Для изменения давления в разрядной камере используется форвакуумный насос типа ВН-461М. Для измерения давления в разрядной камере используются 2 вакуумметра – механический типа ЭКВ-IV (М1) и термопарный ВТ-2А (М2). Термопарный вакуумметр ВТ-2А предназначен для измерения малых давлений воздуха и состоит из термопарной манометрической лампы и измерительного блока, включающего схему для питания нагревателя термопары и стрелочный прибор, измеряющий ЭДС термопары и ток нагревателя. Шкала стрелочного прибора отградуирована в милливольтках. Используя градуировочную кривую термопарной лампы (рис. 4), определяют значение давления в мм рт. ст.

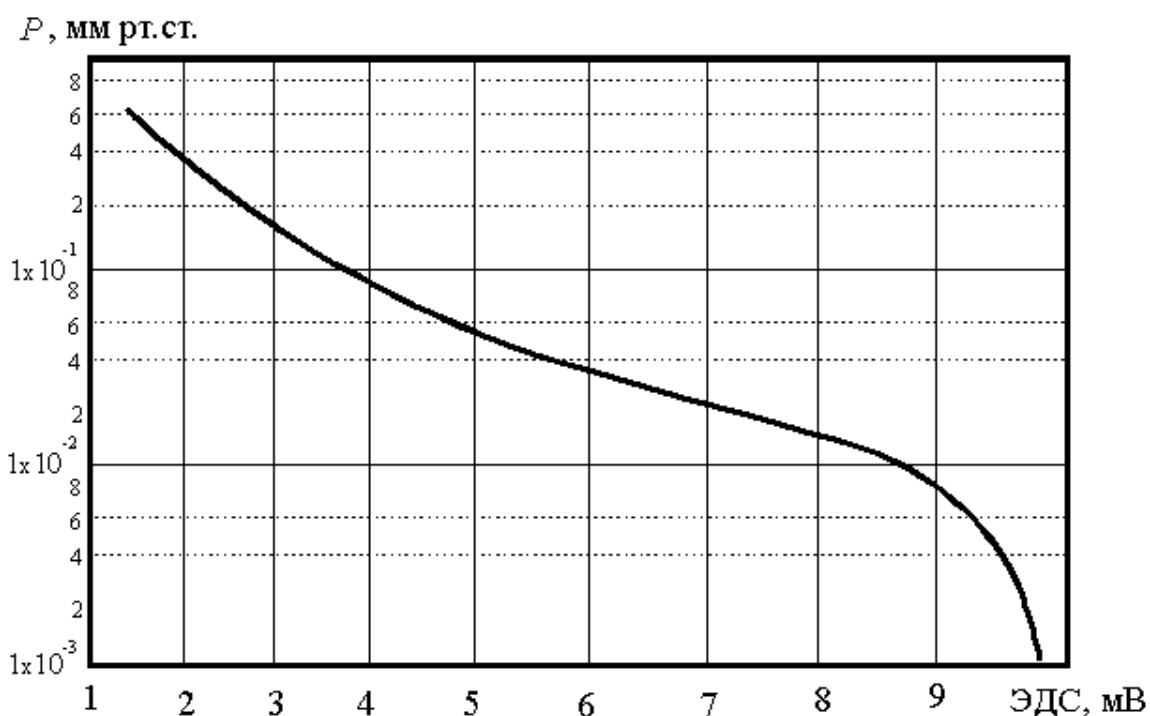


Рис. 1.4. Градуировочная кривая вакуумметра в диапазоне $p = 2 \cdot 10^{-1} \dots 2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Принцип действия прибора основан на изменении ЭДС термопары в зависимости от температуры нагревателя. При постоянном токе нагревателя ЭДС термопары будет определяться давлением окружающего газа. При понижении давления теплопроводность газа уменьшается, температура нагревателя при этом увеличивается и, как результат, увеличивается и ЭДС термопары. При измерении давлений в диапазоне $p = 2 \cdot 10^{-1} \dots 2 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. ток нагревателя термопары регулируется в пределах 95...150 мА. Ток устанавливается при положении переключателя

теля «Ток накала» рукояткой «Регулировка тока накала». При измерении ЭДС термопары переключатель устанавливается в положение «Измерение».

Для определения давления в мм рт. ст. по показаниям механического вакуумметра используется формула:

$$P = 760 \cdot (1 - P'), \text{ мм рт. ст.}, \quad (1.14)$$

где P' – показания механического вакуумметра.

Принцип действия U-образного масляного вакуумметра основан на уравнивании измеряемого давления (или разницы давлений, как в нашем случае) давлением столба жидкости. Об измеряемом давлении судят по высоте уравнивающего столба жидкости.

Для определения давления в мм рт. ст. по показаниям U-образного масляного вакуумметра используется формула

$$P = P_1 + \rho_m \cdot g \cdot \Delta h \cdot 0,75 \cdot 10^{-2}, \text{ мм рт. ст.},$$

где P_1 – значение давления относительно которого ведется расчет; $\rho_m = 860 \text{ кг/м}^3$ – плотность масла в вакуумметре; $g = 9,8 \text{ м/с}^2$; Δh – разница столбов масла вакуумметра, м.

2. Определить разрядные напряжения при различных давлениях в разрядной камере с промежутком $S = 1 \text{ см}$.

2.1. Первоначальное положение всех вентилях (В1, В2, В3, В4) – закрыты.

2.2. Кнопкой «Пуск» на передней панели установки запускаем форвакуумных насос.

2.3. Открывая вентиль В1, начинаем откачивать воздух из разрядной камеры. После того как давление в камере станет минимальным (отслеживается по стрелочному прибору, измеряющему ЭДС термопары), открываем вентиль В2 для подключения к вакуумной системе U-образного масляного вакуумметра.

2.4. После выравнивания давления в системе и установления его минимального значения производим измерение $U_{пр}$ в разрядной камере.

2.5. Уменьшая давление в камере (закрыв вентиль В1, приоткрывая вентиль В4), производим измерение $U_{пр}$. Измерение давления в разрядной камере в диапазоне $10^{-2} \dots 10^{-1}$ мм рт. ст. производится с помощью термодатного вакуумметра, в диапазоне $10^{-1} \dots 10^1$ мм рт. ст. – с помощью U-образного масляного вакуумметра, в диапазоне $10^1 \dots 10^2$ мм рт. ст. – с помощью механического вакуумметра.

2.6. Результаты измерений давления воздуха и соответствующие ему значения $U_{пр}$ заносятся в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Результаты экспериментального исследования закона Пашена

| | | Давление | | $P \cdot S$, мм рт. ст.·см | $U_{пр}$, кВ |
|-------------------------|---|----------|------------|--------------------------------|---------------|
| | | | мм рт. ст. | | |
| $S = \text{const}$, см | Термомпарный вакуумметр (ЭДС, мВ) | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |
| | | | | | |

Окончание табл. 1.1

| | | Давление | | $P \cdot S$, мм рт. ст.·см | $U_{пр}$, кВ | |
|-------------------------|---|----------|------------|--------------------------------|---------------|--|
| | | | мм рт. ст. | | | |
| $S = \text{const}$, см | Масляный вакуумметр (dH , см) | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | Механический вакуумметр (P , дел.) | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |

2.7. Определить разрядные напряжения при одном давлении для различных значений межэлектродных промежутков. Данные занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения пробивных напряжений при постоянном давлении

| | Расстояние S , см | $P \cdot S$, мм рт. ст.·см | $U_{пр}$, кВ |
|------------------|------------------------|--------------------------------|---------------|
| $U_{пр}$ = мм | | | |

| | | | |
|--|--|--|--|
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

2.8. Выключение установки производится следующим образом: Вентили В1, В2, В3, В4 выводятся в положение «Закрывается».

Приоткрывая вентиль В3, в момент начала поступления воздуха в систему, производим отключение форвакуумного насоса.

Задания по результатам исследования

1. По данным пункта 2.2 построить зависимости напряжения пробоя газа $U_{пр}$ от произведения давления на межэлектродное расстояние и пояснить их.

2. По данным пункта 2.3 построить зависимости напряжения пробоя газа $U_{пр}$ от произведения давления на межэлектродное расстояние и пояснить их.

3. Описать основные электрофизические процессы, протекающие на левой ветви кривой Пашена.

4. Описать электрофизические процессы, имеющие место на правой ветви кривой Пашена.

5. Привести выражение закона Пашена с учетом температуры окружающего воздуха и пояснить его физический смысл.

Контрольные вопросы

1. В каких областях современной индустрии применяется закон Пашена?

2. Что означает для газовой изоляции нахождение в точке минимума на кривой Пашена?

3. Какие пути увеличения электрической прочности газовой изоляции можно использовать в эксплуатации на основе кривой Пашена?

4. Что означает на практике «двигаться вверх по левой ветви кривой Пашена»?

5. Что означает на практике «двигаться вверх по правой ветви кривой Пашена»?

Отчет по экспериментальной части выполняется на листах белой бумаги формата А4 в строгом соответствии с СТО ТПУ.

~~Отчет должен также содержать развернутые ответы на контрольные вопросы.~~ На защите отчета необходимо быть готовыми строить ответы на основе как изученного теоретического материала, так и результатов, полученных лично подгруппой в ходе выполнения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Базелян Э.М. Искровой разряд в воздухе / Э.М. Базелян, И.М. Ражанский. – Новосибирск : Наука, 1988. – 164 с.
2. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин и др. ; под ред. И.М. Верещагина. – Москва : Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.
3. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – Москва : Наука, 1987. – 592 с.
4. Голант В.Е. Основы физики плазмы / В.Е. Голант, А.П. Жилинский, И.Е. Сахаров. – Москва : Атомиздат, 1977. – 384 с.

Глава 2

ВОЛЬТ-СЕКУНДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДЫ

2.1. Теория процесса

Вода и водные электролиты находят все более широкое применение как изолирующая и рабочая среда в высоковольтной импульсной технике, и поэтому выяснение природы их пробоя представляет большой практический интерес. Высоковольтные импульсные технологии, основанные на свойствах канала пробоя в жидкой диэлектрической среде, используются в различных областях современного производства. Магнитоимпульсная обработка материалов, электрогидравлическая штамповка, придание специальных форм и свойств конструкционным материалам – это далеко не полный перечень технологических применений канала электрического пробоя в жидких средах.

Многочисленные применения электровзрыва в воде обуславливают расширение исследований этого явления.

Широкое применение в народном хозяйстве разрядно-импульсных технологий на базе подводного электровзрыва стимулировало расширение фундаментальных и прикладных исследований в области электровзрывного преобразования энергии в конденсированных средах. Накоплен большой инженерный опыт по эксплуатации разрядно-импульсных устройств, по созданию высоковольтной импульсной техники, проектированию технологической оснастки и т. п. Применение электровзрыва в воде позволило автоматизировать и механизировать процессы очистки отливок от формовочных смесей и выбивки стержней, а также дало возможность значительно увеличить производительность труда в литейном производстве. Созданы безотходные технологии обработки металлов давлением (штамповка, калибровка), почти в 2 раза повышен срок службы мощных теплообменных аппаратов в химическом и энергетическом машиностроении. Обработка жидкого кристаллизующегося металла позволила увеличить его выход и повысить качество, а интенсификация добычи нефти – увеличить приток нефти из скважин. Параллельно разрабатываются электроимпульсные технологии дробления и бурения горных пород в воде, дробления и измельчения бетонных и железобетонных изделий с более эффективными параметрами:

- уменьшение удельных энергозатрат в 10–100 раз;
- высокая скорость разрушения;
- высокая рентабельность.

Области применения электроимпульсного способа:

1. Бурение скважин в горных породах.
2. Обогащение руд редкоземельных материалов без разрушения исходных зерен минералов.
3. Резание и обработка поверхности камня и искусственных материалов.
4. Разрушение негабаритов.
5. Утилизация отходов промышленности – резин, железобетона, радиоэлектронных изделий и др.
6. Очистка труб от отложений, накипи и др.
7. Разложение углеводородных жидкостей, например для получения сажи.
8. Получение сверхтвердых материалов (искусственные алмазы, боразон и др.).
9. Экстракция веществ из органических материалов (торф, растения).
10. Диспергирование материалов.
11. Обработка пищевых продуктов для извлечения полезных компонентов, например, из сои, морепродуктов, хвои и др.

При воздействии на жидкость электрического поля через нее протекает электрический ток с сопровождающими его эффектами, которые оказывают существенное влияние на зажигание и развитие разряда. Исследование прохождения тока в диэлектрических жидкостях позволяет определить основные параметры носителей зарядов и природу их возникновения. Проводимость жидких диэлектриков в большей степени подвержена влиянию степени очистки жидкости, материала и формы электродов, параметров приложенного напряжения и др.

Зависимость тока проводимости от напряженности электрического поля для очищенных жидкостей подобна таковой для газов и состоит **из трех характерных участков** (рис. 2.1):

- при $E < (1 \dots 10)$ кВ/см выполняется закон Ома;
- $(1 \dots 10) < E < (100 \dots 200)$ кВ/см – ток не зависит от напряженности E ;
- $E > (100 \dots 200)$ кВ/см – наблюдается быстрое (экспоненциальное) возрастание тока вплоть до пробоя.

На первом участке имеет место интенсивный рост носителей заряда за счет ионов, образованных в результате процессов диссоциации нейтрального компонента жидкой среды. Определенную роль на этом этапе также играет температура.

Второй участок является участком насыщения и характеризуется квазистационарным состоянием системы. При определенной концентрации загрязненных ионов обоих знаков происходит интенсивная

нейтрализация носителей зарядов в объеме и на электродах и устанавливается квазистационарное состояние.

Третий участок представляет собой крутой, практически лавинообразный рост тока через диэлектрик. Интенсивное нарастание тока объясняется тремя процессами:

- 1) диссоциация молекул примесей и жидкости под действием сильного поля;
- 2) эмиссия электронов с катода;
- 3) ударная ионизация в объеме жидкости.

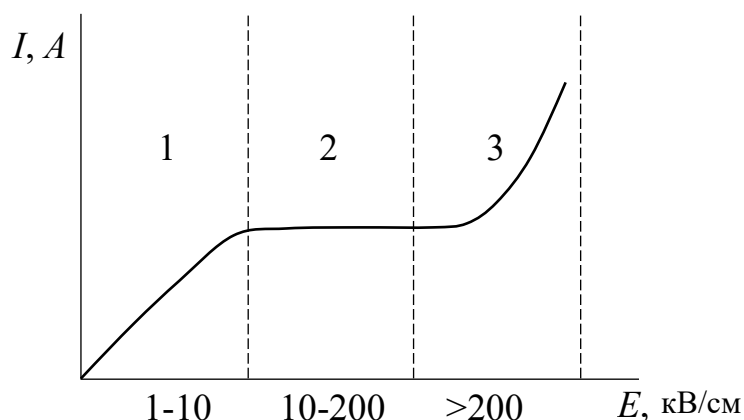


Рис. 2.1. Зависимость изменения тока в жидкости от напряженности электрического поля

Три участка вольт-амперной характеристики, приведенной на рис. 2.1, соответствуют следующим фундаментальным процессам:

- на первом участке выполняется закон Ома;
- на втором участке происходит нейтрализация носителей зарядов;
- на третьем участке имеют место диссоциация, эмиссия с катода электронов и ударная ионизация.

Ток проводимости в воде можно разделить на 3 составляющие:

$$\gamma = \gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3, \quad (2.1)$$

где γ_1 – удельная проводимость, связанная с движением ионов растворенного вещества (примесей); γ_2 – собственная удельная проводимость воды, обусловленная движением ионов H_3O^+ (протонная проводимость) и OH^- ; γ_3 – электронная составляющая проводимости, создаваемая эмиссией и ионизацией.

Каждая из этих составляющих сложным образом зависит от напряженности E , температуры T и времени приложения напряжения [2].

Механизм формирования импульсного теплового пробоя в жидкостях (в воде), обладающих существенной начальной проводимостью ($\gamma \sim (10^{-4} \dots 10^{-2}) \text{ Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$ – техническая вода), можно представить каче-

ственно следующим образом. На первой стадии процесса, после приложения электрического поля, при нагреве жидкости ионными токами происходит перераспределение температурного поля вследствие развития перегретой неустойчивости. Затем наступает взрывное испарение жидкости, где и начинается развиваться разряд.

Перед лидером прорастают 3...6 тонких слабо светящихся нитей – первичные каналы – на длину 3...6 мм. Один из каналов затем преобразуется в лидер. Остальные прекращают развитие и гаснут. Диаметр первичных каналов 1...5 мкм.

На второй стадии диаметр канала увеличивается до 50...100 мкм. Ток возрастает на 3–4 порядка, и происходит яркая вспышка канала. Происходит трансформация первичного канала в лидер. Удельная проводимость вещества лидерного канала составляет $20 \text{ Ом}^{-1}\cdot\text{см}^{-1}$, то есть по существу происходит вынос потенциала высоковольтного электрода вглубь промежутка.

Следующий этап – с головки образованного канала снова развиваются первичные каналы (3–6 штук). И комплексный процесс повторяется. Такое толчкообразное развитие происходит до тех пор, пока лидерный канал не достигнет противоположного электрода. В момент касания лидерным каналом противоположного электрода начинается качественно новая

Третья стадия представляет собой главный разряд, который характеризуется высокой интенсивностью свечения, быстрым изменением (увеличением) тока в цепи разряда, срезом приложенного к электродам напряжения и установлением дуги.

Однако тот факт, что при равной длительности воздействия напряжения уровень электрической прочности жидкостей различен при воздействии на них импульсов разной формы (прямоугольной, косоугольной, колоколообразной) с разной степенью крутизны импульса, показывает, что длительность является важным, но не единственным параметром импульса, определяющим электрическую прочность жидкости.

Установлено, что пробивное напряжение существенно зависит от крутизны фронта косоугольных импульсов напряжения ($A = U/t_\phi$). Уменьшение крутизны фронта импульса напряжения ведет к уменьшению напряжения зажигания разряда U_3 и эффективной скорости развития лидера V_{cp} . При этом U_3 и V_{cp} не зависят от межэлектродного расстояния. Пробивное напряжение можно определить по выражению:

$$U_{пр} = U_3(A) + A \cdot \frac{d}{V_{cp}(A)}, \text{ кВ}, \quad (2.2)$$

где d – межэлектродное расстояние, см; A – крутизна фронта импульса напряжения, кВ/мкс; V_{cp} – скорость развития лидера, см/с.

Из анализа вольт-секундных характеристик (ВСХ) следует, что скорость возрастания электрической прочности жидких диэлектриков и воды при временах воздействия импульсного напряжения единицы микросекунд и менее выше, чем у твердых диэлектриков. В результате происходит пересечение ВСХ твердых и жидких диэлектриков (рис. 2.2), то есть создаются условия, при которых электрическая прочность жидких диэлектриков становится выше электрической прочности твердых диэлектриков. Если это утверждение справедливо, то при расположении электродов (например, стержень-стержень) на одной поверхности твердого диэлектрика в жидкой среде должен произойти пробой твердого диэлектрика. На основе этого эффекта в Томском политехническом институте на кафедре техники высоких напряжений были разработаны электроимпульсные технологии разрушения, бурения, дробления, очистки и т. д. твердых тел, как искусственного происхождения, так и горных пород.

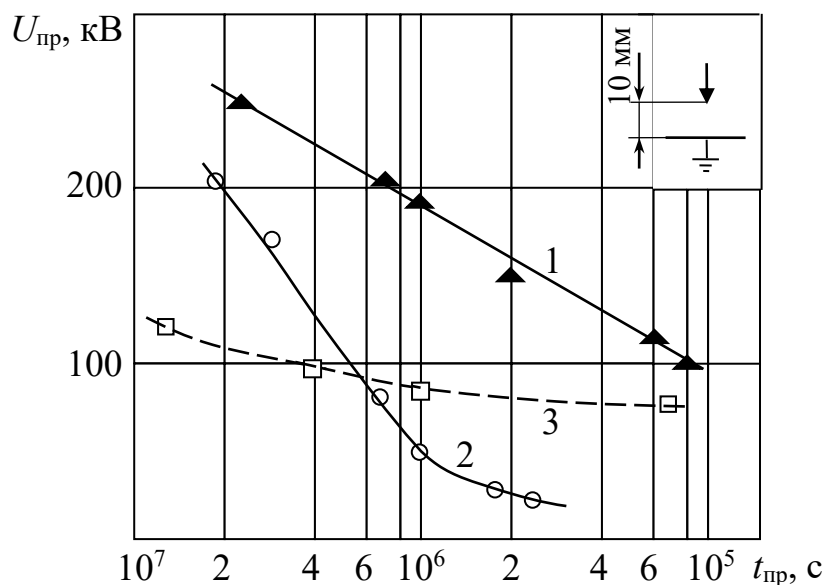


Рис. 2.2. Вольт-секундные характеристики пробоя диэлектриков
1 – трансформаторное масло; 2 – вода; 3 – высоковольтный фарфор

Подробное изложение данного эффекта приведено в главе 8 настоящего издания.

2.2. Экспериментальная часть

Цель: исследование зависимости электрической прочности воды от времени воздействия напряжения.

Для получения ВСХ используется электродная система «острие-плоскость». Острие – латунный стрежень длиной 300 мм и диаметром 8 мм, сточен на конус с радиусом кривизны 1 мм. Плоскость представляет собой шлифованную пластину, изготовленную из нержавеющей стали диаметром 110 мм. Расстояние между электродами меняется с шагом 5 мм от 5 до 150 мм. Ячейка помещается в полиэтиленовый бак, расположенный на изоляторах типа ОШ-10-200, размерами $600 \times 600 \times 600$ мм³ с толщиной стенок 20 мм и толщиной дна 30 мм. Ввод высокого напряжения и заземление выполнено изоляционными кабелями.

Для получения импульсов высокого напряжения в работе используется генератор импульсных напряжений, собранный по схеме Аркадьева–Маркса. Данный генератор рассчитан на номинальное напряжение 1000 кВ и имеет емкость в разряде $C_{\text{ГИН}} = 0,01$ мкФ. Конструкция генератора лестничного типа. Принципиальная электрическая схема ГИН 1000/0,01 приведена на рис. 2.3.

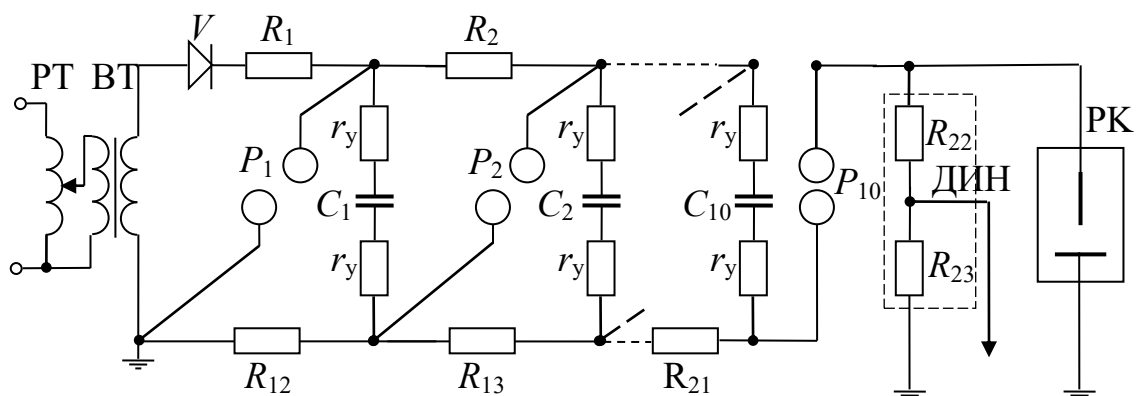


Рис. 2.3. Принципиальная схема ГИН 1000/0,01:

РТ – регулировочный трансформатор; *ВТ* – высоковольтный трансформатор;
V – выпрямитель; *R*₁ – защитное сопротивление; *R*₂–*R*₂₁ – зарядные сопротивления;
*r*_у – успокоительное сопротивление; *C*₁–*C*₁₀ – высоковольтные конденсаторы;
*P*₁–*P*₁₀ – искровые промежутки; ДИН (*R*₂₂, *R*₂₃) – делитель напряжения;
ПК – разрядная камера

В схеме предусмотрена односторонняя зарядка конденсаторов от зарядного устройства, состоящего из регулировочного трансформатора РТ, высоковольтного трансформатора ВТ и выпрямителя V на рабочее напряжение 100 кВ. Для защиты выпрямителя и трансформатора предусмотрен защитный резистор R1.

Для регистрации осциллограмм напряжения $u(t)$ используется двухлучевой запоминающий электронный осциллограф. Импульсы напряжения, подаваемые на вход осциллографа, преобразуются до приемлемого уровня с помощью омического делителя напряжения ДИН сопротивлением 13 кОм (рис. 4).

Измерение удельного сопротивления (ρ) воды производится в специальной ячейке с помощью реохордного моста Р38. По полученному значению сопротивления производится пересчет удельного сопротивления по формуле

$$\rho = R/1,7, \quad (2.3)$$

где R – сопротивление воды, измеренное мостом типа Р38, Ом.

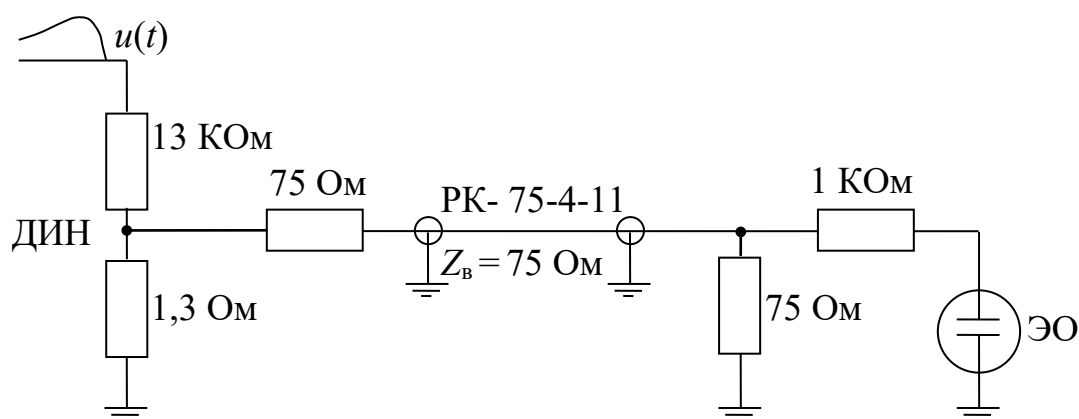


Рис. 2.4. Схема регистрации напряжения

В общем случае при воздействии на объект импульсов высокого напряжения от ГИН возможны три варианта пробоя:

- пробой на фронте импульса;
- пробой на максимуме напряжения;
- пробой на спадающей части импульса.

Для определения параметров импульса холостого хода ГИН (полного импульса), значения пробивного напряжения и параметров импульса, вызвавшего пробой объекта (срезанного импульса), использовалась методика, соответствующая общеизвестным стандартам Международной электротехнической комиссии [5].

Суть методики иллюстрируется рис. 2.5, где приведены стилизованные осциллограммы этих импульсов $U_{xx}(t)$, $U(t)$.

Точками и символами на них обозначены определяемые параметры и соответствующие им интервалы времени. В соответствии с [5] за значение пробивного (разрядного) напряжения $U_{пр}$ срезанного импульса принимается:

- максимальное значение напряжения импульса, если разряд произошел на максимуме напряжения ($U_{пр2} = U_m$) и затем – на спаде импульса ($U_{пр3}$);

- напряжение в момент пробоя (среза), если разряд произошел на фронте импульса ($U_{пр1}$).

За значение напряжения среза U_c принимается величина напряжения в момент времени t_c начала резкого изменения формы импульса за счет быстрого снижения напряжения.

При работе в воде электродная система является элементом, существенно влияющим на форму импульса напряжения. На снижение амплитуды и искажение формы импульса влияют следующие основные факторы: геометрия межэлектродного промежутка (форма и площадь электродов, межэлектродное расстояние), удельное сопротивление воды и параметры разрядного контура ГИН.

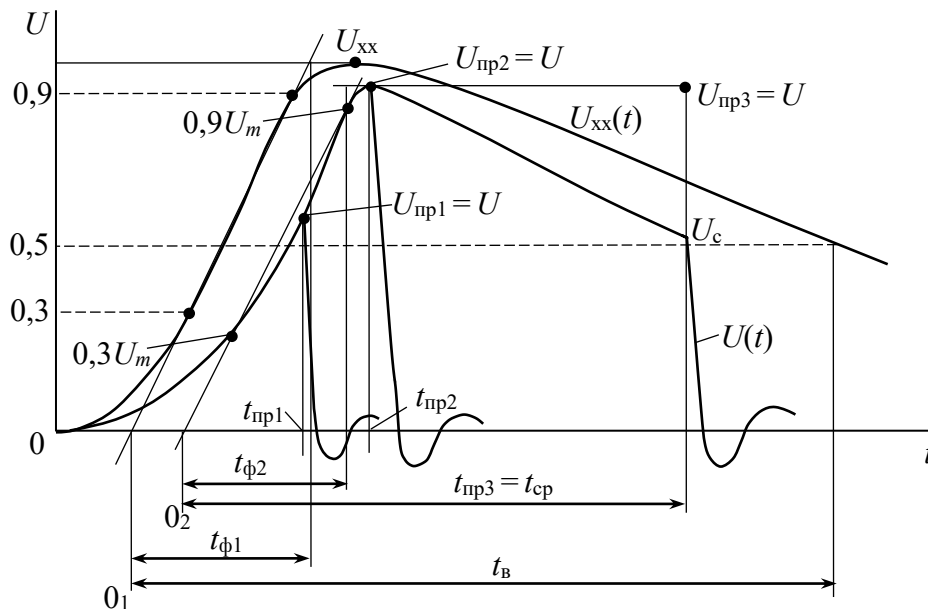


Рис. 2.5. Определение параметров импульса напряжения:

$U_{xx}(t)$ – импульс напряжения ГИН на холостом ходу;

$U(t)$ – импульс напряжения ГИН при пробое воды;

U_{xx} – максимальное значение импульса напряжения холостого хода;

U_m – максимальное значение импульса напряжения на образце;

$U_{пр1}, t_{пр1}$ – пробивное (разрядное) напряжение и время до пробоя, если разряд произошел на фронте импульса; $U_{пр2}, t_{пр2}$ – пробивное напряжение и время до пробоя, если разряд произошел на максимуме напряжения U_m ; $U_{пр3}, t_{пр3}$ – пробивное напряжение и время до пробоя, если разряд произошел на спаде импульса; U_c, t_c – значение напряжения и время среза при разряде на спаде импульса; $t_{ф1}, t_{ф2}$ – длительность фронта импульсов напряжения $U_{xx}(t)$ и $U(t)$ соответственно; $t_в$ – длительность импульса $U_{xx}(t)$

Разрядное сопротивление, в качестве которого выступает электродная система, укорачивает длительность импульса и играет важную роль в перераспределении напряжения между нагрузкой и источником.

Сопротивление электродной системы зависит от протекающего тока, который определяется плотностью тока на элементах электродной системы и площадью электродов и определяет потери энергии в предпробивной стадии:

$$I_{\text{нагр}} = jF, \quad (2.4)$$

где j – плотность тока; F – площадь электродов.

В свою очередь плотность тока j зависит от напряженности электрического поля на элементах электродной системы:

$$j = \gamma E, \quad (2.5)$$

где γ – удельная проводимость среды; E – напряженность электрического поля на электродной системе.

Напряженность электрического поля определяется геометрическими размерами, конфигурацией электродной системы и величиной приложенного к ней напряжения:

$$E = kU/S, \quad (2.6)$$

где U – напряжение на электродной системе; k – коэффициент неоднородности электрического поля, который определяется геометрическими размерами электродов; S – расстояние между электродами.

Подставляя (2.4) и (2.5) в (2.6), получим, что ток на нагрузке определяется следующим соотношением:

$$I_{\text{нагр}} = k\gamma UF/S. \quad (2.7)$$

Из проведенного анализа можно сделать вывод, что при неизменных условиях эксперимента (удельное сопротивление воды, параметры разрядного контура ГИН, межэлектродное расстояние) потери энергии будут зависеть как от формы электродов, которая определяет напряженность поля, так и от их площади. Кроме этого на величину снижения амплитуды напряжения влияет соотношение сопротивления нагрузки $R_{\text{нагр}}$ и волнового сопротивления ГИН $Z_{\text{гин}}$. Чем больше соотношение $R_{\text{нагр}}/Z_{\text{гин}}$, тем меньше происходит снижение амплитуды импульса напряжения.

Для уменьшения потерь энергии в предпробивной стадии можно изолировать электроды для уменьшения поверхности растекания, сократить время до пробоя за счет использования импульсов с малой длительностью фронта.

Порядок выполнения работы

1. Определить удельное сопротивление воды ρ при помощи реохордного моста Р38.
2. Получить ВСХ воды при положительной и отрицательной полярности импульса напряжения. Напряжение ГИН изменять от ~ 100 до ~ 400 кВ, ступенями, с шагом 50 кВ.
3. Определить амплитуду напряжения на холостом ходу для каждой ступени напряжения.
4. На одной из ступеней зафиксировать импульс напряжения в электронном виде, на носитель электронной информации (флеш-карта) или зарисовать на кальку импульс напряжения как на холостом ходу, так и на нагрузке.
5. Определить амплитуду U_m и параметры импульса напряжения (t_ϕ, t_c, U_c) для каждой ступени напряжения.
6. На каждой ступени напряжения произвести не менее 5 пробоев.
7. Результаты по пп. 1, 3, 5, 6 занести в табл. 2.1.
8. Зная длительность волны t_b без пробоя, при подключенной нагрузке, рассчитать сопротивление электродной системы Z_n : $t_b = 0,7 C_{\text{гин}} \cdot Z_n$.
9. Определить снижение амплитуды напряжения ΔU на нагрузке:

$$\Delta U^l = U_{xx} - U_m, \text{ кВ} \text{ и } \Delta U = \Delta U^l / U_{xx}, \%$$
10. Построить зависимости $U_m = f(t_{\text{пр}})$, $U_{\text{ср}} = f(t_c)$, $\Delta U^l = f(U_{xx})$, $\Delta U = f(U_{xx})$.
11. Провести анализ полученных результатов.
12. При анализе проведенных измерений и подготовке отчета уметь объяснить:
 - причину изменения формы импульса напряжения при воздействии на электродную систему в воде;
 - характер изменения снижения амплитуды напряжения.

Таблица 2.1

Результаты экспериментальных измерений

| № п/п | U _{xx} , кВ | U _m , кВ | U _c , кВ | t _φ , мкс | t _{пр} , мкс | ΔU, кВ | ΔU ^l , % | Примечание |
|-------|-------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------|---------------------|--|
| | | | | | | | | τ _{φ xx} , мкс; ρ, м·см; Z _n , Ом; S, мм; вид полярности |
| | | | | | | | | |

Контрольные вопросы

1. Общеизвестный факт: «вода – проводник электричества». Каким образом вода может выступать в качестве изолирующей среды?

2. В каких процессах и технологиях вода выступает в качестве высоковольтной изоляции?
3. Какие характерные участки содержит вольт-амперная характеристика воды?
4. Проведите аналогию развития канала пробоя в воде и трансформаторном масле. В чем принципиальное различие?
5. От каких факторов зависит проводимость жидких изоляционных материалов?
6. При каком условии вода может выступать в роли диэлектрика?
7. Какие процессы происходят на третьем участке вольт-амперной характеристики воды?
8. При каких условиях электрическая прочность воды превысит электрическую прочность твердых диэлектриков?
9. Как выглядит вольт-секундная характеристика воды?
10. Какие пути повышения импульсной электрической прочности изоляционных конструкций можете предложить, основываясь на результатах проделанных экспериментов?

Отчет по экспериментальной части выполняется на листах белой бумаги формата А4 в строгом соответствии с СТО ТПУ. На защите отчета необходимо быть готовыми строить ответы на основе как изученного теоретического материала, так и результатов, полученных лично подгруппой в ходе выполнения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В.Я. Ушаков. – Томск : Изд-во Томского университета, 1975. – 256 с.
2. Наугольных К.А. Электрические разряды в воде / К.А. Наугольных, Н.А. Рой. – Москва : Наука, 1971. – 155 с.
3. Лютикова М.Н. Электрофизические свойства смесей минерального масла и синтетической сложноэфирной диэлектрической жидкости / М.Н. Лютикова, С.М. Коробейников // Надежность и безопасность энергетики. – 2021. – № 14 (2). – С. 132–141.
4. Korobeynikov S.M. Mechanism of partial discharges in free helium bubbles in transformer oil / S.M. Korobeynikov, A.V. Ridel, D.I. Karpov, A.G. Ovsyannikov // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2019. – Vol. 26. – Issue 5. – P. 1605–1611.
5. Лютикова М.Н. Анализ образования капель воды в трансформаторном масле и их влияния на пробивную прочность жидкого диэлек-

трика / М.Н. Лютикова, С.М. Коробейников, А.В. Ридель // Промыш-
ленная энергетика. – 2020. – № 5. – С. 18–24.

Глава 3

ЭФФЕКТ ПОЛЯРНОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПРОБОЕ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ

3.1. Теория процесса

При пробое жидких диэлектриков на постоянном и импульсном напряжении эффект полярности связан с накоплением *объемного заряда* (ОЗ). Основные особенности накопления ОЗ заключаются в подвижности носителей зарядов и малом времени существования свободных электронов. Эмитированные катодом электроны захватываются молекулами жидкости и образуют малоподвижный отрицательный ОЗ.

При положительной полярности электрода с малым радиусом кривизны (электрода в форме острия) начальные электроны появляются в жидкости в результате электростатической ионизации (внутренний туннельный эффект). Необходимая для данного процесса напряженность поля (порядка 10^7 В/см) достигается вблизи микроострий на поверхности металлического анода, а на стадии развития разряда – вблизи головки положительного первичного канала.

Эта напряженность в объеме жидкости определяется в основном потенциалом электрода (или головки первичного канала) и их геометрическими размерами.

Кроме того, в конденсированных средах наблюдается интенсивная эмиссия положительных носителей заряда с анода (эмиссия дырок или экстракция электронов). Пороговая напряженность электрического поля эмиссии $\approx 10^6$ В/см. Кроме искажения поля эмиссия носителей заряда в жидкость может сопровождаться образованием кавитационных или газопаровых пузырьков, гидродинамических возмущений.

С острийного электрода развиваются многочисленные тонкие каналы, формирующие сферическое образование, которое хорошо воспроизводит картину силовых линий электрического поля. Последующая трансформация этой фигуры включает в себя удлинение каналов, их ветвление, зарождение вблизи поверхности электродов новых каналов и погасание большинства из них. Последние превращаются в цепочки микропузырьков, генерирующих слабые ударные волны. Через несколько микросекунд (2...5 мкс) от начала событий небольшое количество каналов (2...6 каналов) продолжают развиваться к противоположному электроду. Их радиус изменяется от единиц до десятков микрон.

В промежутке «положительное острие – плоскость» разряд в воде сопровождается регулярными вспышками канала с момента его зарож-

дения и до касания плоскости. Эффективная скорость развития канала разряда составляет $(1,5 \dots 3,2) \cdot 10^6$ см/с.

При отрицательной полярности острия канал разряда также регулярно вспыхивает. Эффективная скорость развития канала разряда составляет $\sim 6 \cdot 10^4$ см/с.

При касании лидером противоположного электрода во всех случаях происходит полный пробой.

Совокупность предпробивных явлений, их интенсивность и последовательность могут существенно меняться при изменении условий пробоя. Эффект полярности в количественном выражении также оказывается зависимым от этих условий. Различие в величинах пробивного напряжения при положительной и отрицательной полярности электрода с малым радиусом кривизны лежит в пределах единиц процентов.

Существенное влияние на различие $U_{пр}^+$ и $U_{пр}^-$ оказывают свойства жидкости. Эффект полярности наиболее ярко проявляется в жидкостях с высокой диэлектрической проницаемостью. При пробое жидкостей, содержащих электроотрицательные группы или молекулы, эффект полярности практически не проявляется.

Свойства жидкостей оказывают более существенное влияние на различие в величинах $U_{пр}^+$ и $U_{пр}^-$, чем свойства газов. Эффект полярности в жидких диэлектриках зависит от степени неоднородности поля: чем выше коэффициент неоднородности, тем в существенно более резкой форме выражен эффект полярности.

Из приведенных выше рассуждений следует, что влияние объемного заряда будет тем больше, чем выше диэлектрическая проницаемость жидкости (меньше работа выхода электронов) и эффект полярности наиболее ярко выражен в жидкости с высокой диэлектрической проницаемостью.

Эта закономерность видна на рис. 3.1 для трансформаторного масла ($\epsilon = 2,3$). Различие в величинах напряжений зажигания разряда составляет 10 %, для этилового спирта – 30 %, для очищенной воды – 250 %.

3.2. Экспериментальная часть

Цель: исследовать влияние полярности электродов в неоднородном поле на импульсное пробивное напряжение полярных и неполярных жидких диэлектриков при различных межэлектродных расстояниях.

Для достижения указанной цели необходимо:

1. Собрать электрическую схему испытательной установки (рис. 3.2).

2. Установить на электродной системе необходимое расстояние между электродами и поместить ее в разрядную камеру.

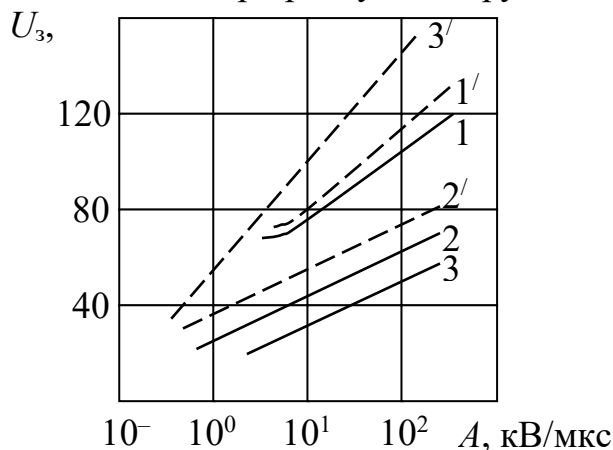


Рис. 3.1. Зависимость напряжения зажигания разряда $U_з$ от крутизны косоугольного импульса A :

1, 2, 3 – трансформаторное масло, этиловый спирт, очищенная вода при положительной полярности;
 1', 2', 3' – трансформаторное масло, этиловый спирт, очищенная вода при отрицательной полярности

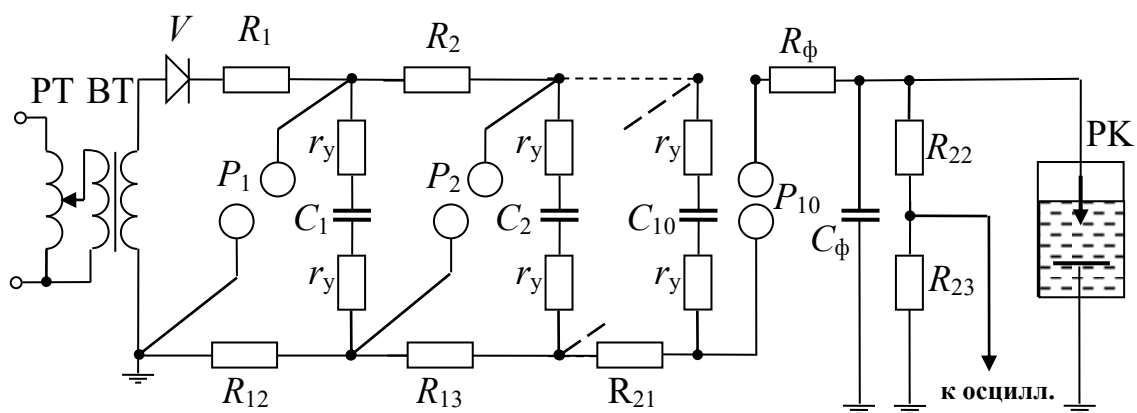


Рис. 3.2. Схема экспериментальной установки.

РТ – регулировочный трансформатор; ВТ – высоковольтный трансформатор;
 V – выпрямитель; R_1 – защитное сопротивление; R_2 – R_{21} – зарядные сопротивления;
 r_y – успокоительное сопротивление; C_1 – C_{10} – высоковольтные конденсаторы;
 P_1 – P_{10} – искровые промежутки; ДИИ (R_{22} , R_{23}) – делитель напряжения;
 РК – разрядная камера

3. Повторить измерения, описанные в п. 2, для 4–5 различных межэлектродных расстояний как для воды, так и для масла.

4. Изменяя напряжение генератора импульсов, добиться одинакового времени до пробоя (с учетом статистического разброса) при любом расстоянии между электродами как для воды, так и для масла.

5. Для каждого значения расстояния между электродами провести не менее 4–5 пробоев, фиксируя пробивное напряжение и время до пробоя. Результаты занести в табл. 3.1.

6. Сменить полярность импульса напряжения и повторить пп. 2–5.

Таблица 3.1

Таблица экспериментальных результатов

| SS, мм | $U_{пр}, \text{кВ}$ | | | | | $\bar{U}_{пр}, \text{кВ}$ | $U_{пр}, \text{кВ}$ | | | | | $\bar{U}_{пр}, \text{кВ}$ | Жидкость |
|-----------|---------------------|---|---|---|---|---------------------------|---------------------|---|---|---|---|---------------------------|----------|
| | | | | | | Среднее | | | | | | Среднее | |
| 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | Вода |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | Масло | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | | | | | | | | | | | | Этиловый спирт | |
| 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | | | | | | | | | | | | | |
| 4 | | | | | | | | | | | | | |
| 5 | | | | | | | | | | | | | |

7. По опытным данным на одном графике построить зависимости $\bar{U}_{пр} = f(S)$ для воды и масла и для разных полярностей импульса напряжения.

8. Построить на другом графике зависимость $\bar{E}_{пр} = f(S)$ для данных, полученных в п. 7. Здесь $\bar{E}_{пр} = \frac{\bar{U}_{пр}}{S}$.

9. Сделать выводы по работе. Выводы и заключение формулировать только на основе результатов экспериментальных измерений, полученных при выполнении работы.

10. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит эффект полярности вообще и в жидкой диэлектрической среде в частности?
2. Какие жидкости обладают наибольшим эффектом полярности?
3. На какие классы делятся жидкости по диэлектрической проницаемости?
4. Проведите аналогию эффекта полярности в жидкости и газовой среде. В чем принципиальное различие?
5. В каких областях современной индустрии применяются жидкие диэлектрики, использованные в лабораторной работе?
6. При каких условиях вода может выступать в роли диэлектрика?
7. Охарактеризуйте свойства диэлектрических жидкостей. Какое место в ряду жидких сред занимает вода?
8. Чем объяснить высокое значение диэлектрической проницаемости воды?
9. Как выглядит зависимость напряжения зажигания разряда в жидкой диэлектрической среде от крутизны фронта импульса воздействующего напряжения?
10. Какие пути повышения электрической прочности и эксплуатационной надежности изоляционных конструкций с жидкими диэлектрическими средами можете предложить, основываясь на результатах проделанных экспериментов?

Отчет по экспериментальной части выполняется на листах белой бумаги формата А4 в строгом соответствии с СТО ТПУ. На защите отчета необходимо быть готовыми строить ответы на основе как изученного теоретического материала, так и результатов, полученных лично подгруппой в ходе выполнения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Электрофизические основы техники высоких напряжений: учебник для вузов / И.М. Бортник, И.П. Верещагин, Ю.Н. Вершинин и др. ; под ред. И.М. Верещагина. – Москва : Энергоатомиздат, 1993. – 543 с.
2. Ушаков В.Я. Импульсный электрический пробой жидкостей / В.Я. Ушаков. – Томск : Изд-во Томского университета, 1975. – 256 с.
3. Шваб А. Измерения на высоком напряжении / А. Шваб. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 262 с.

4. Korobeynikov S.M. Mechanism of partial discharges in free helium bubbles in transformer oil / S.M. Korobeynikov, A.V. Ridel, D.I. Karpov, A.G. Ovsyannikov // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. – 2019. – Vol. 26. – Issue 5. – P. 1605–1611.

5. Korobeynikov S.M. Study of Partial Discharges in Liquids / S.M. Korobeynikov, A.V. Ridel, D.L. Karpov et al. // Journal of Electrostatic. – 2020. – Vol. 103. – Art. 103412. – 10 p.

Глава 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОБОЯ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ФОКА–СЕМЕНОВА

4.1. Теория процесса

Для создания модели процесса необходимо определить факторы, в наибольшей степени влияющие на развитие процесса старения и образование канала пробоя. В твердых диэлектриках присутствуют дефекты различного вида, стохастически распределенные по рабочему объему. Это, например, газовые, металлические, углеродные включения различных форм и размеров, субмикро- и микротрещины, различная пыль, несовершенство контакта электрод–диэлектрик и самые различные внутренние дефекты структуры электроизоляционной системы.

Как правило, выявить дефект, ответственный за отказ конкретного электроизоляционного изделия или системы, не представляется возможным. Тем не менее можно утверждать, что электрофизическое состояние диэлектрика в локальной области нахождения дефекта отличается от состояния всей матрицы. В частности, это проявляется в изменении локальной проводимости и диэлектрической проницаемости, наличии большой концентрации *ловушек заряженных частиц* и *дилатонов*, что в свою очередь приводит к локальному увеличению тока проводимости, накоплению объемных зарядов и к перераспределению напряженности электрического поля в диэлектрике. Появляются *области с высокой локальной напряженностью электрического поля*, что вызывает дальнейшее увеличение тока проводимости в этой области, разогрев, разрушение *дилатонов* и зарождение канала пробоя [1]. Особенно заметна локализация тока перед пробоем. Происходит «шнурование или контрагирование тока» в месте будущего прорастания канала пробоя [2–4]. Значение радиуса канала тока в зависимости от материала диэлектрика находится в пределах от 0,2 до 35 мкм. Таким образом, при разработке модели, как наиболее значимые должны быть учтены следующие составляющие:

- дефекты, случайным образом распределенные в объеме диэлектрика и имеющие различную исходную проводимость;
- локальное распределение объемных зарядов в процессе воздействия электрического поля на диэлектрик;
- изменяющееся тепловое состояние локальных зон диэлектрика, как функция протекающего локального тока и образца в целом.

В качестве базовой модели для дальнейшей разработки выбрана апробированная успешной практикой тепловая теория пробоя твердых диэлектриков Фока–Семенова.

Теория теплового пробоя разработана В.А. Фоком на основе решения дифференциальных уравнений теплового баланса для случая одномерного плоского или цилиндрического конденсатора с диэлектриком. Рассмотрим решение задачи при рационализированной форме записи уравнений. Для плоского конденсатора с диэлектриком уравнение теплового баланса и граничные условия (в случае постоянного электрического поля) могут быть записаны в виде:

$$\frac{\lambda d^2 T}{dz^2} + j^2 R = 0, \quad j = \text{const}; \quad (4.1)$$

$$\frac{dT}{dz} \Big|_0 = 0; \quad (4.2)$$

$$-\lambda \frac{dT}{dz} \Big|_h = \frac{c \cdot \lambda (T - T_0)}{h} = j\varphi, \quad (4.3)$$

где λ, λ_1 – коэффициенты теплопроводности диэлектрика и металлического электрода; T, T_0 – температура в точке z и в окружающей среде; $2h, \delta$ – толщина диэлектрика и электрода; R – удельное сопротивление; j – плотность тока; c – коэффициент; 2φ – разность потенциалов между электродами;

$$c = \frac{\lambda_1 \sigma \cdot h}{\lambda (\lambda_1 + \sigma \delta)}, \quad (4.4)$$

где σ – коэффициент внешней теплопроводности.

Коэффициент c рассчитывается с учетом линейной зависимости температуры от координаты.

Согласно уравнению теплового баланса количество тепла, выделяемого в расчете на единицу объема, равно количеству тепла, отводимого от этого участка диэлектрика:

$$Q_a = j^2 R; \quad (4.5)$$

$$Q_b = -\lambda \frac{d^2 T}{dz^2}. \quad (4.6)$$

Первое граничное условие (4.4) говорит о том, что плотность тока j в стационарном случае постоянна по всей толщине диэлектрика.

Второе граничное условие (4.5) означает, что в соответствии с симметричной конструкцией рассматриваемого плоского конденсатора температура в центре диэлектрика максимальна.

Третье граничное условие (4.6) выражает равенство между количеством тепла, подводимого к границе раздела диэлектрик–электрод и отводимого от этой границы. Коэффициент c рассчитывается с учетом линейной зависимости температуры от координаты в пределах электродов. Обычно уравнения теплового баланса решают при допущении, что удельное сопротивление экспоненциально зависит от температуры:

$$R = R_0 \exp[-a(T - T_0)], \quad (4.7)$$

где R_0 – удельное сопротивление при $T = T_0$.

Введем новые переменные:

$$V = a(T - T_0); \quad (4.8)$$

$$y = z / h. \quad (4.9)$$

Тогда приведенные равенства можно записать в безразмерном виде:

$$\frac{d^2V}{dy^2} + D \cdot \exp(-V) = 0; \quad (4.10)$$

$$\left. \frac{dV}{dy} \right|_0 = 0; \quad (4.11)$$

$$-\left. \frac{dV}{dy} \right|_1 = cV_1 = \xi, \quad (4.12)$$

где $\xi = ahj\phi / \lambda,$ (4.13)

$$D = ah^2 R_0 j^2 / \lambda. \quad (4.14)$$

Интегрируя уравнение теплового баланса с учетом граничных условий, получаем:

$$\arccos \exp\left(\frac{V_1 - V_m}{2}\right) = \sqrt{\frac{D}{2}} \exp\left(-\frac{V_m}{2}\right), \quad (4.15)$$

где $V_m = a(T_m - T_0)$, T_m – максимальная температура при $z = 0$.

Введя обозначения,

$$\alpha = \arccos \exp\left(\frac{V_1 - V_m}{2}\right), \quad (4.16)$$

установим зависимость между ξ и D в параметрической форме:

$$\xi = 2\alpha \operatorname{tg} \alpha; \quad (4.17)$$

$$D = 2\alpha^2 \sec^2 \alpha \exp\left(\frac{2\alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha}{c}\right). \quad (4.18)$$

Эти зависимости определяют вольт-амперную характеристику рассматриваемого конденсатора с учетом нагревания электрическим током. Такая характеристика выражается соотношением

$$\sqrt{D} = f(\xi / \sqrt{D}). \quad (4.19)$$

Зависимость (1.19) имеет максимальное значение при предельном отношении

$$\xi_{\text{пр}} / \sqrt{D_{\text{пр}}}, \quad (4.20)$$

выше которого уравнение теплового баланса решения не имеет. Следовательно, это значение соответствует условию теплового пробоя. Математически условие пробоя может быть выражено в виде

$$\frac{d\varphi}{dj} = 0, \quad (4.21)$$

то есть

$$\frac{d(\xi\sqrt{D})}{d\sqrt{D}} = 0. \quad (4.22)$$

Выводим условие пробоя:

$$c = \sin\alpha_{\text{пр}} \sec^3\alpha_{\text{пр}} (\alpha_{\text{пр}} + \sin\alpha_{\text{пр}} \cos\alpha_{\text{пр}}). \quad (4.23)$$

Для вычисления пробивного напряжения полученное из этого условия значение следует подставить в равенство, определяющее разность потенциалов между электродами:

$$U_{\text{пр}} = 2\varphi_{\text{пр}} = 2\sqrt{\frac{\lambda R_0}{\alpha}} \cdot \frac{\xi_{\text{пр}}}{\sqrt{D_{\text{пр}}}} = \sqrt{\frac{8\lambda R_0}{c}} \Phi(c) \quad (4.24)$$

$$\Phi(c) = \sin\alpha_{\text{пр}} \exp\left(\frac{\alpha_{\text{пр}} \operatorname{tg}\alpha_{\text{пр}}}{c}\right). \quad (4.25)$$

Зависимость $\Phi(c)$ была рассчитана в широком интервале изменения c . Аналогично была рассчитана $\Phi_1(c)$ для теплового пробоя диэлектрика в переменном электрическом поле. Различие между этими функциями обусловлено неодинаковым распределением потенциала по слою диэлектрика в постоянном и переменном электрических полях. В первом случае напряженность поля пропорциональна удельному сопротивлению. С повышением температуры в среднем слое значение удельного сопротивления уменьшается, поэтому в постоянном поле значение напряженности в средней части диэлектрика оказывается меньше, чем по краям. Такое распределение поля как бы облегчает условия работы диэлектрика.

В переменном электрическом поле при условии $\operatorname{tg}\delta < 0,3$, которое обычно соблюдается, напряженность поля обратно пропорциональна диэлектрической проницаемости. Поскольку диэлектрическая проницаемость очень слабо зависит от температуры, то напряженность поля примерно постоянна и условия работы диэлектрика оказываются более

жесткими, т. е. значения пробивного напряжения меньше, чем в постоянном электрическом поле. Значение пробивного напряжения, полученное в результате решения уравнения теплового баланса, соответствует достаточно длительному времени, необходимому для установления теплового равновесия.

4.2. Компьютерная модель процесса

Разработанная компьютерная модель описывает процесс теплового пробоя диэлектриков при длительном приложении постоянного электрического поля и имитирует стадию, предшествующую прорастанию канала пробоя. Диэлектрик характеризуется четырьмя основными параметрами: теплопроводностью, температурным коэффициентом электрического сопротивления, начальной электропроводностью и теплоемкостью. Распределение электрического поля для каждого шага пересчитывается по уравнению

$$\operatorname{div} E = \rho / \varepsilon, \quad (4.26)$$

где E – напряженность электрического поля; ρ – плотность заряда; ε – диэлектрическая проницаемость.

Модель теплового пробоя описывается нелинейной системой дифференциальных уравнений, определяющих электрическое и температурные поля, распределение токов и зарядов в диэлектрике:

$$\operatorname{div} (-\varepsilon \operatorname{grad} \varphi) = \rho / \varepsilon_0; \quad (4.27)$$

$$E = -\operatorname{grad} \varphi; \quad (4.28)$$

$$d\rho / dt = -\operatorname{div} j; \quad (4.29)$$

$$j = \gamma E; \quad (4.30)$$

$$\lambda c \partial T / \partial t = \operatorname{div} (k \operatorname{grad} T) + \gamma E^2; \quad (4.31)$$

$$\gamma = \gamma_0 \exp a(T - T_0), \quad (4.32)$$

где φ и E – потенциал и напряженность электрического поля; ε и ε_0 – абсолютные и относительные диэлектрические проницаемости; j – плотность тока; ρ – плотность заряда; γ_0 , γ – начальная и текущая проводимость диэлектрика; a – показатель связи проводимости с температурой; T_0 , T – начальная и текущая температура диэлектрика; λ и c – плотность и теплоемкость диэлектрика; k – коэффициент теплопроводности.

Для проведения исследований модель реализуется численно на двумерной квадратной решетке. Время изменяется дискретно с интервалом Δt . Состояние диэлектрика, соответствующее узлу решетки с координатами (i, j) , в момент времени t определяется потенциалом, плотностью заряда, температурой. Начальная проводимость диэлектрика задается статистически независимо в каждом узле и распределяется для

двумерной решетки по экспоненциальному закону. Диэлектрическая проницаемость, теплопроводность, показатель связи проводимости с температурой, теплоемкость и плотность диэлектрика принимаются равными для всех точек объема диэлектрика и не изменяются во времени. Система электродов выполняется в геометрии плоскость-плоскость. Граничные узлы, соответствующие нижнему электроду, имеют потенциал, равный нулю. Температура электродов принимается равной T_0 . Напряженность поля в диэлектрике находится как разность потенциалов между узлами, деленная на величину ребра решетки в каждый момент времени t . Распределение потенциала определяется с помощью конечно-разностной аппроксимации теоремы Гаусса:

$$\varphi_{i,j}(t) = 1/4 [\varphi_{i+1,j}(t) + \varphi_{i,j+1}(t) + \varphi_{i-1,j}(t) + \varphi_{i,j-1}(t) + \rho_{i,j}(t)]. \quad (4.33)$$

Это уравнение решается методом итераций, согласно зарядным граничным условиям.

Плотность заряда и температура в узле определяются по формулам:

$$\rho_{i,j}(t + \Delta t) = \rho_{i,j}(t) - 1/2 \Delta t \sum [\gamma_{i,j}(t) + \gamma_{l,m}(t)] \cdot [\varphi_{i,j}(t) - \varphi_{l,m}(t)]; \quad (4.34)$$

$$T_{i,j}(t + \Delta t) = T_{i,j}(t) - 1/2 \Delta t \times \beta \sum \left[T_{i,j}(t) - T_{l,m}(t) + 1/4 \Delta t \cdot \xi \cdot [\gamma_{i,j}(t) + \gamma_{l,m}(t)] \cdot [\varphi_{i,j}(t) - \varphi_{l,m}(t)]^2 \right] \quad (4.35)$$

где $\beta = k / (\lambda \cdot c)$, $\xi = 1 / (\lambda \cdot c)$, а суммирование выполняется по узлам (l, m) , соседним с (i, j) . В начальный момент времени $t=0$ температура равна T_0 и заряд равен нулю во всех узлах решетки.

Таким образом, рассматривается только влияние случайных неоднородностей проводимости, хотя модель может быть использована также для описания неоднородностей других параметров диэлектрика. Моделирование процесса выполняется до тех пор, пока максимальные напряженность поля или температура в какой-то локальной области диэлектрика не превысят заданное критическое значение.

В зависимости от условий эксперимента в программу можно вносить изменения в соответствии с заданными условиями эксперимента непосредственно в активном окне программы. Описание основных параметров диэлектрика находится в начале программы.

1. Зайдите в каталог D:\TP\BIN и после запуска turbo.exe (Паскаль) запустите программу labor1.pas, которая находится в D:\LABORAT. Затем в диалоговом окне введите данные эксперимента, такие как длина острия (L) и испытательное напряжение ($U_{исп}$). Программа работает в автоматическом режиме и необходимые данные экспериментов, такие как число шагов до пробоя (n), проводимость диэлектрика (G_{max}), запи-

сываются в файл lab.dat. После проведения 50 экспериментов программа завершает расчет.

2. Далее необходимо запустить программу obrab1.pas (которая находится в каталоге D:\LABORAT) для обработки полученных данных. Обработанные данные представляются в виде трех колонок: в первой представлен номер по порядку, во второй – вероятность пробоя, в третьей – соответствующее число шагов до пробоя модельного образца. Результаты обработки данных записываются в файл lab.ndx (который размещен в D:\LABORAT), после чего эти результаты должны быть сохранены под другим именем (присвоить самостоятельно) во избежание потери данных при следующем запуске программы. Проводится серия из четырех экспериментов с различными начальными условиями, для каждого отдельного эксперимента необходимо выполнить пункты 1–3.

3. Осуществите вывод на печать результатов расчетов. Для этого необходимо открыть файл с нужными данными с помощью редактора (Microsoft Word) и, изменив (если необходимо) параметры страницы, отправить файл на печать. После получения распечатки результатов к эксперименту может приступить следующая группа студентов.

Порядок обработки результатов

Применение вероятностно-статистических методов при изучении закономерностей отказов твердых диэлектриков физически обосновано уже тем, что весь процесс формирования канала разряда, с момента его зарождения в локальном объеме промежутка и до полного пробоя, является случайным. Экспериментально установленный разброс значений пробивной прочности и «времени жизни» до пробоя образцов изоляции, изготовленных единым образом и испытанных в идентичных условиях, связывается с индивидуальными особенностями микро- и макроструктуры единичных изделий.

Вероятностное исследование включает в себе представление реальной неоднородной совокупности явлений при помощи теоретической однородной совокупности, конечная цель которого – получение количественных характеристик (закономерностей физического состояния). Количественные характеристики – это своего рода выражение опасности отказов как целой конструкции, так и отдельных ее элементов в вероятностных терминах. Для практического применения законов теории вероятности необходимо обратиться к закону распределения отказов. Выбор последнего, в свою очередь, определяется некоторой теоретической картиной явления, называемой физической моделью.

Концепция «слабейшего звена», которая учитывает распределение минимальных сроков службы, на сегодня является наиболее разработанной в приложении к теории пробоя электрической изоляции. Этому в определенной мере способствовало то, что был выведен обобщающий закон Вейбулла, который, как принято считать, является наиболее общей формой описания закономерностей электрического старения изоляции и указывает на вероятностную форму связи «времени жизни» изоляции с интенсивностью воздействия внешнего электрического поля. Аналитическое уравнение закона имеет вид

$$P(E, t) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{E}{E_0} \right)^a \cdot \left(\frac{t}{t_0} \right)^b \right], \quad (4.36)$$

где $P(E, t)$ – вероятность отказа; E, t – текущие значения пробивной прочности и времени до пробоя соответственно; E_0, t_0 – значения прочности и времени до пробоя при вероятности отказа, определяемого как:

$$P(E_0, t_0) = 0,632,$$

где a, b – параметры формы.

Практическая ценность обобщенного закона Вейбулла для электроизоляционных конструкций с любым уровнем надежности состоит в получении результатов ускоренных испытаний для реальных условий эксплуатации. Этому вопросу в литературе уделяется особенно большое внимание. Опубликованные на сегодня результаты свидетельствуют о правомочности применения распределения Вейбулла к описанию распределений пробивных значений прочности и отказов различных диэлектрических материалов, композиций на их основе и целых конструкций.

Для конкретного значения испытательной напряженности (напряжения) $E_{исп}$ функция распределения времени до пробоя может быть представлена в виде

$$P(t) = 1 - \exp (-t / t_0)^b. \quad (4.37)$$

Достоинством распределения Вейбулла является возможность широкого варьирования показателей распределения t_0, b . Например, при $b = 1$ распределение обращается в экспоненциальное, а при $b = 6$ – приближается к нормальному. Эти его свойства позволяют описывать изменения случайной величины t в широких пределах. Опыт и практика показали, что этот вид распределения дает самые точные оценки при определении кратковременной и длительной электрической прочности твердой изоляции.

Результаты экспериментов представляются в виде вариационных рядов времени до пробоя (компьютерные распечатки эксперименталь-

ных результатов в виде таблиц). Затем результаты таблиц отражаются на графике Вейбулла. В общем виде зависимость 2, представленная на рис. 4.1, описывается несколькими прямолинейными участками.

Наличие нескольких прямолинейных участков на графике Вейбулла связано с определенными (различными) физическими процессами, происходящими в диэлектрике при длительном воздействии электрического поля. Первый участок (область малых времен до пробоя) вызван отказом изоляционных изделий с грубыми внутренними дефектами: трещины, полости, различные инородные включения и др. Этих дефектов сравнительно мало, но они играют определенную роль в процессе быстрого пробоя. То есть на первом участке происходит отбраковка технологических дефектов в партии изоляционных изделий. Второй участок на границе Вейбулла соответствует случайным отказам и является рабочим участком для изоляции. Каждый прямолинейный участок описывается распределением Вейбулла, но имеет свои параметры t_0 и b . Точка перегиба на графике Вейбулла определяет время, необходимое для отбраковки технологических дефектов, и ожидаемый процент брака.

На основании полученных результатов (таблицы и графики) необходимо построить «кривую жизни» изоляции, т. е. зависимость «времени жизни» от напряженности (приложенного напряжения). «Кривая жизни» является основной характеристикой, позволяющей экстраполировать экспериментальные результаты в область других напряженностей.

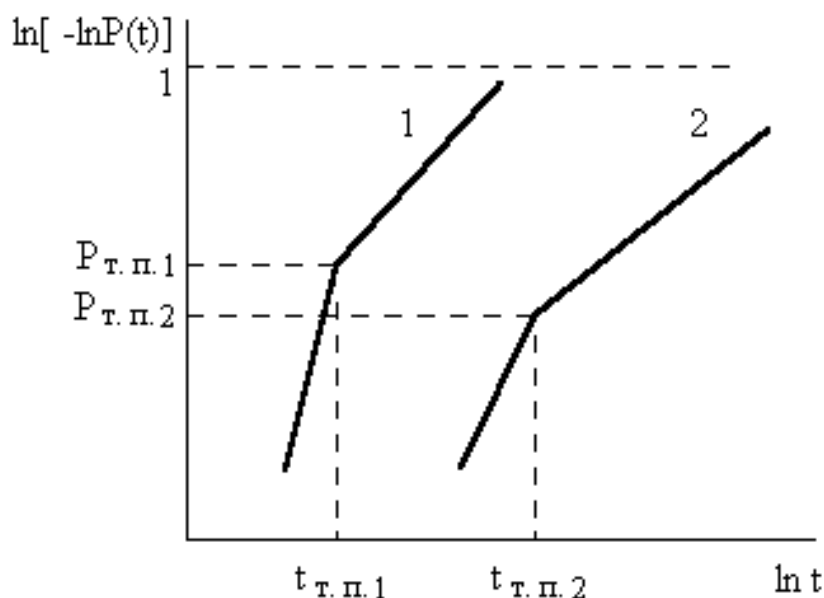


Рис. 4.1. Распределение времени до пробоя твердой изоляции:

1 – E_{ucn1} ; 2 – E_{ucn2} ; $E_{ucn1} > E_{ucn2}$

«Кривая жизни» описывается формулой

$$t_i = AE_i^{-n}, \quad (4.38)$$

где t_i – «время жизни» при E_i ; A и n – коэффициенты, определяемые экспериментально.

На рис. 4.2 приведена «кривая жизни» в би-логарифмических координатах. Она представляет собой прямую линию, как следует из уравнения (4.38). Коэффициент A представляет собой время жизни при выбранном значении напряженности (напряжения):

$$A = t_1 \cdot E_1^n. \quad (4.39)$$

Подставляя уравнение (4.39) в (4.38), получим:

$$t_i = t_1 (E_1 / E_i)^n. \quad (4.40)$$

Коэффициент n характеризует скорость старения изоляции и может быть определен как тангенс угла наклона «кривой жизни» (рис. 4.2).

Данные основных параметров процесса:

- испытательное напряжение $U_{исп} = 50, 60, 70, 80, 90, 100$;
- проводимость дефектов $G = 1,0 \dots 11$;
- количество пробоев в выборке $N = 50$;
- форма электродов (плоскость–плоскость, острие–плоскость и т. д.).

Постройте график Вейбулла для полученных результатов.

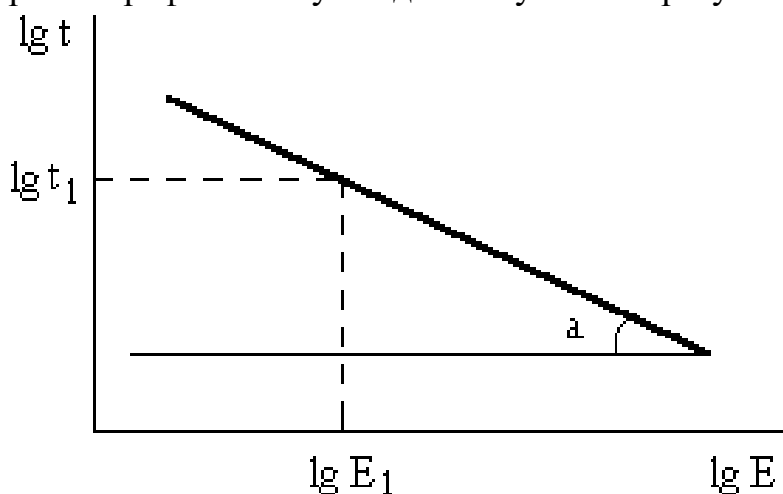


Рис. 4.2. «Кривая жизни» твердой изоляции

Определите параметры точек перегиба $P_{т.п}$, $t_{т.п}$ на графике Вейбулла и время до пробоя. Полученные данные занесите в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Экспериментальные результаты

| $N_{п/п}$ | $t_{0,5}$ | $P_{т.п}$ | $t_{т.п}$ | Примечание |
|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 1 | | | | $A =$ |

| | | | | |
|---|--|--|--|-----|
| 2 | | | | n = |
| 3 | | | | |
| 4 | | | | |

На основании данных табл. 4.1 постройте зависимости:

1) $\lg t_{0,5} = f(\lg U_{\text{исп}})$; 2) $\lg t_{\text{т. п}} = f(\lg U_{\text{исп}})$; 3) $P_{\text{т. п}} = f(\lg U_{\text{исп}})$.

На основании рис. 4.1 определить коэффициенты A и n в уравнении «кривой жизни» ($t = A \cdot E^{-n}$). Провести анализ полученных результатов. Ответить на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

1. Как влияет испытательное напряжение на время до пробоя твердой изоляции?
2. Почему изменяется время, необходимое для отбраковки дефектной изоляции, в зависимости от испытательного напряжения?
3. Как и почему изменяется число «дефектных» образцов в зависимости от испытательного напряжения?

Отчет по экспериментальной части выполняется на листах белой бумаги формата А4 в строгом соответствии с СТО ТПУ. На защите отчета необходимо быть готовыми строить ответы на основе как изученного теоретического материала, так и результатов, полученных лично подгруппой в ходе выполнения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Ушаков В.Я. О роли неоднородности полимеров в развитии разрушения под действием электрического поля / В.Я. Ушаков, А.Л. Робежко, В.Ф. Важов // ФТТ. – 1985. – Т. 5, № 8. – С. 23–65.
2. Травков И.В. Моделирование переноса заряда в диэлектрике со случайно расположенными глубокими центрами захвата с учетом разогрева электронов / И.В. Травков, В.А. Швейгерт // Физика. – 1987. – № 5. – С. 73.
3. Борисова М.Э. Физика диэлектриков / М.Э. Борисова, С.Н. Койков. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1979. – 240 с.
4. Гельман М.З. Статистический метод расчета электрической прочности твердой изоляции / М.З. Гельман, В.И. Мурович // Электричество. – 1973. – № 5. – С. 67–71.
5. Смирнов Н.В. Курс теорий вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, И.В. Дунин-Барковский. – Москва : Наука, 1969. – 511 с.

6. Кузнецова Ю.А. Методика моделирования предпробивных полей в жидкости / Ю.А. Кузнецова, В.Б. Ясинский, С.М. Коробейников // Вопросы электротехнологии. – 2021. – № 3. – С. 38–47.

Глава 5

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА РАСЩЕПЛЕННОЙ ФАЗЕ ЛЭП СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

5.1. Теория процесса

Постепенное повышение напряжения в определенный момент приводит к скачкообразному увеличению тока коронного разряда. Вследствие этого на проводах наблюдаются характерные для явления коронного разряда потрескивания и шумы, а при дальнейшем повышении напряжения – и фиолетово-голубое свечение.

Разность потенциалов, при которой начинается явление короны, носит название начального напряжения коронного разряда.

Величина начального напряжения короны зависит от геометрических размеров электродов, расстояния между ними и состояния поверхности провода. Начальные напряжения короны могут быть определены по градиентам потенциала электрического поля у поверхности электродов с малыми радиусами кривизны.

В лабораторных условиях наиболее точно определение амплитудной начальной напряженности E_0 (кВ/см) электрического поля, соответствующего появлению общей короны, может быть произведено по известной эмпирической формуле Пика, полученной на основании обобщения и анализа экспериментальных данных для двух гладких цилиндрических параллельных проводов с одинаковым радиусом:

$$E_0 = 3,03 \cdot 10^3 \delta \left(\frac{1 + 0,298}{\sqrt{r_0 \delta}} \right), \quad (5.1)$$

где r_0 – радиус провода, см; δ – относительная плотность воздуха;

$$\delta = \frac{0,368p}{273 + t}, \quad (5.2)$$

где p – давление, мм рт. ст.; t – температура воздуха, °С.

При температуре воздуха 20 °С и атмосферном давлении 760 мм рт. ст. $\delta = 1$.

Как следует из уравнений (5.1) и (5.2), начальное напряжение короны почти пропорционально относительной плотности воздуха δ , а средние значения величины δ находятся в непосредственной зависимости от высоты трассы линии электропередачи над уровнем моря. Кроме того, величина δ изменяется в течение суток и в еще большей степени зависит от времени года. В Сибири и на Дальнем Востоке среднегодо-

вое значение плотности воздуха на 10...15 % выше, чем в южных районах России. Поэтому в северных и северо-восточных районах, как следует из формулы (5.1), величина E_0 будет, соответственно, выше и условия работы линий электропередачи с точки зрения короны будут более благоприятными.

Напряжение начала общей короны на гладких цилиндрических проводах пропорционально начальной напряженности электрического поля провода. На витых проводах, применяемых на линиях электропередачи, наличие проволок внешнего повива приводит к усилению электрического поля вблизи их поверхности и снижению величины начального напряжения короны по сравнению с цилиндрическими проводами.

Снижение начальных градиентов короны на гладких чистых витых проводах учитывается добавлением в уравнение (5.1) коэффициента гладкости m , который равен отношению начального напряжения короны на витом проводе U'_0 к начальному напряжению короны на гладком цилиндрическом проводе U_0 :

$$m = \frac{U'_0}{U_0}. \quad (5.3)$$

Витая поверхность провода деформирует электрическое поле только в непосредственной близости от его поверхности. На этом участке происходит значительно более быстрый, чем у гладких проводов, спад напряжения, приводящий к снижению начального напряжения общей короны. С увеличением количества проволок во внешнем повиве сталелюминиевых проводов начальное напряжение общей короны повышается и в пределе коэффициент гладкости витого провода с достаточно большим количеством проволок во внешнем слое будет равен единице.

В зависимости от количества проволок во внешнем повиве сталелюминиевых проводов коэффициент гладкости изменяется в пределах от 0,8 до 0,97 (рис. 5.1).

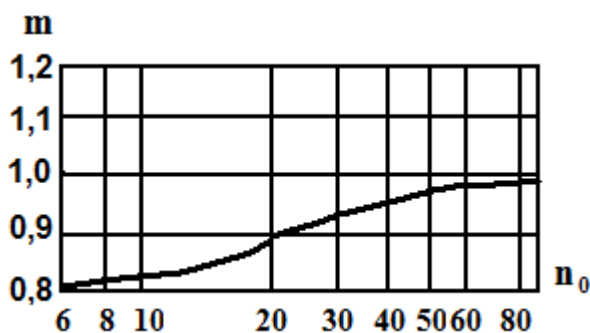


Рис. 5.1. Коэффициент гладкости витого провода в зависимости от числа проволок во внешнем слое

В среднем коэффициент гладкости m , как показывают экспериментальные исследования, может быть принят равным 0,9. Измерения коэффициента гладкости, выполненные в ЭНИН имени Г.М. Кржижановского, производились преимущественно на проводах марок АСО, АС и АСУ. В процессе измерений начальное напряжение короны фиксировалось только в тех случаях, когда вспышка короны одновременно появлялась как на чистой поверхности, так и на сохранившихся местных неоднородностях. Возникновение короны, так же как и в случае гладких цилиндрических проводов, сопровождалось резким всплеском тока короны, высокочастотных колебаний в токе, потерь мощности и радиопомех. Значения коэффициента гладкости приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Экспериментальные значения коэффициента гладкости

| Марка провода | Внешний диаметр, мм | Число проводов во внешнем повиве | Диаметр проволок внешнего повива, мм | Коэффициент гладкости |
|---------------|---------------------|----------------------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| АС-120 | 15,3 | 17 | 2,25 | 0,88 |
| АСО-300 | 22,7 | 24 | 2,53 | 0,92 |
| АСО-400 | 27 | 24 | 3,04 | 0,94 |
| АСУ-400 | 29,3 | 18 | 4,19 | 0,91 |
| АСО-500 | 30,2 | 24 | 3,37 | 0,88 |
| АСО-600 | 33,1 | 24 | 3,69 | 0,94 |
| АСО-700 | 37,1 | 24 | 4,1 | 0,91 |

При выборе сечения проводов предельно допустимые значения рабочих градиентов электрического поля рассчитываются таким образом, чтобы в хорошую погоду на линиях электропередачи не наблюдалось общей короны.

Значения электрической прочности основных марок проводов приведены в табл. 5.2.

Для выполнения этого требования сечение и конструкция проводов расщепленной фазы выбираются таким образом, чтобы отношение рабочей напряженности поля на поверхности провода E_p к величине E_0 не превосходило 0,9. Следует отметить, что в расчетах начальный градиент общей короны для чистых и грязных проводов имеет различные значения и не учитывается. При этом в соответствии с рекомендациями Пика коэффициент гладкости m принимается равным 0,82. В действительности для чистых проводов, как было показано выше, среднее значение величины $m = 0,9$. Следовательно, при прочих одинаковых условиях в расчетах по выбору сечения проводов градиент начала общей

короны может выбираться примерно на 10 % выше, чем это принималось до настоящего времени.

Чем больше диаметр провода, тем меньше начальная напряженность, при которой возникает общая корона. Это обстоятельство в некоторой степени уменьшает преимущества увеличения диаметра проводов для снижения потерь на корону. В табл. 5.2 приведены результаты расчетов по определению E_0 для наиболее распространенных марок сталеалюминиевых проводов, применяемых на линиях 330...750 кВ. При этом коэффициент m принимался равным 0,9, а $\delta = 1$.

Таблица 5.2

Значения электрической прочности проводов

| Марка провода | Радиус провода r_0 , см | E'_0 , кВ/м |
|---------------------|---------------------------|---------------|
| АСО-240 | 1,06 | 3500 |
| АСО-300 | 1,175 | 3480 |
| АСО-400 | 1,36 | 3420 |
| АСО-500 | 1,51 | 3400 |
| АСО-600 | 1,655 | 3360 |
| АСО-700 | 1,855 | 3320 |
| АСУ-240 | 1,12 | 3495 |
| АСУ-300 или АСО-330 | 1,26 | 3440 |
| АСУ-400 | 1,45 | 3400 |
| АС-240 | 1,08 | 3500 |
| АС-300 | 1,21 | 3470 |
| АС-400 | 1,4 | 3410 |

Следует отметить, что критерий $E_p/E_0 < 0,9$ характеризует условия приближения к общей короне при хорошей погоде. В остальное время, при плохой погоде, начальное напряжение резко понижается и общая корона наблюдается на всех линиях электропередачи, практически независимо от величины выбранного диаметра проводов и коэффициента гладкости.

**Определение напряженности электрического поля
одиночных проводов**

Напряженность электрического поля на поверхности провода пропорциональна количеству электричества, разделенному на радиус провода, а количество электричества пропорционально емкости. Поэтому напряженность электрического поля на поверхности одиночного прово-

да E (кВ/м) зависит от его диаметра, емкости и рабочего напряжения и может быть определена по формуле

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 r_0} = 1,47 \frac{CU_{\text{ном}}}{r_0}, \quad (5.4)$$

где q – электрический заряд на проводе; ϵ_0 – диэлектрическая постоянная воздуха; C – рабочая емкость провода, пФ/м; $U_{\text{ном}}$ – рабочее линейное напряжение электропередачи, кВ; r_0 – радиус провода, см.

Для приближенного расчета напряженности электрического поля трехфазной транспонированной линии достаточно найти среднюю емкость провода (пФ/м) без учета земли, которая определяется по известной формуле

$$C_p = \frac{24}{\lg \frac{D_{\text{cp}}}{r_0}}, \quad (5.5)$$

где D_{cp} – среднее геометрическое расстояние между фазами. В случае горизонтального расположения фаз

$$D_{\text{cp}} = 1,26D, \quad (5.6)$$

где D – действительное расстояние между фазами. В случае треугольного расположения фаз

$$D_{\text{cp}} = \sqrt[3]{D_1 D_2 D_3}, \quad (5.7)$$

где D_1, D_2, D_3 – действительные расстояния между фазами.

Для трехфазной линии с горизонтальным расположением фаз по средней емкости проводов можно определить напряженность электрического поля на крайних фазах $E_{\text{кр}}$.

В симметричном трехфазном режиме при горизонтальном расположении проводов величины рабочих емкостей крайних фаз оказываются меньше приблизительно на 5 %, чем емкость средней фазы. Вследствие этого на средней фазе корона возникает раньше и процесс коронирования протекает более интенсивно. Поэтому напряженность электрического поля средней фазы E_{cp} будет равна:

$$E_{\text{cp}} = 1,05E_{\text{кр}}. \quad (5.8)$$

При треугольном расположении проводов напряженность электрического поля каждого провода будет одинаковой и приблизительно может быть определена по средней емкости проводов. Приведенные рекомендации по приближенному расчету рабочих емкостей дают возможность рассчитать напряженность электрического поля с точностью, достаточной для определения среднегодовых потерь при короне.

Необходимость точного определения напряженности электрического поля возникает в тех случаях, когда при выбранных параметрах линии следует ожидать появления общей короны. Тогда расчет емкости линии обязательно должен производиться путем решения системы уравнений Максвелла.

Определение напряженности электрического поля расщепленных проводов

В отличие от одиночных проводов напряженность электрического поля на поверхности расщепленных проводов не остается постоянной, а изменяется в значительных пределах. Это объясняется тем, что электрическое поле в каждой точке поверхности провода создается под действием не только собственного заряда, но и зарядов остальных проводов.

Максимальная напряженность электрического поля на поверхности расщепленных проводов возникает в точках, наиболее удаленных от оси симметрии с внешней стороны пучка проводов, а минимальная – в точках, наиболее приближенных к ней с внутренней стороны (рис. 5.2).

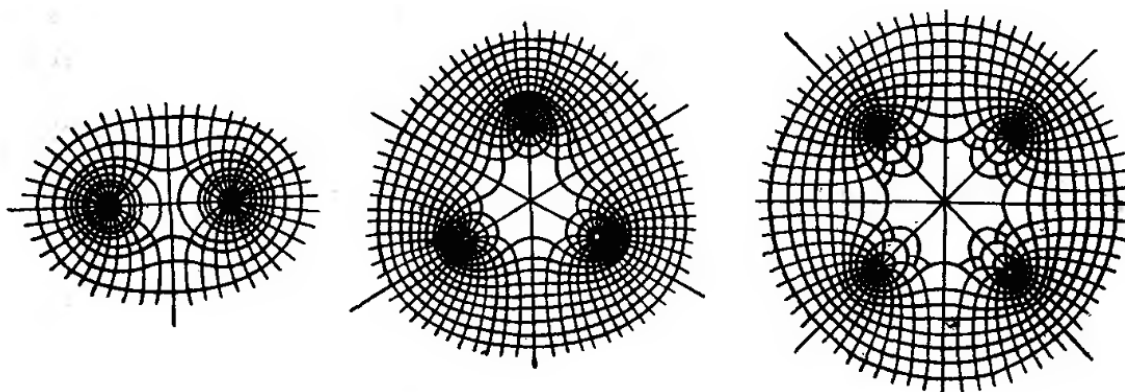


Рис. 5.2. Конфигурация электрического поля расщепленных проводов

Средняя напряженность электрического поля расщепленных проводов может быть определена путем решения уравнения Максвелла с учетом того, что все заряды сосредоточены на осях проводов. Величина средней напряженности определяется по аналогии с определением напряженности для одиночного провода по формуле

$$E_{\text{ср}} = 1,47 \frac{CU_{\text{ном}}}{n \cdot r_0}, \quad (5.9)$$

где n – количество проводов в расщепленной фазе; C – рабочая емкость проводов расщепленной фазы.

Приближенное определение средней емкости транспонированной линии с расщепленными проводами производится аналогично одиноч-

ному проводу, но вместо радиуса одиночного провода учитывается эквивалентный радиус расщепленных проводов:

$$C_{\text{cp}} = \frac{24}{\lg \frac{D_{\text{cp}}}{r_3}}, \quad (5.10)$$

где r_3 – эквивалентный радиус расщепленных проводов.

Максимальная напряженность электрического поля расщепленных проводов определяется по формуле

$$E_{\text{M}} = k \cdot E_{\text{cp}}, \quad (5.11)$$

где k – коэффициент перехода от средней напряженности электрического поля к максимальной,

$$k = 1 + \frac{\beta}{A}, \quad (5.12)$$

где A – относительное расстояние между расщепленными проводами,

$$A = \frac{a}{r_0},$$

где a – расстояние между осями проводов расщепленной фазы.

В табл. 5.3 отражены значения величины коэффициента, зависящего от количества расщепленных проводов в фазе β для различного числа n расщепленных проводов.

Таблица 5.3

Соотношение между коэффициентом и числом расщепления

| n | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 |
|---------|-----|------|------|-----|-----|-----|------|------|
| β | 2,0 | 3,48 | 4,24 | 4,7 | 5,0 | 5,2 | 5,36 | 5,58 |

Определение максимальных напряженностей электрического поля для наиболее распространенных вариантов конструкций проводов расщепленной фазы линий 330...500 кВ с горизонтальным расположением проводов может быть произведено с помощью номограммы, приведенной на рис. 5.3. Номограмма построена в соответствии с формулами:

$$E_{\text{макс}} = 18 \cdot 10^{-4} \frac{C \cdot U_{\text{ном}} \sqrt{2}}{n \cdot r_0 \sqrt{3}} k; \quad (5.13)$$

$$C = \frac{0,2413 \cdot 10^5}{\lg \frac{D_{\text{cp}}}{r_3}}; \quad D_{\text{cp}} = 1,26D. \quad (5.14)$$

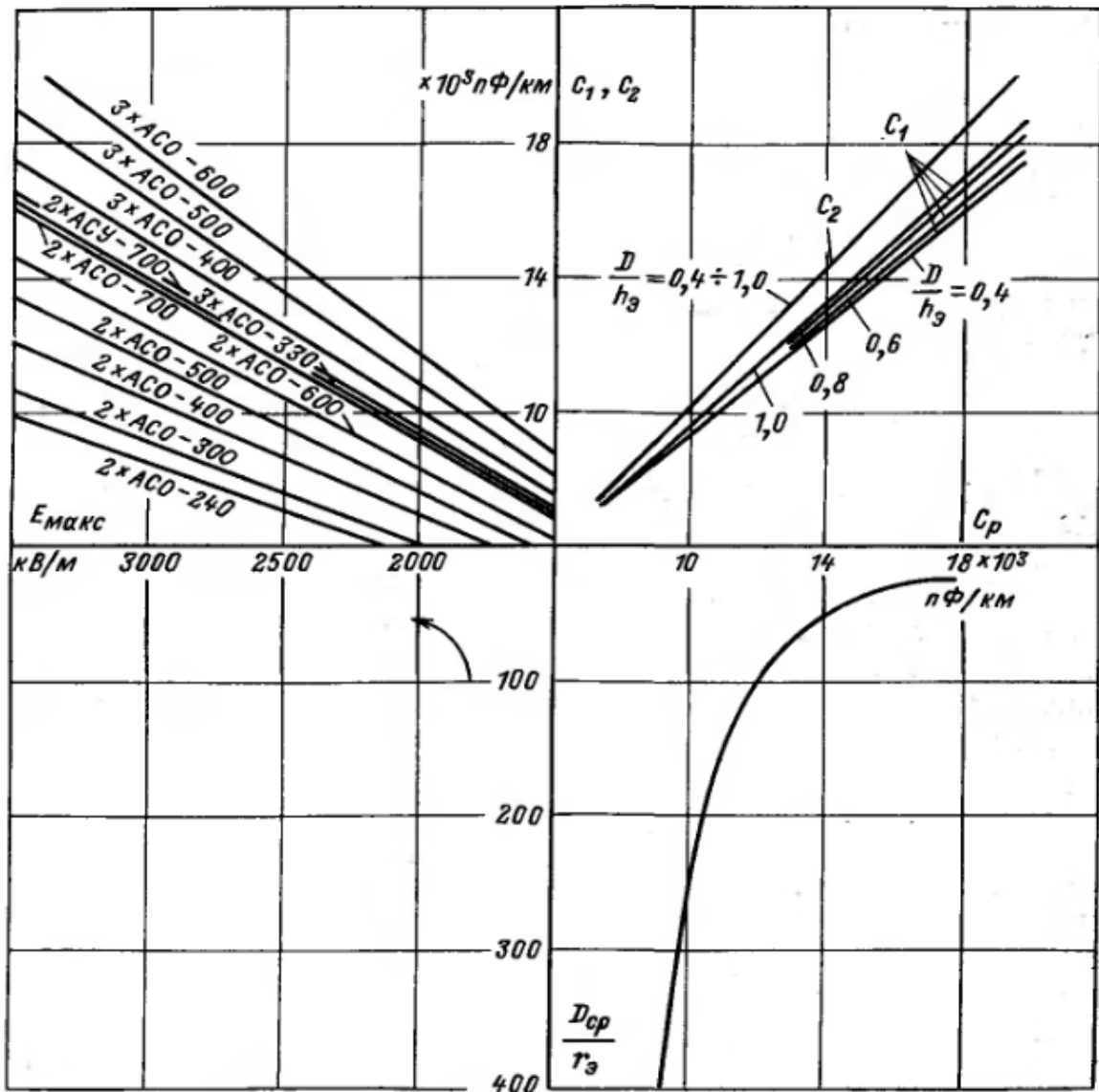


Рис. 5.3. Номограмма для расчета максимальных напряженностей электрического поля для $U_{ном} = 500$ кВ:

D – междуфазное расстояние, см; C_1 – емкость крайних фаз;
 C_2 – емкость средней фазы, пФ/км; h_3 – эквивалентная высота

По условиям ограничения короны и радиопомех $E_{2max}/E_0 \leq 0,9$ и $E_{2max} \leq E_{р.п.доп}$, где E_{2max} – напряженность поля на средней фазе; E_0 – начальная напряженность, соответствующая возникновению общей короны; $E_{р.п.доп}$ – допустимая напряженность поля по условиям радиопомех (табл. 5.4 и 5.5).

Минимальная напряженность электрического поля расщепленных проводов определяется аналогично:

$$E_{мин} = k_1 E_{ср}, \quad (5.15)$$

где k_1 – коэффициент перехода от средней напряженности электрического поля к минимальной:

$$k_1 = 1 - \frac{\beta}{A}. \quad (5.16)$$

Таблица 5.4
Соотношение основных показателей по маркам проводов

| Показатели | Провод | | | | |
|----------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2 × АСО-240 | 2 × АСО-300 | 2 × АСО-400 | 2 × АСО-500 | 2 × АСО-600 |
| r_0 , см | 1,08 | 1,175 | 1,36 | 1,51 | 1,655 |
| $r_э$, см при $a = 40$ см | 6,6 | 6,8 | 7,4 | 7,8 | 8,1 |
| 0,01 E_0 , кВ/м | 31,9 | 31,6 | 31,2 | 39 | 30,6 |
| 0,01 $E_{р.п.доп.}$ кВ/м | 31 | 30,2 | 28,8 | 28 | 27,3 |

Таблица 5.5
Соотношение основных показателей по маркам проводов

| Показатели | Провод | | | | | |
|----------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| | 2× АСО-700 | 2× АСУ-700 | 3× АСО-330 | 3× АСО-400 | 3× АСО-500 | 3× АСО-600 |
| r_0 , см | 1,855 | 1,9 | 1,26 | 1,36 | 1,51 | 1,655 |
| $r_э$, см при $a = 40$ см | 8,6 | 8,8 | 12,65 | 12,9 | 13,4 | 13,8 |
| 0,01 E_0 , кВ/м | 30,2 | 30,1 | 31,4 | 31,2 | 30,9 | 30,6 |
| 0,01 $E_{р.п.доп.}$ кВ/м | 26,5 | 26,3 | 29,5 | 28,8 | 28 | 27,3 |

Напряженность электрического поля на поверхности проводов при неизменном сечении расщепленной фазы снижается с увеличением числа проводов. Диапазон изменения напряженности электрического поля от максимального до минимального значения также зависит от количества расщепленных проводов в фазе и относительного расстояния между ними. По мере повышения напряженности и, следовательно, приближения общей короны расщепление проводов приобретает все более существенное практическое значение.

На рис. 5.4 показано влияние расщепления применительно к параметрам линии 500 кВ, трасса которой проходит в европейской части России. По условиям короны при одной и той же напряженности элек-

трического поля расщепление позволяет применять на линиях сверхвысокого напряжения провода значительно меньшего сечения.

Приведенные выше уравнения позволяют определить напряжение начала общей короны U_0 для каждой фазы линии в отдельности. Для этого следует в уравнении (5.11) заменить максимальную напряженность электрического поля на поверхности провода E_m значением начальной напряженности E_0 , соответствующей появлению общей короны, и решить это уравнение относительно рабочего напряжения $U_{\text{раб}}$, которое в рассматриваемом случае будет равно начальному напряжению общей короны:

$$U_0 = 0,393 \frac{E_0 n r_0}{k C}. \quad (5.17)$$

Напряженность электрического поля уменьшается при увеличении расстояния между фазами и зависит от расстояния между проводами расщепленной фазы. Первое обстоятельство может быть использовано для применения проводов меньшего сечения на линиях, где по каким-либо причинам, например повышенная скорость ветра и т. п., расстояние между фазами выбирается больше требуемого по координации изоляции.

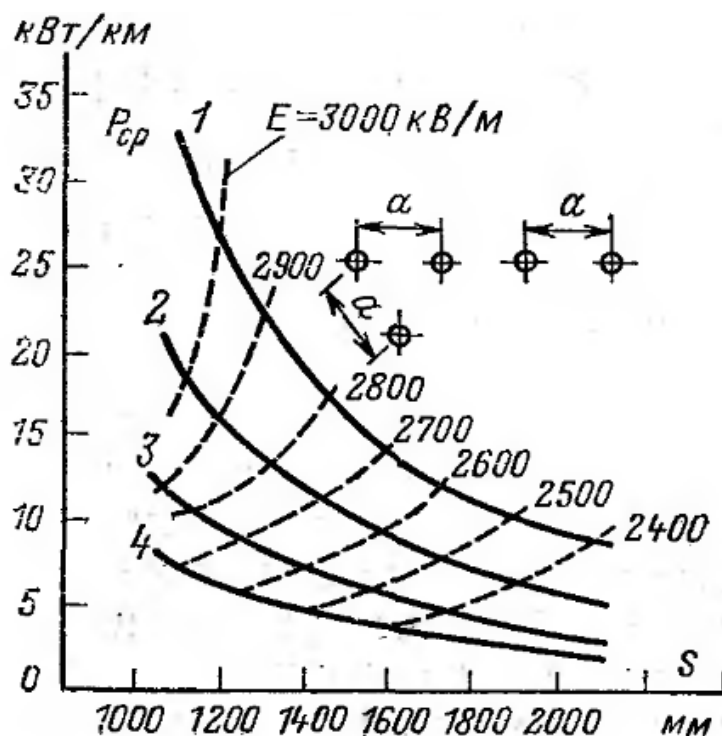


Рис. 5.4. Среднегодовая мощность потерь на корону $P_{\text{ср}}$ (сплошные линии) и напряженность поля на поверхности провода (пунктирные линии) для фазы, состоящей из одного, двух, трех и четырех проводов, в зависимости от полного сечения фазы

На рис. 5.5 приведена зависимость напряженности электрического поля на поверхности провода линии электропередачи 500 кВ от расстояния между расщепленными проводами.

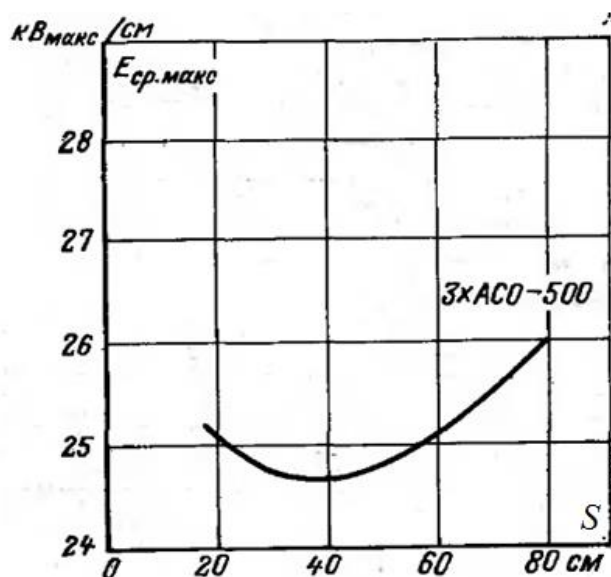


Рис. 5.5. Зависимость максимальной напряженности электрического поля $E_{ср.макс}$ от расстояния между проводами в расщепленной фазе для линии 500 кВ

Для рассматриваемых конкретных условий наименьшая напряженность будет при расстояниях между проводами около 40 см. При других параметрах электропередачи минимальное значение напряженности может быть, как при больших, так и при меньших расстояниях между расщепленными проводами. С увеличением расстояния между расщепленными проводами напряженность электрического поля возрастает по прямой линии с относительно небольшим углом наклона по отношению к оси абсцисс. Это означает, что на линиях электропередачи 330...500 кВ допустимо, в случае необходимости, увеличение расстояний между расщепленными проводами при сравнительно небольшом росте потерь на корону.

Увеличение расстояния между расщепленными проводами дает возможность уменьшить реактивное сопротивление линии и увеличить ее пропускную способность.

В процессе проектирования дальних электропередач минимально допустимые расстояния между фазами определяются в соответствии с требованиями координации изоляции, а сечение проводов выбирается по предельно допустимым экономическим токовым нагрузкам. При выборе сечения проводов технико-экономическое сравнение различных вариантов производится с учетом потерь энергии на корону. Одновре-

менно проверяется соответствие полученных в результате расчета параметров линии допустимым по условиям радиопомех напряженностям электрического поля на поверхности проводов, которые, как отмечалось, должны быть не менее чем на 10 % ниже начальных градиентов общей короны.

Часто провода, выбранные по предельно допустимым экономическим токовым нагрузкам, и расстояния между фазами, рассчитанные по условиям координации изоляции, одновременно удовлетворяют требованиям, которые предъявляются к параметрам линии по условиям коронирования. В то же время при относительно небольшой нагрузке и выборе небольших сечений проводов проектируемых линий, например, межсистемных связей, напряженность электрического поля достигает таких значений, при которых на проводах может возникнуть общая корона. В таких случаях для снижения рабочей напряженности электрического поля, при неизменном сечении фазы, может быть предусмотрено большее количество расщепленных проводов, увеличение расстояния между фазами.

Расчет параметров расщепленного провода

Когда напряженность электрического поля на поверхности проводника в воздухе превышает 0,2...0,3 МВ/м, возникают коронные разряды, дополнительные потери энергии и излучение, вызывающее радиопомехи. Для их ограничения необходимо, чтобы напряженность электрического поля на поверхности проводника не превосходила 0,18...0,15 МВ/м.

Для сверхвысоких напряжений это достигается за счет расщепления проводов в фазе, а также увеличения расстояния между фазами. Идея применения нескольких проводов в фазе ВЛ принадлежит академику В.Ф. Миткевичу. Наиболее целесообразно расположение составляющих расщепленного провода в вершинах правильного многоугольника (рис. 5.6), поскольку при этом заряды на всех составляющих одинаковы. Соответственно одинаковы и напряженность поля на всех составляющих, и ток, протекающий по всем составляющим. Основными параметрами расщепленного провода являются: число составляющих n , их радиус r_0 и радиус расщепления r_p ($r_p \gg r_0$)

Рассматривая систему проводов в пучке расщепленной фазы как один расщепленный провод, можно определить его эквивалентный радиус r , т. е. радиус такого одиночного провода, который при том же потенциале имеет тот же заряд q :

$$r_3 = r_p \sqrt[n]{\frac{n r_0}{r_p}}. \quad (5.18)$$

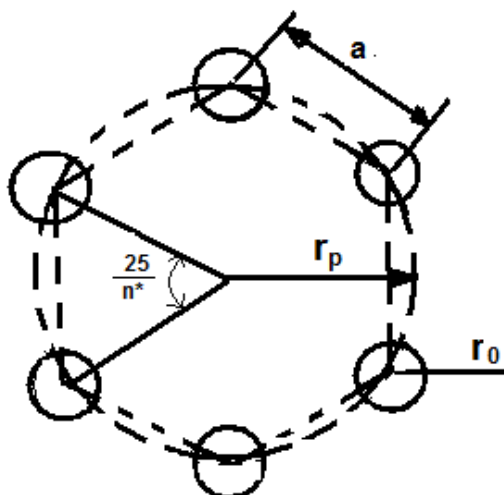


Рис. 5.6. Провод, расщепленный на шесть составляющих

Однако одиночный провод с радиусом r_0 тождественен расщепленному только по емкости. Что касается других параметров расщепленного и одиночного эквивалентного проводов, то они существенно различны. При увеличении числа составляющих n эквивалентный радиус r_0 приближается к радиусу расщепления r_p . Поэтому чем больше n , тем сильнее влияет изменение радиуса расщепления r_p на величину эквивалентного радиуса r_0 . Расщепление проводов снижает реактивное сопротивление линии и повышает пропускную способность линии. Для линии 330...400 кВ провода расщепляют на 2–3 составляющих, для 500 кВ – на 3–4, для 750 кВ – на 4–5. Для линий 1000...1500 кВ число составляющих может колебаться от 6 до 12. Следует отметить, что доля стоимости проводов и общей стоимости воздушных линий для 500...750 кВ составляет 40...50 %, а для высших классов напряжения еще больше. Поэтому от рационального выбора конструкции проводов во многом зависит экономичность линий электропередачи сверхвысокого напряжения.

Одним из факторов, определяющих экономичность линий электропередач, являются потери на корону. Расщепление фаз на составляющие позволяет радикально уменьшить потери на корону за счет увеличения начального напряжения общей короны. Для критического напряжения короны

$$U_k = \frac{2\pi\varepsilon_0 n r_0 E_k}{C \left[1 + (n-1) \frac{r_0}{r_p} \right]} \quad [\text{кВ}]; \quad (5.19)$$

$$E_k = 16,5\sqrt{2}m\delta \left[1 + \frac{0,62}{\delta^{0,32} (nr_0)^{0,38}} \right] \left[\frac{\text{кВ}}{\text{см}} \right], \quad (5.20)$$

где n – число составляющих проводов в фазе; r_0 – радиус составляющего провода; C – емкость фазы; r_p – радиус расщепления; m – коэффициент негладкости провода (в среднем $m = 0,82 \dots 0,85$); δ – относительная плотность воздуха $\left(\delta = \frac{0,382\beta}{273+t} \right)$.

Из уравнения (5.19) видно, что U_k определяется произведением $n \cdot r_0$, поскольку раздельное изменение этих величин оказывает незначительное влияние на U_k . Параметры n , r_0 , r_p полностью определяют условие возникновения коронного разряда на проводах.

Загрязнение провода и повреждение его поверхности при монтаже вызывает значительное местное (локальное) повышение напряженности поля по сравнению с расчетной величиной.

В [3] предложена методика оценки оптимальных величин n и r_0 исходя из оптимальных значений плотности тока j_3 и степени ограничения коронного разряда, характеризуемой отношением рабочего напряжения к критическому напряжению короны $\left(\frac{\bar{U}_\phi}{\bar{U}_k} \right)$ по формулам:

$$r_{0\text{опт}} = 2\varepsilon_0 v_B \left(\frac{P}{P_H} \right) \frac{1}{k_3 j_3 \cos \varphi} \left[E_k \left(\frac{U_\phi}{U_k} \right)_{\text{опт}} - \frac{U_\phi C}{2\pi\varepsilon_0 r_p} \right], \quad (5.21)$$

$$n_{\text{опт}} = \frac{U_\phi}{2\varepsilon_0 v_B} \cdot \left(\frac{P}{P_H} \right) \cdot \frac{C}{2\pi\varepsilon_0} \cdot \frac{k_3 j_3 \cos \varphi}{\left[E_k \left(\frac{U_\phi}{U_k} \right)_{\text{опт}} - \frac{U_0 C}{2\pi\varepsilon_0 r_p} \right]}, \quad (5.22)$$

где P_H – натуральная мощность линии, $P_H = \frac{3\bar{U}_\phi^2}{z_B}$; P – расчетная передаваемая мощность линии; E_k – критическая напряженность короны; $\cos \varphi$ – коэффициент мощности по линии; r_p – радиус расщепления; k_3 – коэффициент заполнения провода активным материалом; $v_B = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}}$ –

скорость распространения электромагнитной волны.

Полученные зависимости позволили ликвидировать одно из важнейших препятствий на пути дальнейшего повышения номинального

напряжения воздушных линий электропередач, в особенности для линий переменного тока, оптимальное число составляющих, которых значительно больше, чем для линий постоянного тока.

Исходя из условия отсутствия коронирования, радиус расщепления r_p , при котором достигается этот минимум, равен:

$$r_{p1} = 3,3(n \cdot r_0)_{\text{опт}}. \quad (5.23)$$

Минимум (r_0 и n)_{опт} определяет минимальную поверхность расщепления провода, т. е. весовые и ветровые нагрузки минимальны, минимальна и стоимость опор и фундаментов. Натуральная мощность может регулироваться в широких пределах изменением радиуса расщепления проводов r_p . При этом увеличение радиуса расщепления сверх r_{p1} приводит к заметному уменьшению удельных приведенных затрат.

Радиус расщепления проводов линий переменного тока всех классов напряжения выбирается равным

$$r_{p2} = 0,05 \cdot U_{\text{ном}}, \quad (5.24)$$

где r_p – радиус расщепления, см; $U_{\text{ном}}$ – рабочее напряжение линии, кВ.

Снижение удельных приведенных затрат продолжается и при дальнейшем увеличении r_p , что может быть определено по формуле:

$$r_{p3} = 0,13 \cdot U_{\text{ном}}. \quad (5.25)$$

Таким образом, в зависимости от передаваемой мощности и системных условий эксплуатации радиус расщепления проводов линии может быть выбран в диапазоне от r_{p2} до r_{p3} . Конечно, соответственно будут изменяться число и радиус составляющих (r_0 и n).

Для приближенной оценки волнового сопротивления воздушной линии с расщепленными проводами может быть использована упрощенная формула:

$$z_B = 60 \ln \left(\frac{\sqrt[3]{2D}}{r_3} \right), \quad (5.26)$$

где D – расстояние между осями симметрии расщепленных проводов (расстояние между фазами).

Натуральная мощность линии обратно пропорциональна z_B :

$$P_H = 3 \frac{U_\phi^2}{z_B} = \frac{U_\phi^2}{20 \ln \left(\frac{\sqrt[3]{2D}}{z_B} \right)}. \quad (5.27)$$

Таким образом, для увеличения передаваемой натуральной мощности необходимо уменьшать z_B , что возможно при увеличении радиуса

расщепления r_p , числа составляющих n и их радиуса r_0 , а также уменьшении расстояния между фазами D .

5.2. Экспериментальная часть

Цель: исследование влияния различных геометрических параметров воздушных ЛЭП сверхвысокого напряжения (СВН) на напряжение возникновения коронного разряда.

Для выполнения экспериментальной части необходимо:

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и правилами ТБ при проведении данной работы.

2. Определить относительную плотность воздуха во время проведения экспериментов.

3. Перед входом в высоковольтное помещение убедиться в отсутствии напряжения на элементах и в наличии заземления (присоединены заземляющие ножи).

4. Перед работой с высоковольтной установкой снять остаточное напряжение на конденсаторах заземляющей штангой, при этом штангу необходимо держать ниже указательного кольца.

5. Для проведения экспериментов собрать установку, согласно схеме проводимого опыта, в зависимости от типа и количества проводов (рис. 5.7).

6. Настроить средство измерения (осциллограф) для проведения опытов по указанию преподавателя.

7. Включить силовую установку. Напряжение подается при нажатии кнопки «ПУСК».

8. Повысить напряжение на $TP I$ до момента появления двух линий на осциллографе, а значение напряжения начала коронирования брать с вольтметра V .

9. Выполнить расщепление фазы на два провода ($n = 2$).

10. Измерить напряжение начала коронирования U_k в зависимости от радиуса расщепления r_p , т. е. $U_k = f(r_p)$, для составляющих радиусом $r_0 = 0,6$ мм. Данные занести в табл. 5.6.

11. Выполнить измерения для $r_0 = 1,25$ мм. Данные занести в табл. 5.6.

12. Выполнить измерения для $r_0 = 2,5$ мм. Данные занести в табл. 5.6.

13. Выполнить пункты 9–13 для расщепления на три провода ($n = 3$).

Электрическая схема проведения экспериментов приведена на **рис. 5.7**.

При подготовке отчета необходимо:

1. Построить зависимости $U_k = f(r_p)$ для разных r_0 при $n = 2$ на одном графике.

2. Построить зависимости $U_k = f(r_p)$ для разных r_0 при $n = 3$ на одном графике, но не вместе с п. 1.
3. Определить из графиков оптимальные значения $r_{p \text{ опт}}$ и занести их в табл. 5.6.

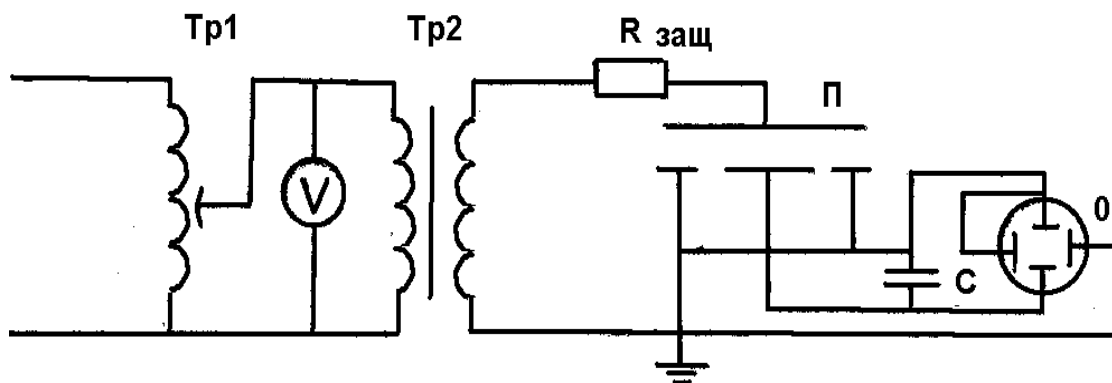


Рис. 5.7. Электрическая схема для определения режимов коронирования:
 Tr1 – трансформатор; Tr2 – высоковольтный испытательный трансформатор;
 V – измерительный вольтметр; П – коронирующий провод;
 C – емкостный делитель; O – электронный осциллограф

Таблица 5.6

Параметры коронирующего провода

| $n = 2$ | | | $n = 3$ | | |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| $r_{p \text{ опт}}$ | $U_{k \text{ опт}}$ | $E_{k \text{ опт}}$ | $r_{p \text{ опт}}$ | $U_{k \text{ опт}}$ | $E_{k \text{ опт}}$ |
| см | кВ | кВ/см | см | кВ | кВ/см |
| | | | | | |

4. Для оптимальных значений $r_{p \text{ опт}}$ и U_k по формуле (5.20) определить E_k и занести в табл. 5.7.
5. Построить зависимости $r_{p \text{ опт}} = f(nr_0)$ для $n = 2$ и $n = 3$ на одном графике.
6. Построить зависимости $U_k = f(r_{p \text{ опт}})$ и $E_k = f(r_{p \text{ опт}})$ для $n = 2$ и $n = 3$.
7. Сделать выводы по каждому графику.
8. Перечислить, от чего еще зависит напряжение возникновения короны, кроме факторов, исследованных в данной работе.

Контрольные вопросы

1. Что определяет коэффициент гладкости провода?
2. Какие методы применяются для ограничения напряженности электрического поля для линий сверхвысокого напряжения?

3. Какой прием позволяет радикально уменьшить потери на корону за счет увеличения начального напряжения общей короны?
4. Чем в процессе проектирования дальних электропередач определяются минимально допустимые расстояния между фазами?
5. Каким образом витая форма провода влияет на формирование потерь на корону?

Отчет по экспериментальной части выполняется на листах белой бумаги формата А4 в строгом соответствии с СТО ТПУ. На защите отчета необходимо быть готовыми строить ответы на основе как изученного теоретического материала, так и результатов, полученных лично подгруппой в ходе выполнения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Левитов В.И. Корона переменного тока / В.И. Левитов. – Москва: 1969. – 250 с.
2. Богданова Н.Б. Начальные напряжения короны на проводах / Н.Б. Богданова // Электроэнергетика. – 1963. – № 7. – С. 34–39.
3. Верещагин И.П. Коронный разряд в аппаратах электронно-ионной технологии / И.П. Верещагин. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 324 с.
4. Тиходеев Н.Н. Передача электрической энергии / Н.Н. Тиходеев. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1984. – 248 с.
5. Александров Г.Н. К методике выбора расщепленных проводов линий сверхвысокого напряжения / Г.Н. Александров // Электричество. – 1978. – № 7. – С. 3–12.

Глава 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ КОРОНИРОВАНИИ ЛЭП СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

6.1. Теория процесса

Годовые потери энергии на корону суммируются с потерями на нагрев проводов и при прочих одинаковых условиях уменьшают предельные экономические токовые нагрузки и КПД линий электропередачи 330...500 кВ. Потери на корону зависят от типа и диаметра проводов, состояния их поверхности, а также от габаритов и рабочего напряжения электропередачи. Кроме влияния параметров, характеризующих напряженность электрического поля, необходимо отметить такой существенный фактор, как зависимость годовых потерь на корону от метеорологических условий вдоль трассы линии. Результаты измерений показали, что при одних и тех же параметрах линии электропередачи годовые потери энергии на корону в зависимости от условий погоды меняются в широких пределах. Для учета всех перечисленных факторов в научно-исследовательских институтах РФ было организовано проведение разнообразных и продолжительных измерений потерь на корону, которые потребовали сооружения экспериментальных установок и опытных участков линий электропередачи с проводами различных типов и сложной аппаратурой для измерений. В течение ряда лет измерения производятся на одиночных и расщепленных проводах, находившихся длительное время в эксплуатации или установленных на опытных линиях за год до начала испытаний. Кроме того, выполнены непрерывные и систематические измерения потерь на корону на действующих линиях 500 кВ с проводами 3*АСО-500 и 3*АСО-330.

Измерения потерь на корону также систематически производятся в ряде зарубежных стран.

Результаты измерений классифицировались по следующим видам погоды:

- хорошая погода без осадков;
- дождь;
- сухой снег;
- мокрый снег;
- изморозь.

Измерения для каждого вида погоды производились многократно, после чего полученные результаты усреднялись.

Годовые потери энергии при хорошей погоде, сухом снеге и изморози определялись как произведение числа часов этого вида погоды и средних потерь мощности, которые, в свою очередь, были найдены в результате измерений на опытных пролетах. Потери на корону при дожде и мокром снеге, имеющие значительный удельный вес в общем балансе потерь, определялись путем суммирования потерь энергии для ряда областей интенсивностей осадков:

$$A_d = \sum A_{id} = \sum P_{id} \Delta h_i, \quad (6.1)$$

где A_{id} – потери энергии; P_{id} – потери мощности; Δh_i – число часов, соответствующее i -й интенсивности дождя и мокрого снега.

Для правильной оценки потерь энергии учитывалось не общее количество выпавших осадков, а продолжительность осадков разной интенсивности и зависимость потерь мощности от интенсивности осадков при различных значениях напряженности электрического поля на проводах.

Несомненно, что годовые потери энергии на корону для выбранной конструкции провода наиболее точно могут быть определены только экспериментальным путем. Для решения конкретных задач, возникающих при проектировании, была разработана методика пересчета по электростатическим градиентам результатов измерений на опытных линиях для возникающих при проектировании случаев применения проводов других диаметров в разных метеорологических условиях. Методика основана на допущении о том, что на сравниваемых между собой опытных пролетах и проектируемых линиях сверхвысокого напряжения с проводами больших сечений критический градиент короны практически остается одинаковым.

При выполнении этого условия потери мощности на корону P_1 и P_2 на проводах с радиусами r_{01} и r_{02} будут определяться как квадраты радиусов этих проводов:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{r_{01}^2}{r_{02}^2}. \quad (6.2)$$

В случае расщепленных проводов уравнение (6.2) записывается следующим образом:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1 r_{01}^2}{n_2 r_{02}^2}, \quad (6.3)$$

где n_1 и n_2 – количество проводов в расщепленных фазах сравниваемых между собой линий.

Таким образом, метод пересчета состоит в приведении потерь мощности на корону, отнесенных к одиночному проводу радиусом

$r_0 = 1$ см, к зависимости от максимальной напряженности электрического поля на поверхности провода:

$$\frac{P}{nr_0^2} = f\left(\frac{E_M}{\delta}\right). \quad (6.4)$$

В соответствии с описанной методикой в работах Энергетического института имени Г.М. Кржижановского (ЭНИН) даны обобщенные характеристики, позволяющие не только приближенно определить потери энергии на корону, но и установить их соотношение в процессе рассмотрения возможных вариантов выполнения линии электропередачи с проводами различного диаметра и различным количеством расщепленных проводов в фазе при тех или иных климатических условиях. В обобщенных характеристиках (рис. 6.1), полученных в ЭНИН, приведены уровни потерь энергии на корону в зависимости от максимальной напряженности электрического поля. Потери даны на одну фазу.

Характеристики построены для различных географических районов, различающихся годовым числом часов сухого снега, дождя и мокрого снега.

Определение годовых потерь энергии на корону производится в такой последовательности. Определяется максимальная напряженность электрического поля крайней $E_{м.кр}$ и средней фаз $E_{м.ср}$. Полученные значения напряженностей дают возможность по кривым рис. 6.1 определить для заданных метеорологических условий проектируемой линии приведенные к единичному радиусу годовые потери энергии в каждой фазе.

В трехфазной линии электропередачи годовые потери составят:

$$A_1 = 2A_{кр} + A_{ср}, \quad (6.5)$$

где $A_{кр}$, $A_{ср}$ – величины потерь в крайних и средней фазах.

Затем для определения действительной величины среднегодовых потерь производится пересчет единичных потерь по физическому радиусу и количеству расщепленных проводов в фазе по формуле

$$A_{с.г.} = A_1 nr_0^2. \quad (6.6)$$

Так как линии электропередачи сверхвысокого напряжения практически в течение всего года находятся под напряжением, то годовые потери мощности связаны с потерями энергии равенством

$$P_{с.г.} = \frac{A_{с.г.}}{8760}. \quad (6.7)$$

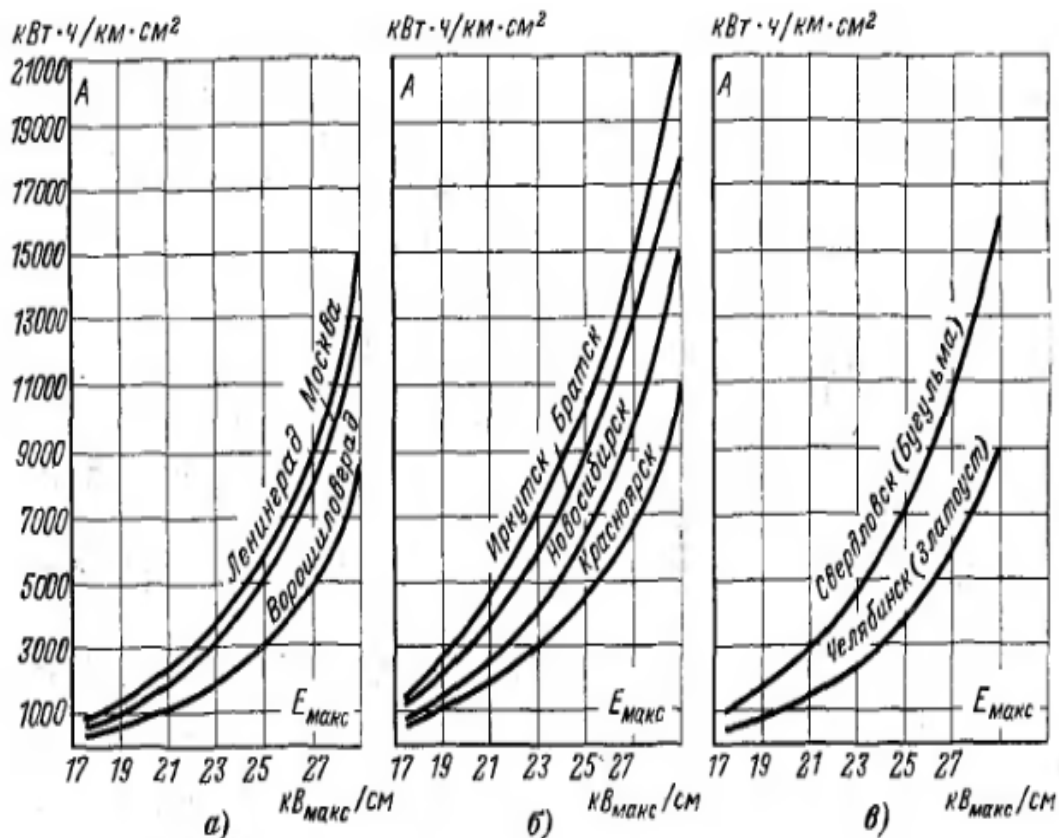


Рис. 6.1. Годовые потери энергии на корону в зависимости от максимальной напряженности электрического поля

В табл. 6.1 приведены среднегодовые потери мощности на корону (кВт/км трехфазной линии) в зависимости от рабочего напряжения для средней полосы европейской части России на линиях электропередачи 330...750 кВ с наиболее распространенными проводами.

Таблица 6.1

Потери мощности на корону (кВт/км)

| Марка провода | Напряжение, кВ | | | | |
|-------------------------------------|----------------|-------|-------|------|-------|
| | 297 | 310 | 330 | 350 | 353 |
| Провод 2ХАСУ-240/40 2ХАСО-300/40 | 2,0 | 2,7 | 3,9 | 5,5 | 6,9 |
| | 1,9 | 2,3 | 3,35 | 4,6 | 5,8 |
| Провод | Напряжение, кВ | | | | |
| | 475 | 490 | 500 | 510 | 525 |
| 3ХАСО-330/40 3ХАСО-400/40 | 4,25 | 5,1 | 5,8 | 6,42 | 7,5 |
| | 3,5 | 4,24 | 4,8 | 5,35 | 6,2 |
| Провод | Напряжение, кВ | | | | |
| | 715 | 733 | 750 | 770 | 787 |
| 4ХАСО-500/60 5ХАСУ-240/30 | 10,4 | 11,36 | 13,75 | 15,7 | 18 |
| | 9,25 | 10,12 | 12,3 | 14 | 15,85 |

Следует указать на некоторые особенности явления коронного разряда. Первая из них заключается в неравномерности суточного распределения потерь. Наибольшие потери на корону наблюдаются в ночные часы (с 22 до 6 ч). На этот период времени, который, как правило, совпадает со временем наименьшей загрузки линий, приходится около 50 % годовых потерь на корону, что объясняется систематическим ухудшением метеорологических условий в ночные часы.

Если дополнительно учесть, что в выходные дни нагрузка линий электропередачи резко понижается, то на время с 6 до 22 ч каждого рабочего дня остается только около трети суточных потерь энергии на корону.

Вторая особенность состоит в том, что потери на корону, непосредственно зависящие от напряженности электрического поля на поверхности проводов, изменяются в очень больших пределах в зависимости от погоды на трассе линии электропередачи.

Влияние метеорологических условий характеризуют данные, приведенные в табл. 6.2, в которой указаны значения составляющих годовых потерь энергии на корону на линиях электропередачи 330...750 кВ для расчетных видов погоды.

Таблица 6.2

Значения составляющих годовых потерь энергии на корону на линиях электропередачи 330...750 кВ для расчетных видов погоды

| ЛЭП | Годовые потери на корону (%) при длительности расчетной погоды в течение года для различных групп погоды | | | |
|-----------------------------|--|-------|-------|----------|
| | Хорошая | Снег | Дождь | Изморозь |
| | 7 235 ч | 800 ч | 500 ч | 225 ч |
| 330 кВ, провод 2ХАСО-300/40 | 29,3 | 13,0 | 28,6 | 29,1 |
| 500 кВ, провод 3ХАСО-400/40 | 29,2 | 12,4 | 28,1 | 30,3 |
| 750 кВ, провод 4ХАСО-600/60 | 35,2 | 12,1 | 26,6 | 26,1 |

В течение года на линиях 330...750 кВ от 52,7 до 58,4 % суммарных потерь энергии на корону регистрируется во время дождя и изморози, несмотря на то, что суммарная продолжительность перечисленных выше видов плохой погоды составляет только 8 %.

Изложенное выше показывает, что регулирование напряжения на линиях электропередачи, позволяющее снизить потери на корону во время плохой погоды, может оказаться экономически целесообразным.

Во время снега, дождя или изморози при неизменном напряжении на линии суммарные потери активной мощности заметно увеличиваются по сравнению с потерями при хорошей погоде, что объясняется значительным возрастанием потерь на корону. Например, на линиях 330...750 кВ при рабочем напряжении равном номинальному диапазон увеличения потерь активной мощности во время плохой погоды характеризуется следующими цифрами: при снеге – от 5 до 14 %; при дожде – от 23 до 47 %; при изморози – от 55 до 107 %.

Выполненные расчеты подтверждают технико-экономическую целесообразность регулирования напряжения не только в зависимости от передаваемой мощности, но и состояния погоды на трассе линии электропередачи, где это позволяет режим объединенной энергосистемы.

Одни только условия экономичности, связанные с уменьшением потерь на корону, позволяют оправдать применение в сети 750 кВ регулирующих устройств, позволяющих регулировать напряжение на линиях электропередачи в зависимости от режимов работы этих линий.

Применение специальных регулирующих устройств оказывается тем более оправданным, если учесть, что с их помощью можно существенно улучшить условия устойчивости энергосистем и условия баланса реактивной мощности.

Разработка автоматических устройств, позволяющих регулировать напряжение на линиях сверхвысокого напряжения с учетом состояния погоды, условий баланса реактивной мощности и других факторов, является самостоятельной важной задачей.

6.2. Экспериментальная часть

Цель: исследование процесса формирования потерь энергии при коронировании ЛЭП сверхвысокого напряжения в зависимости от геометрических параметров расщепленной фазы.

Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой и правилами ТБ при проведении данной работы.
2. Определить относительную плотность воздуха во время проведения экспериментов.
3. Перед входом в высоковольтное помещение убедиться в отсутствии напряжения на элементах и в наличии заземления (присоединены заземляющие ножи).
4. Перед работой с высоковольтной установкой снять остаточное напряжение на конденсаторах заземляющей штангой, при этом штангу необходимо держать ниже указательного кольца.

5. Для проведения экспериментов собрать установку, согласно схеме проводимого опыта, в зависимости от типа и количества проводов (рис. 6.7).

6. Настроить средство измерения (осциллограф) для проведения опытов по указанию преподавателя.

7. Включить силовую установку в электрошите установки. Напряжение подается при нажатии кнопки «ПУСК».

8. Повысить напряжение на трансформаторе Tr I (рис. 6.7) до момента появления двух линий на осциллографе, а значение напряжения начала коронирования брать с вольтметра V .

9. Расщепить фазы на два провода ($n = 2$).

10. Отрегулировать чувствительность осциллографа по напряжению U и току I так, чтобы при заданном значении напряжения коронирования ($U_k = 60$ кВ) осциллограмма вольт-кулоновой характеристики занимала весь экран. Эта чувствительность должна быть неизменной во всех экспериментах.

11. По п. 8 снять вольт-кулоновые характеристики для каждого радиуса расщепления с целью определения площади, ограниченной вольт-кулоновой характеристикой.

12. По п. 8 провести измерения для трех радиусов расщепленной фазы.

Результаты по пп. 2, 3 занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Потери энергии при коронировании

| $r_{\text{расщ}}, \text{ см}$ | $P, \text{ отн. едн.}$ | | | | | |
|-------------------------------|------------------------|--|--|---------|--|--|
| | $n = 2$ | | | $n = 3$ | | |
| | | | | | | |
| 0,5 | | | | | | |
| 1,0 | | | | | | |
| 1,5 | | | | | | |
| 2,0 | | | | | | |
| 2,5 | | | | | | |
| 3,0 | | | | | | |
| 3,5 | | | | | | |
| 4,0 | | | | | | |
| 5,0 | | | | | | |
| 6,0 | | | | | | |

Далее необходимо выполнить:

1. Исследование влияния на потери энергии при коронировании геометрических параметров расщепленной фазы ЛЭП:
 - радиуса расщепления;
 - радиуса составляющих;
 - числа составляющих;
 - фазного напряжения.
2. Анализ результатов для оптимизации параметров фазы.

Контрольные вопросы

1. Какие электрофизические процессы приводят к формированию потерь на корону?
2. От каких эксплуатационных характеристик зависит величина потерь на корону?
3. От чего зависят годовые потери энергии на корону при максимальной напряженности электрического поля?
4. В чем заключаются метрологические особенности короны, кардинально влияющие на уровень потерь?
5. Каким образом геометрические параметры расщепленной фазы влияют на формирование потерь на корону?

Отчет по экспериментальной части выполняется на листах белой бумаги формата А4 в строгом соответствии с СТО ТПУ. На защите отчета необходимо быть готовыми строить ответы на основе как изученного теоретического материала, так и результатов, полученных лично подгруппой в ходе выполнения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Александров Г.Н. К методике выбора расщепленных проводов линий сверхвысокого напряжения / Г.Н. Александров // Электричество. – № 7. – 1978. – С. 3–12.
2. Левитов В.И. Корона переменного тока / В.И. Левитов. – Москва : Энергия, 1969. – 250 с.
3. Важов В.В. Расчет проводов электропередачи сверхвысокого напряжения / В.В. Важов // Методические указания. – Томск : ТПУ, 1985. – 15 с.
4. Райзер Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – Москва : Наука, 1987. – 592 с.
5. Техника высоких напряжений / под ред. М.В. Костенко. – Москва : Высшая школа, 1973. – 528 с.

Глава 7

РЕГУЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ДЛИННЫХ ГИРЛЯНДАХ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

7.1. Теория процесса

На ЛЭП СВН для подвески проводов применяются тарелочные и стержневые изоляторы. Последние по ряду причин не нашли пока широкого распространения.

Тарелочные изоляторы для подвески проводов соединяются в последовательные цепочки (гирлянды). Такая гирлянда находится в сильно неоднородном поле между проводом и опорой, поэтому напряжение вдоль неё распределяется неравномерно. Наибольшее падение напряжения оказывается на первом изоляторе, расположенном в наиболее сильном поле вблизи провода. Наименьшее падение – в средней части гирлянды (рис. 7.1).

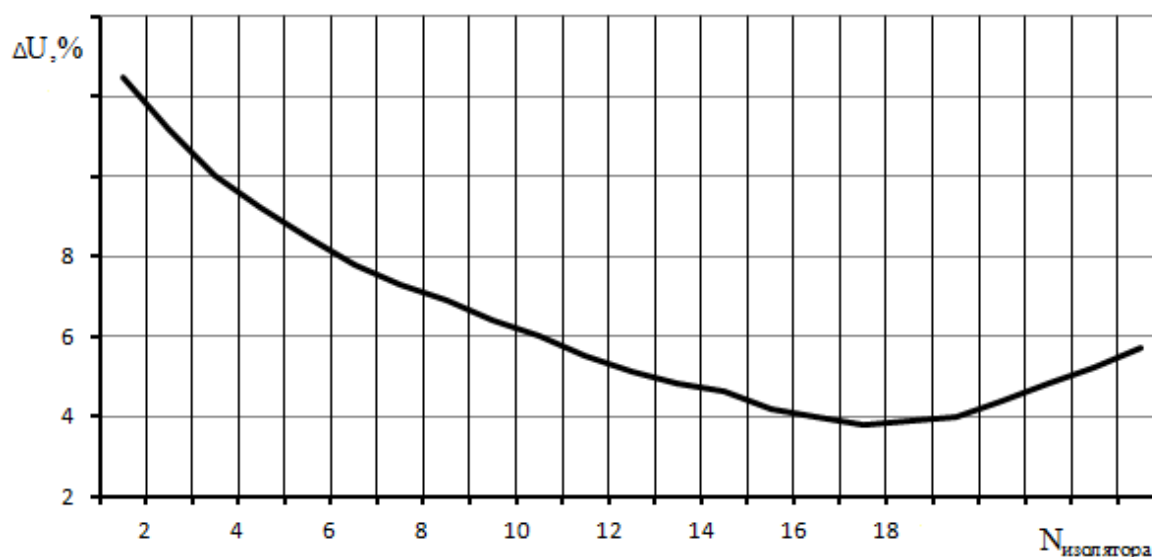


Рис. 7.1. Распределение напряжения (в %) вдоль гирлянды из изоляторов Пб-12 линии класса 00 кВ

Каждый отдельный изолятор – это конденсатор. Чем больше ёмкость такого конденсатора, тем больше ёмкостный ток вдоль гирлянды, тем более равномерно распределяется напряжение вдоль гирлянды. Схема замещения гирлянды изоляторов приведена на рис. 7.2.

Величина ёмкости гирлянды оказывается одного порядка с ёмкостью провода на траверсу. При этом напряжение вдоль гирлянды рас-

пределяется неравномерно, причём степень неравномерности увеличивается при увеличении длины гирлянды.

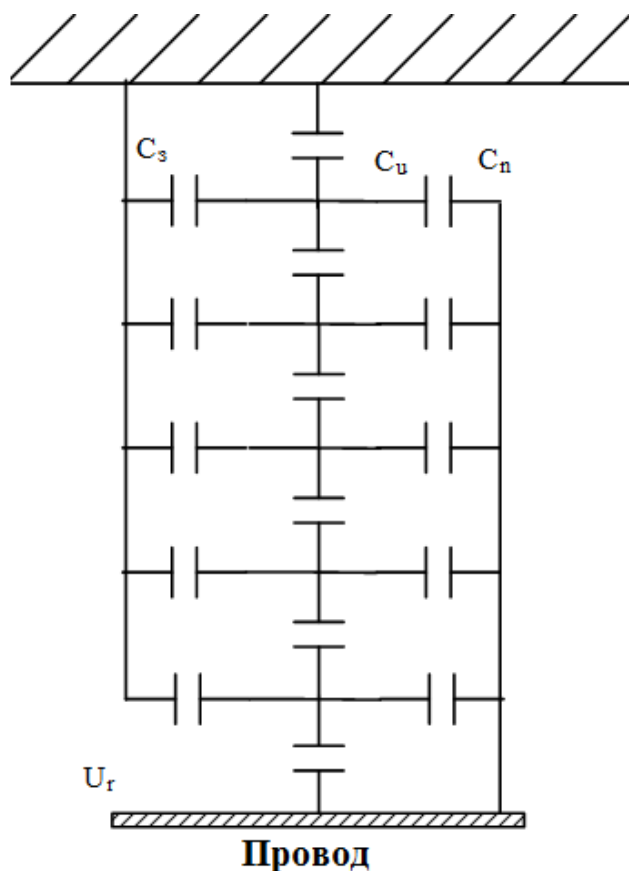


Рис. 7.2. Схема замещения поля гирлянды воздушной линии:

C_u – собственная ёмкость изолятора;

C_3 – частичная ёмкость сцепной арматуры на землю; U_r – напряжение на гирлянде;

C_n – частичная ёмкость сцепной арматуры на провод

В связи с этим, как правило, распределение напряжения вдоль гирлянды изучается экспериментально с помощью шаровых разрядников с малым диаметром шаров (чтобы ёмкость разрядника была значительно меньше собственной ёмкости изолятора). Подобные исследования выполнены в лаборатории техники высоких напряжений Санкт-Петербургского технического университета для гирлянд с числом изоляторов до 50, что соответствует линиям на $U = 1500$ кВ.

Для выравнивания падения напряжения вдоль гирлянды изоляторов могут быть применены различные способы или комбинация нескольких из них. Например, применение выравнивающих экранов, нанесение полупроводящих покрытий на поверхность изолятора, увеличение собственной ёмкости одиночного изолятора, расщепление фазы линии, расщепление гирлянды изоляторов, изменение расстояния

от нижнего изолятора до верхних составляющих расщепленного провода и т. д. Рассмотрим некоторые из них.

Изменение расстояния от нижнего изолятора гирлянды до верхних составляющих расщеплённого провода изменяет частичную ёмкость C_3 ближайших к проводу изоляторов, что позволяет регулировать в некоторых пределах распределение напряжения на первых изоляторах. Этот факт позволяет отказаться от спецэкранов для улучшения распределения напряжения по гирлянде. В качестве независимой переменной используется расстояние a от оси шарнира (пестик нижнего изолятора) до оси верхних составляющих расщепленных проводов (рис. 7.3).

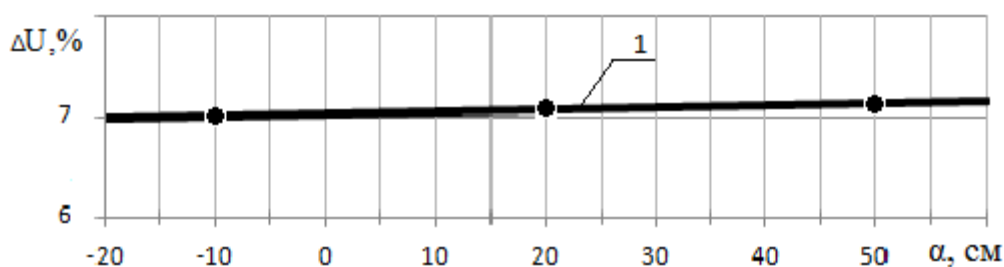


Рис. 7.3. Зависимость падения напряжения на первом изоляторе гирлянды ВЛ 750 кВ от высоты подвески:

a – расстояние от оси шарнира до оси верхних составляющих расщепленных проводов; 1 – первый изолятор от провода

Следует заметить, что более глубокое утопление нижнего изолятора гирлянды в пучок расщеплённого провода нецелесообразно, т. к. уменьшение падения напряжения на нижнем изоляторе сопровождается повышением напряжения на следующем изоляторе.

Одним из способов уменьшения падения напряжения на нижних изоляторах гирлянды может служить расщепление нижней части гирлянды, т. е. подвеска вместо одного параллельно двух изоляторов. При этом увеличивается собственная ёмкость изоляторов ($2C_u$ вместо C_u) и уменьшается падение напряжения на изоляторах в расщепленной части гирлянды. Но такое решение приводит к увеличению падения напряжения на первом изоляторе после расщепления, что приводит к необходимости оптимизации длины расщепленной части гирлянды.

Для выравнивания напряжения вдоль гирлянды могут применяться экраны. Применение экранов сильно удорожает линию, но до напряжения 330...500 кВ, когда ещё можно применять одиночные экраны, с этим мирятся.

Однако при $U=750$ кВ одиночный экран сам является источником стримерной короны, и его приходится расщеплять. Установка расщепленных экранов на каждой гирлянде приводит к непомерному возрастанию стоимости ЛЭП.

При глубоком расщеплении фазы, имеющем место при $U=750$ кВ, сам расщепленный провод выполняет функции экрана.

Это обстоятельство позволило отказаться от применения экранов на ЛЭП-750 кВ и выше. Увеличение радиуса расщепления проводов приводит к существенному выравниванию распределения напряжения вдоль гирлянды и, соответственно, к уменьшению падения напряжения на первом от провода изоляторах, что иногда позволяет отказаться от расщепления гирлянды.

7.2. Экспериментальная часть

Цель: ознакомиться со способами регулирования напряжения вдоль гирлянды подвесных изоляторов при сверхвысоких напряжениях и определить влияние некоторых из них.

Измерение распределения напряжения вдоль гирлянды производится при помощи измерительного шарового разрядника. Напряжение, подводимое к гирлянде, повышается до тех пор, пока не произойдет пробой измерительного шарового разрядника. Для каждого изолятора производится не менее трёх измерений пробивного напряжения U , из которых определяется среднее значение. При помощи градуировочной кривой (или коэффициента трансформации) пробивное напряжение приводится к высокой стороне трансформатора U . Относительная величина напряжения, приходящая на данный элемент гирлянды, определяется по формуле

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U_k}{\bar{U}} \cdot 100 \cdot \delta, \quad (7.1)$$

где ΔU_k – пробивное напряжение на шаровом разряднике; \bar{U} – напряжение, приложенное к гирлянде в кВ; δ – относительная плотность воздуха;

$$\delta = \frac{0,386 \cdot P}{273 + t}. \quad (7.2)$$

Проверка правильности проведённых измерений производится по формуле

$$\Sigma \Delta U \% = 100 \%. \quad (7.3)$$

Электрическая схема проведения экспериментов приведена на **рис. 7.4**. Исследование путей регулирования напряжения вдоль гирлянды изоляторов проводить в зависимости:

- от длины гирлянды;
- радиуса расщепления провода фазы;
- степени расщепления гирлянды.

7.2.1. Исследование одиночной гирлянды

1. В ходе экспериментов производится последовательное измерение распределения напряжения вдоль гирлянды, содержащей 9, 7 и 5 изоляторов соответственно. К гирлянде крепится одиночный провод. Полученные результаты заносятся в табл. 7.1.

2. На гирлянде закрепляется экран и производится измерение распределения напряжения вдоль гирлянды. Результаты заносятся в табл. 7.2.

Далее на гирлянде из 7 изоляторов закрепляется расщеплённый провод. Радиус расщепления измеряется при 3 см и 30 см. Результаты заносятся в табл. 7.3.

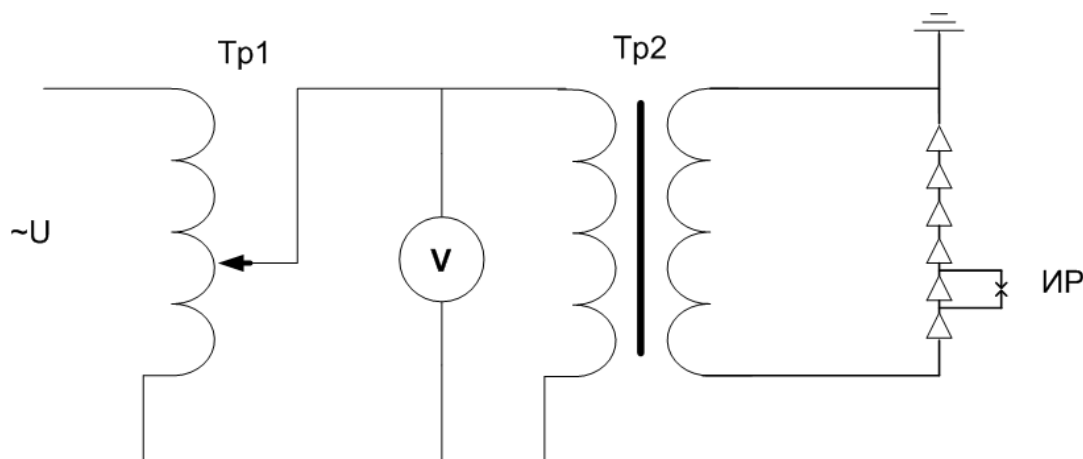


Рис. 7.4. Электрическая схема для проведения экспериментов:

Tr 1 – автотрансформатор; Tr 2 – высоковольтный испытательный трансформатор;

V – измерительный вольтметр; Г – гирлянда изоляторов;

ИР – измерительный шаровой разрядник

7.2.2. Исследование расщеплённой гирлянды

Эксперименты проводятся на гирлянде, состоящей из 7 изоляторов, к которой крепится одиночный провод.

1. Первый изолятор расщепляется. Измеряется распределение напряжения вдоль гирлянды. Результаты заносятся в табл. 7.3.

2. Первый и второй изолятор расщепляются. Измеряется распределение напряжения вдоль гирлянды. Результаты заносятся в табл. 7.3.

3. Первый, второй и третий изоляторы расщепляются. Измеряется распределение напряжения вдоль гирлянды. Результаты заносятся в табл. 7.3.

4. Ставится двойная гирлянда. Измеряется распределение напряжения вдоль гирлянды. Результаты заносятся в табл. 7.3.

По полученным в эксперименте данным при помощи уравнения (7.1) рассчитать $U\%$ и занести в соответствующие таблицы. Построить графики распределения напряжения вдоль гирлянды.

Контрольные вопросы

1. Какие способы применяются для выравнивания падения напряжения вдоль гирлянды изоляторов?
2. В чем заключается технический прием «расщепление нижней части гирлянды»?
3. Какой способ регулирования напряжения вдоль гирлянды позволяет отказаться от расщепления гирлянды?
4. В чем заключается проблема использования одиночного экрана на линиях с напряжением 750 кВ?
5. Какие параметры влияют на распределение напряжения вдоль гирлянды?

Таблица 7.1

Результат регулирования напряжения вдоль гирлянды

| № изолятора | 5 изоляторов | | | | | 7 изоляторов | | | | | 9 изоляторов | | | | |
|-------------|--------------|---|---|-----------|------------|--------------|---|---|-----------|------------|--------------|---|---|-----------|------------|
| | U, кВ | | | \bar{U} | ΔU | U, кВ | | | \bar{U} | ΔU | U, кВ | | | \bar{U} | ΔU |
| | 1 | 2 | 3 | кВ | % | 1 | 2 | 3 | кВ | % | 1 | 2 | 3 | кВ | % |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

Таблица 7.2

Результат регулирования напряжения вдоль гирлянды

| № изолятора | Экран | | | | | r_{p1} | | | | | r_{p2} | | | | |
|-------------|-------|---|---|-----------|------------|----------|---|---|-----------|------------|----------|---|---|-----------|------------|
| | U, кВ | | | \bar{U} | ΔU | U, кВ | | | \bar{U} | ΔU | U, кВ | | | \bar{U} | ΔU |
| | 1 | 2 | 3 | кВ | % | 1 | 2 | 3 | кВ | % | 1 | 2 | 3 | кВ | % |
| | | | | | | | | | | | | | | | |

Таблица 7.3

Результат регулирования напряжения вдоль гирлянды

| № изолятора | Расщеп. изолятор № 1 | | | | Расщеп. изолятор № 2 | | | | Расщеп. изолятор № 3 | | | | Двойная гирлянда | | | |
|-------------|----------------------|---|-----------|------------|----------------------|---|-----------|------------|----------------------|---|-----------|------------|------------------|---|-----------|------------|
| | U, кВ | | \bar{U} | ΔU | U, кВ | | \bar{U} | ΔU | U, кВ | | \bar{U} | ΔU | U, кВ | | \bar{U} | ΔU |
| | 1 | 2 | кВ | % | 1 | 2 | кВ | % | 1 | 2 | кВ | % | 1 | 2 | кВ | % |
| | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

Отчет по экспериментальной части выполняется на листах белой бумаги формата А4 в строгом соответствии с СТО ТПУ. На защите отчета необходимо быть готовыми строить ответы на основе как изученного теоретического материала, так и результатов, полученных лично подгруппой в ходе выполнения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Важов В.Ф. Расчет проводов электропередачи сверхвысокого напряжения / В.Ф. Важов // Методические указания. – Томск : ТПУ, 1985. – 15 с.
2. Техника высоких напряжений / под ред. М.В. Костенко. – Москва : Высшая школа, 1973. – 528 с.
3. Александров Г.Н. Сверхвысокие напряжения / Г.Н. Александров. – Москва : Энергия, 1973. – 184 с.
4. Абрамов В.Д. Эксплуатация изоляторов высокого напряжения / В.Д. Абрамов, М.В. Хомяков. – Москва : Энергия, 1976. – 92 с.
5. Мельников Н.А. Проектирование электрической части воздушных линий электропередач 330–500 кВ / Н.А. Мельников, С.С. Рокотян, А.Н. Шеренцис. – Москва : Энергия, 1974. – 587 с.

Глава 8

ЭФФЕКТ КАРДИНАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ НА ГРАНИЦЕ ЖИДКОСТЬ – ТВЕРДАЯ СРЕДА

8.1. Электрофизические основы открытия профессора А.А. Воробьева

В Томском политехническом университете в конце 50-х годов прошлого столетия группой ученых под руководством профессора А.А. Воробьева было совершено научное открытие – электрофизический эффект повышения электрической прочности жидкого диэлектрика по сравнению с твердым на границе раздела «жидкость – твердое тело». На основании этого открытия предложен принципиально новый способ обработки естественных и искусственных твердых материалов – электроимпульсная технология (ЭИ-технология). ЭИ-технология является частью электроразрядных технологий и отличается от подобной технологии тем, что электрический разряд формируется внутри твердого тела, а не в жидкости, которая его окружает.

Практическая реализация ЭИ-технологии основана на четко установленном факте, который состоит в том, что электрическая импульсная прочность конденсированных сред при различных длительностях импульсов напряжения кардинальным образом изменяется. Ведущей научной школой в этом направлении, сформировавшемся на стыке инженерной электрофизики, техники высоких напряжений и физики твердого тела в условиях воздействия сильных электрических полей, являлась школа профессора А.А. Воробьева Томского политехнического института. Именно в этой научной школе было сделано открытие явления превышения электрической прочности твердых тел над электрической прочностью жидкостей при коротких экспозициях фронта прикладываемого напряжения. Исследования электрической прочности твердых тел и жидкостей показали, что на косоугольных импульсах напряжения с уменьшением времени экспозиции электрическая прочность жидких диэлектриков растет быстрее, чем твердых диэлектриков, и при определенных условиях прочность жидкостей становится выше, чем электрическая прочность твердых тел.

На рис. 8.1 представлены основные для рассматриваемого процесса параметры – вольт-секундные характеристики жидкости и твердого тела, которые иллюстрируют процессы при уменьшении экспозиции напряжения. Крутизна скорости нарастания напряжения стала одним из

важнейших критериев для характеристики ЭИ-разрушения. Эта величина является границей между электроимпульсными воздействиями различной природы. Для электрогидравлической (ЭГ) технологии характерно условие, когда $A_{имп} < A_{кр}$, а для ЭИ-технологии характерно условие $A_{имп} > A_{кр}$. Для реализации ЭИ-технологий характерными длительностями экспозиции напряжений являются $\sim 10^{-6} \dots 10^{-7}$ с. В некоторых случаях используют импульсы с наносекундной длительностью.

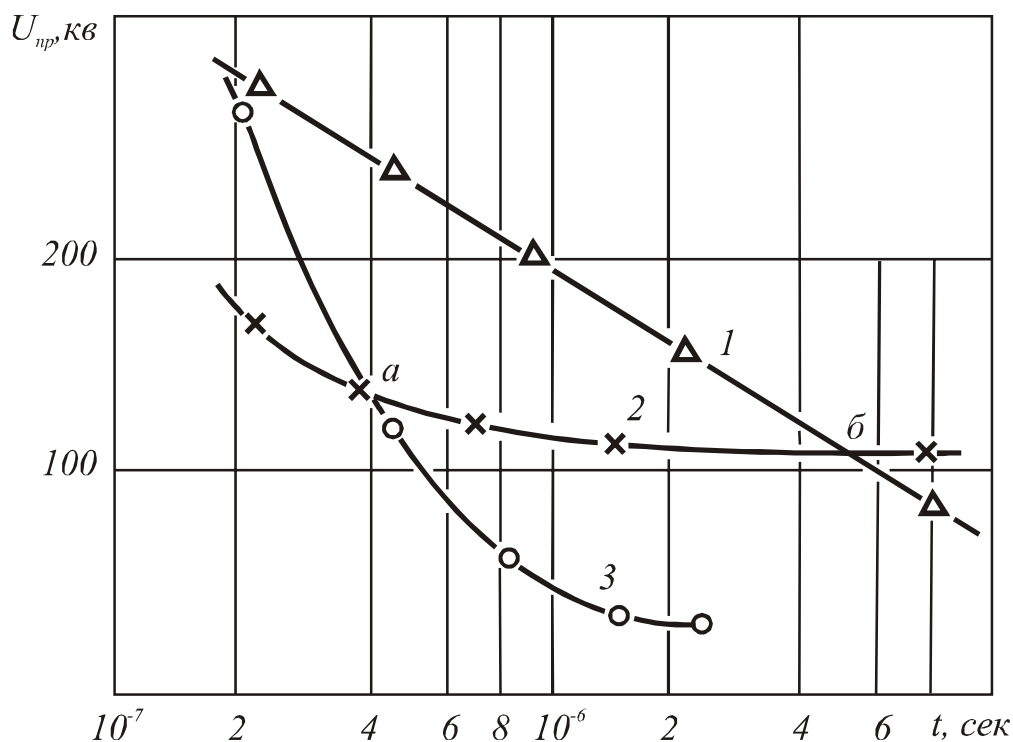


Рис. 8.1. Вольт-секундные характеристики трансформаторного масла (1), твердого тела (2) и воды (3)

Основоположниками электроимпульсного способа разрушения являются профессора Томского политехнического института А.А. Воробьев и А.Г. Воробьев, а в развитии способа принимали участие ученые различных организаций: И.И. Каляцкий, А.Т. Чепиков, М.П. Тонконогов, Ю.Б. Фортес, Б.В. Семкин, Б.С. Блазнин, Г.А. Финкельштейн, А.А. Дульзон и многие другие, работы которых позволили реализовать ЭИ-технологии на практике.

Отличительной особенностью ЭИ-технологий является использование высоких напряжений ($\sim 250 \dots 600$ кВ) при длительностях ($\sim 0,1 \dots 0,15$ мкс) и частотах посылки импульсов от 1 до 10 имп/с. Получение импульсов высокого напряжения с такими параметрами связано со значительными техническими трудностями при создании электрофизической аппаратуры. Поэтому ЭИ-технологии находят применение в таких областях, где тради-

ционные (в основном механические) способы разрушения не эффективны или в принципе не могут решить технологические задачи. ЭИ-способ имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционными способами, которые определяют целесообразность его использования на практике. К ним следует отнести:

- высокий КПД процесса;
- возможность направленного разрушения неоднородных материалов;
- отсутствие необходимости в твердосплавном и алмазном инструменте, т. к. роль рабочего органа играет электрическая искра;
- широкие возможности регулирования параметров нагружения разрушаемого материала, а следовательно, регулирование степени и характера разрушения.

Объемный заряд (ОЗ), сосредоточившийся в области электродов с малым радиусом кривизны, является основным фактором, дающим начало развитию канала пробоя. Концентрация ОЗ в указанной области определяет путь и скорость ионизационных процессов. Объемный заряд, прежде всего, обеспечивает выравнивание электрического поля в жидкой фазе. Данный процесс носит ярко выраженный динамический характер и зависит в первую очередь от напряженности электрического поля в окрестности электрода с малым радиусом кривизны и временных границ длительностей импульсов напряжения. При достижении определенного значения времени с момента приложения импульса напряжения, заряженные частицы не успевают покинуть зону ионизации в области электрода с малым радиусом кривизны. Процесс такого рода ведет к накоплению объемного заряда в жидкой среде, что в результате приводит к снижению напряженности электрического поля в межэлектродном пространстве между границей ОЗ и противоположным электродом (рис. 8.2). Кроме того, вблизи противоположного электрода происходит также накопление ОЗ и снижение неоднородности электрического поля в жидкой среде. Дальнейшее движение стримерных каналов в область анод-катодного промежутка стремится к нулю, а лавинно-стримерные процессы происходят в области между электродом с малым радиусом кривизны и ОЗ. Продвижение канала разряда в жидкости и по поверхности твердого диэлектрика возможно только при значительном увеличении напряжения. Напряженность электрического поля в твердом диэлектрике при данных условиях будет зависеть от геометрических параметров стримерного канала, развивающегося вдоль поверхности раздела в зоне накопления ОЗ. При некоторой величине напряжения напряженность на фронте стримера оказывается достаточной для зажи-

гания разряда в твердом теле. Таким образом, в области электрода с малым радиусом кривизны возникает особая зона, наполненная ОЗ, в которой канал пробоя не может развиваться в области твердой среды. Внедрение канала разряда в твердую фазу всегда начинается на границе ОЗ. Эта область имеет эллиптическую форму в области электрода с малым радиусом кривизны. В результате протекания этих процессов объемный заряд в жидкости в области электрода с малым радиусом кривизны создает квазиоднородное электрическое поле, которое выступает в роли барьера на пути развития лавин и последующих стримеров в жидкой среде в силу значительного снижения напряженности электрического поля на границе объемного заряда. При этом электрическое поле в твердой среде будет становиться все более неоднородным (по мере роста интенсивности описанных выше процессов) и зависеть главным образом от геометрии каналов стримеров на поверхности раздела твердой среды – жидкая фаза. Радиус этих каналов находится в диапазоне нескольких микрон. Именно они влияют на величину минимально возможных пробивных напряжений $U_{т.мин}$. Таким образом, в описанных процессах имеет место разная скорость возрастания пробивного напряжения $U_{пр}$ на вольт-секундных характеристиках, которая, в свою очередь, определяется различной скоростью и степенью концентрации ОЗ в различных конденсированных средах. В данном случае процесс пробоя подобен взрывному процессу, сопровождаемому большим выделением энергии за относительно короткий промежуток времени.

Канал искрового разряда в твердой среде при электрическом взрыве трансформирует электрическую энергию во внутреннюю энергию продуктов канала, далее преобразующуюся в работу по его расширению, в энергию поля механических напряжений и деформаций.

Разрушение твердой среды происходит за счет аддитивного воздействия напряжений, создаваемых вокруг канала электрического пробоя вследствие высокого давления, развиваемого в нем, и напряжений, возникающих в среде при распространении ударных волн. Энергетическим объектом, вызывающим необратимые процессы деструкции твердой среды, является плазма канала пробоя.

Применение электроимпульсной технологии основано в полной мере на указанных процессах и имеет перспективы при деформации и измельчении крепких и особо крепких минеральных образований: горных пород, руд, искусственных материалов, когда традиционные методы механического воздействия не позволяют получить высокой производительности либо требуемого технологического эффекта. Физико-механические характеристики у таких материалов находятся в достаточно сильной взаимосвязи с электрической прочностью. Наиболее

прочные минералы, породы не уступают по электрической прочности лучшим изоляционным материалам, вследствие чего для инициирования разряда в них требуются исключительно высокие напряжения.

Для технологий дробления и измельчения кускового материала используют схему расположения электродов, представленную на рис. 8.2.

Основной проблемой ЭИ-технологии является формирование канала разряда внутри твердого тела. Эта проблема усложняется, если в качестве окружающей среды используется техническая вода, что требует уменьшения времени экспозиции напряжения и увеличения ее амплитуды.

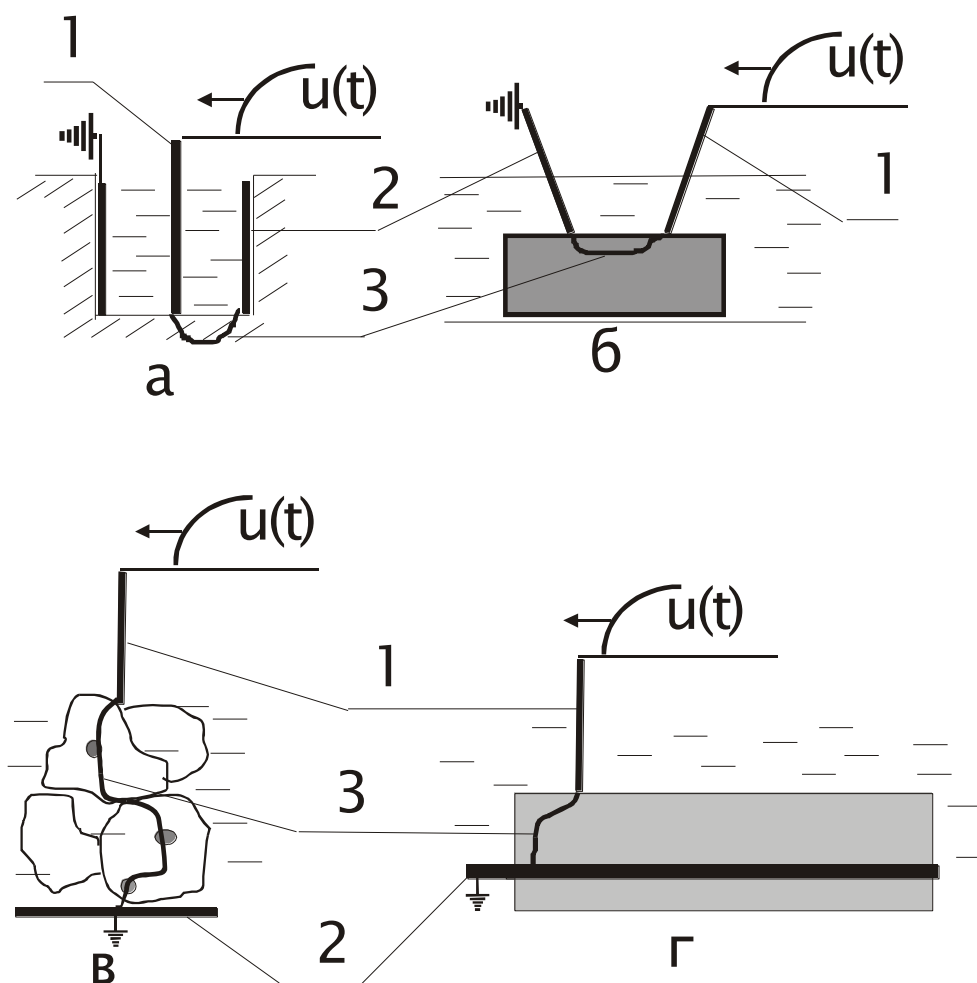


Рис. 8.2. Основные варианты расположения электродных систем в установках электроимпульсных технологий:

а – бурение, б – резание, в – дробление, г – разрушение ЖБИ;

1 – высоковольтный электрод, 2 – заземленный электрод, 3 – искровой канал

Использование ЭИ-технологии имеет ряд ограничений, связанных с основными физическими принципами, заложенными в этом способе. К ним следует отнести возможность формирования разряда в твердом

теле, т. е. возможность его электрического пробоя, и склонность материала к хрупкому разрушению в условиях импульсного силового нагружения. Так, присутствие в твердом теле большого количества проводящих компонентов (более 30 % от общей массы), например магнетитовых руд, не может быть устранено ЭИ-способом, так как в исходном состоянии между электродами может быть гальваническая связь и сквозного канала разряда не образуется. Также ЭИ-способ не эффективен при разрушении материалов, не склонных к хрупкому разрушению при динамических нагрузках, – это водонасыщенные глинистые минералы, битумы, полимеры, резина и т. д. Следует отметить, что в условиях глубокого охлаждения, например в среде жидкого азота, часть этих материалов переходит в хрупкое состояние и может быть разрушена ЭИ-способом, однако такой процесс достаточно дорогой и может быть использован, когда получаемый продукт имеет высокую цену и его переработка экономически целесообразна. Несмотря на указанные ограничения, существует большой спектр горных пород и искусственных материалов, относящихся к классу диэлектриков или полупроводников, где использование ЭИ-способа разрушения дает хорошие результаты и определяет область его применения.

В данном разделе мы рассмотрим ряд технологических применений эффекта, открытого в стенах ТПИ. Технологии, основанные на внедрении разрядного канала в твердую фазу на границе твердая фаза – жидкость, разработаны и доведены до создания установок или прошли опытные испытания на единичных образцах. К этим технологиям относятся ЭИ-бурение и резание горных пород.

При разведке и добыче нефти и газа глубина скважин достигает 3...5 км. При взрывной отбойке горных пород и руд основными скважинами являются взрывные, глубина которых достигает 50 м. Диаметры скважин имеют широкий диапазон и изменяются от 40 мм до нескольких метров. Учитывая вышесказанное и большое разнообразие геологических объектов бурения и горно-геологических условий, в которых производится бурение (особенно в глубоких скважинах), следует отметить, что процесс подвода энергии к забою скважины и вынос продуктов разрушения из нее является чрезвычайно сложной задачей.

Технология ЭИ-бурения является удачной и перспективной альтернативой стандартным механическим способам бурения. Технологическая схема ЭИ-бурения скважин приведена на рис. 8.3.

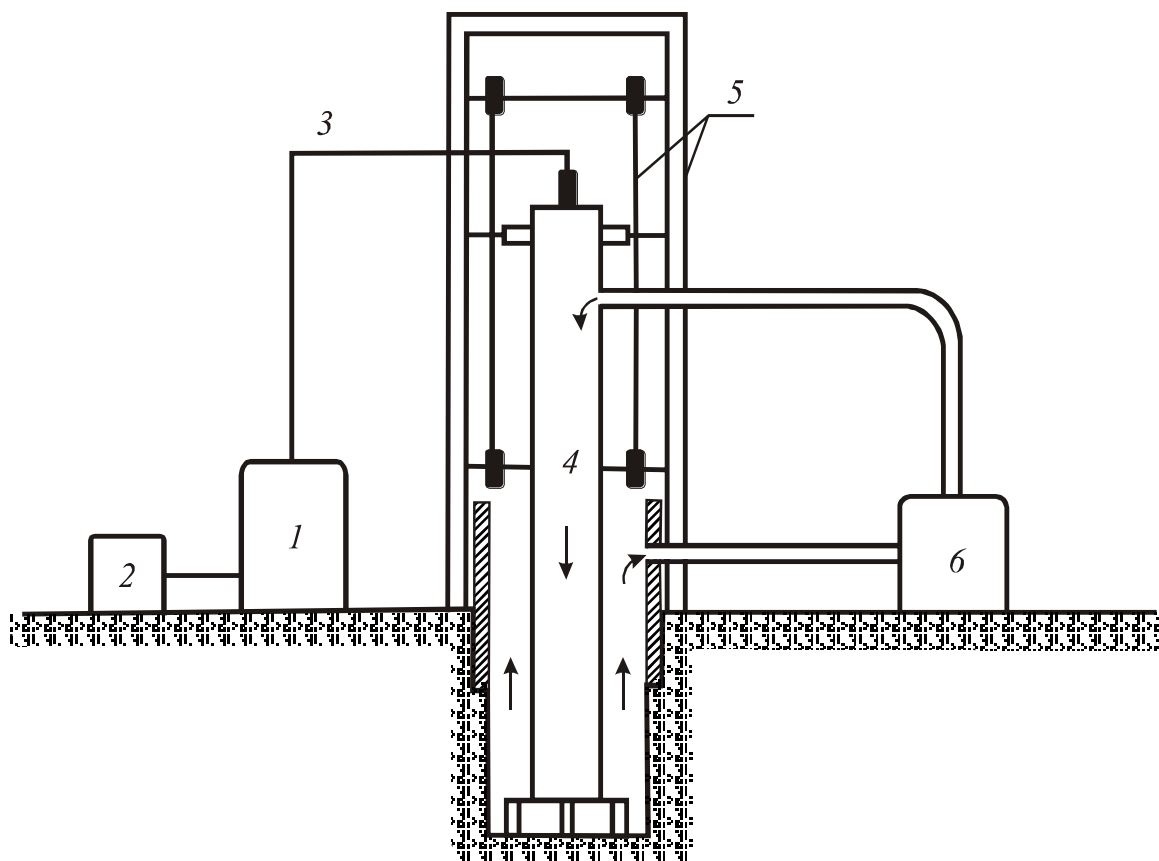


Рис. 8.3. Технологическая схема ЭИ-бурения скважин

Согласно приведенной схеме процесс бурения скважин осуществляется следующим образом. В крепких породах бурится скважина на глубину 1,0...1,5 м, как правило механическим способом. Если горная порода слабо нарушена, то возможно бурение и сразу с поверхности земли электроимпульсным способом, но в этом случае бурение осуществляется с использованием специальных буровых растворов и пре-вентора, препятствующего растеканию промывочной жидкости по поверхности земли. В скважину глубиной 1,0...1,5 м устанавливают направляющую трубу и цементируют затрубное пространство, причем эту трубу устанавливают на некотором расстоянии от забоя скважины, чтобы не создавать условия для электрического соединения высоковольтных и заземленных электродов бурового наконечника направляющей трубой. На схеме эта труба показана наклонной штриховкой. С помощью спуско-подъемного механизма 5 электроимпульсный буровой снаряд 4 опускают на забой скважины и соединяют с промывочным узлом 6 и источником импульсов высокого напряжения 1, для чего применяют высоковольтный токопровод 3. Насосом промывочного узла 6 в буровой снаряд 4 подают жидкость, которая, омывая забой скважины, по затрубному пространству поднимается на поверхность и через боко-

вой патрубок направляющей трубы поступает в промывочный узел. Затем с пульта управления 2 включают источник импульсов высокого напряжения 1. Через высоковольтный токопровод 3 и буровой снаряд 4 импульсы напряжения поступают к забою скважины и, внедряясь в горную породу, разрушают ее. Образующийся шлам и пузырьки газа выносятся на поверхность промывочной жидкостью, которая очищается в промывочном узле и вновь подается в скважину. От обычных схем механического бурения рассматриваемая схема отличается тем, что в ней отсутствуют вращающиеся элементы и механизм создания дополнительного давления на забой скважины, а разрушение горной породы происходит за счет ее электрического пробоя, что требует передачи импульса с определенными параметрами от источника до забоя. Такая схема требует специального бурового снаряжения и специальных наконечников, между которыми формируется канал пробоя (буровые наконечники).

На рис. 8.4 представлен продольный разрез электроимпульсного бурового снаряжения с твердотельной изоляцией токопровода. Буровой наконечник состоит из высоковольтного и заземленного электродов 1, 2, разделенных короночным изолятором 4, который плотно соединен с втулкой 5. Размещенная внутри втулки пружина постоянно давит на высоковольтный электрод 1, обеспечивая его контакт с забоем скважины. Гайка 7 препятствует выпадению высоковольтного электрода из втулки. Короночный изолятор 4 вставлен в переходник 3, с помощью которого буровой наконечник присоединен к колонне буровых труб. Колонна буровых труб состоит из труб 8, соединяемых муфтозамковыми соединениями 15, 16. Количество труб зависит от глубины скважины. Высоковольтный коаксиальный кабель 9, укрепленный верхним концом в высоковольтном вводе (11–14), пропущен через всю колонну буровых труб и нижним концом вставлен в изолятор бурового наконечника 4, где его токопроводящая жила контактирует с высоковольтным электродом 1.

Для предотвращения поперечных перемещений на кабеле 9 укреплены центрирующие изоляторы 10. При большой глубине скважины колонна буровых труб составляется из секций, каждая из которых включает в себя трубу 8 с элементами муфтозамковых соединений 15, 16 на концах, в которых закреплены изоляторы, аналогичные 4. Между этими изоляторами пропущен отрезок кабеля 9. Высоковольтный ввод состоит из корпуса 11, выполненного из изоляционного материала, ввернутого в него сбоку штуцера 12 и сальникового узла, препятствующего выходу промывочной жидкости из бурового снаряжения в месте стыковки кабеля 9 с корпусом посредством высоковольтного ввода 11. На штуцер 12 надет шланг 13, предназначенный для подвода промывочной жидкости от бурового насоса в буровой снаряд.

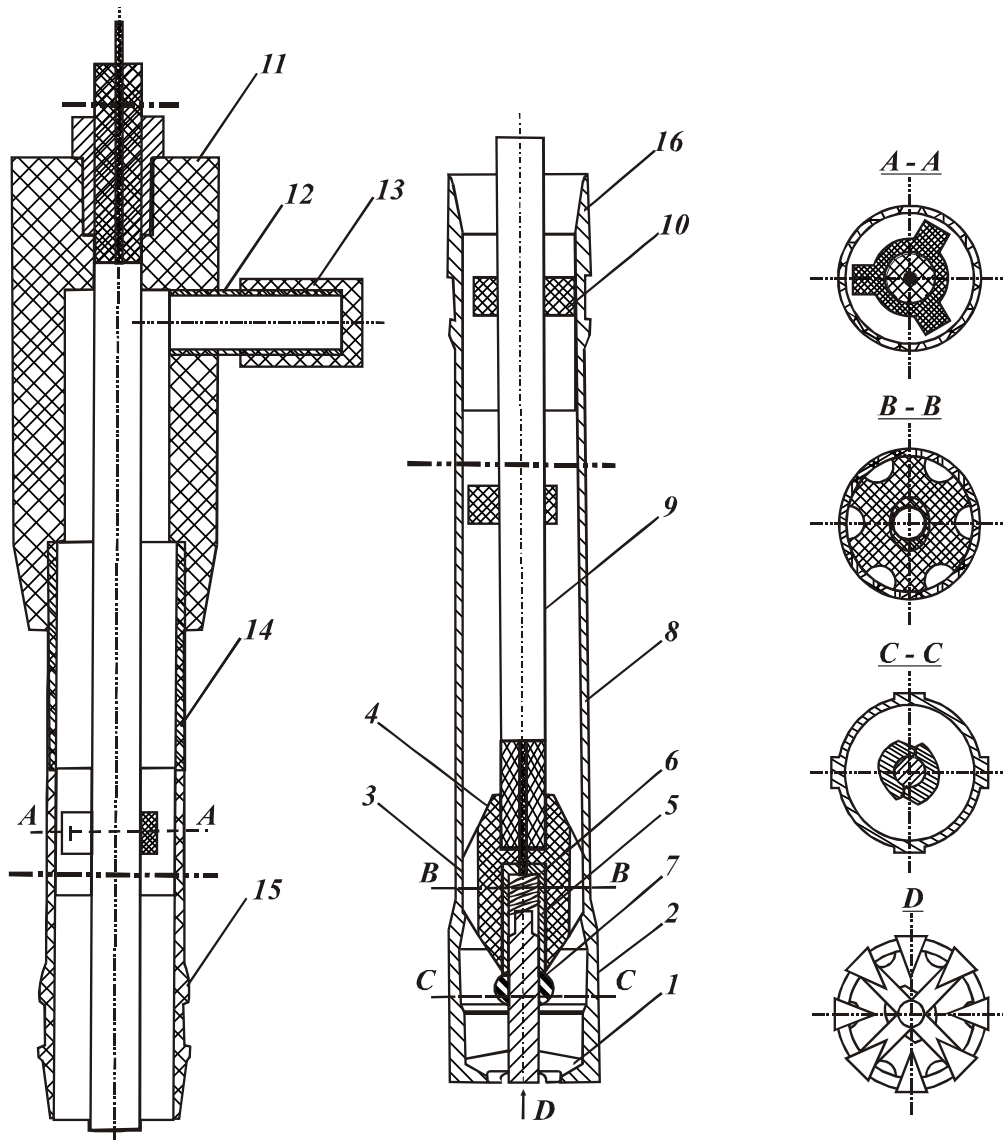
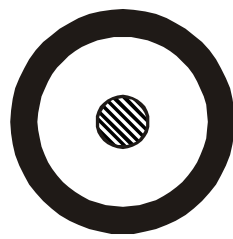
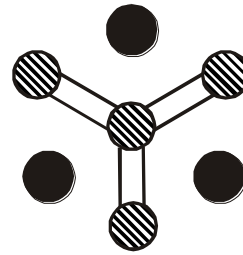


Рис. 8.4. Продольный разрез ЭИ-снаряда для бурения скважин

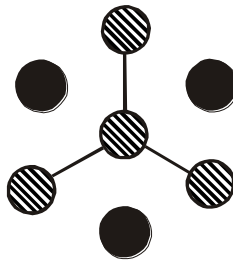
Буровые наконечники (коронки) для электроимпульсного бурения (рис. 8.5) разбиты на типы в зависимости от направления развития электрических разрядов между высоковольтными и заземленными электродами. Наконечники каждого типа имеют свои преимущества и недостатки. Так, радиальные наконечники (тип А) просты по конструкции и при наличии торцевого отверстия в высоковольтном электроде позволяют вести бурение с отбором керна. Но при их использовании затруднительно получить зазор между стенкой скважины и колонной буровых труб, достаточный для свободного удаления крупных частиц шлама, что требует увеличения энергии импульса. Изделия с данным типом изоляции работают в тяжелых условиях. Такие наконечники целесообразно использовать при бурении скважин большого диаметра.



Тип "А"



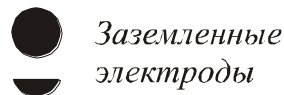
Тип "В"



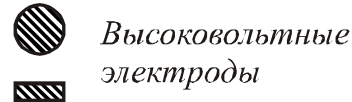
Тип "Б"



Тип "Г"



*Заземленные
электроды*



*Высоковольтные
электроды*

Рис. 8.5. Расположение электродов в буровых наконечниках

Наибольшие скорости бурения при использовании электроизоляционных промывочных жидкостей получены с помощью радиально-тангенциального типа буровых наконечников со стержневыми электродами (тип В). В этом типе коронок разрушение горной породы происходит между центральным высоковольтным электродом, двумя заземленными электродами и между высоковольтными электродами, расположенными по периферии забоя, и заземленными электродами, т. е. по ромбу, а центральная часть породы скалывается за счет боковых ударов. Другим достоинством таких коронок является возможность создания больших зазоров между стенкой скважины и буровым снарядом, что облегчает вынос крупного шлама через затрубное пространство. К недостаткам следует отнести необходимость увеличения межэлектродного промежутка при увеличении диаметра коронки. Буровые наконечники (коронки) радиально-тангенциального типа с пластинчатыми электродами (тип Г) позволяют создавать коронки любого диаметра при любых рабочих промежутках, но скорости бурения при этом не самые высокие. Следует отметить, что могут использоваться различные комбинации рассмотренных типов буровых наконечников.

Одним из важнейших факторов, определяющих показатели электроимпульсного бурения, является промывочная жидкость. В лабораторных и полевых условиях была изучена применимость большого количества различных жидкостей и суспензий для электроимпульсного бурения: трансформаторного масла, дизельного топлива, очищенной и неочищенной воды, глинистых растворов, разнообразных растворов на нефтяной основе и т. д. Наиболее эффективными жидкостями для электроимпульсного бурения оказались трансформаторное масло и дизельное топливо, что связано с их высокой электрической прочностью и, соответственно, с высокой вероятностью реализации электроимпульсного способа, т. к. достигается наибольшая вероятность внедрения канала разряда в горную породу при наложенных на ее поверхность электродах. Использование таких проводящих жидкостей, как вода или глинистые водные суспензии, приводит к чрезвычайно большим потерям энергии импульса в предпробивной стадии развития разряда за счет растекания токов в электродной системе коронок, что, в свою очередь, приводит к деформации высоковольтного импульса, как по амплитуде, так и по времени нарастания напряжения. Эти процессы резко снижают вероятность внедрения канала разряда в горную породу, т. е. канал разряда формируется по поверхности твердого тела и процесс из электроимпульсного переходит в электрогидравлический, где разрушение материала происходит за счет усилий сжатия, что требует на порядок больше энергии в импульсе. Поэтому все показатели электроимпульсного бурения приводятся для изоляционных жидкостей, хотя их дороговизна и экологические проблемы, связанные с их использованием, существенно ограничивают применение этого эффективного метода бурения скважин. В настоящее время в различных лабораториях стран, активно разрабатывающих новые технологии бурения и резания (Россия, Норвегия, США, Бразилия и др.), интенсивно ведутся исследования по выбору специальных жидкостей и конструкций электродных систем, отвечающих требованиям электроимпульсной технологии.

В качестве высоковольтного источника, как правило, используют генераторы импульсных напряжений (ГИН), т. к. рабочие промежутки могут достигать достаточно больших размеров (10...800 мм), что требует использования импульсов напряжения с амплитудой от 150 до 700 кВ, с энергией в разряде 0,2...160 кДж и частотой посылок импульсов до 20 имп/с. Эти генераторы собираются по схеме умножения Аркадьева–Маркса. Особенностью схемы является использование в качестве зарядных элементов индуктивностей (в отличие от традиционных схем, где используются сопротивления), что позволяет обеспечить высокую частоту посылок импульсов при минимальных потерях энергии в заряд-

ных цепях генератора. Следует отметить, что выпускаемые в России импульсные конденсаторы в таких схемах следует не догружать по напряжению в 1,5...2 раза, т. к. они не рассчитаны на режимы с высокой частотой следования импульсов и работой на короткозамкнутую нагрузку. При этом можно достичь ресурса работы конденсаторов на уровне $10^8 \dots 10^9$ имп. При глубоком бурении скважин также возникает проблема канализации высоковольтного импульса на большие расстояния, т. к. он за счет потерь изменяет свои амплитудные и временные характеристики. Решение этой проблемы возможно при размещении источника импульсов непосредственно вблизи забоя скважины в буровой трубе. Источники импульсов с требуемыми габаритами возможно создать на базе погружного импульсного трансформатора, который монтируется непосредственно на буровом наконечнике. Электрическая схема снаряда представлена на рис. 8.6. Источник питания представляет собой импульсный автотрансформатор, состоящий из двух обмоток, полного изоляционного корпуса и ферромагнитного сердечника.

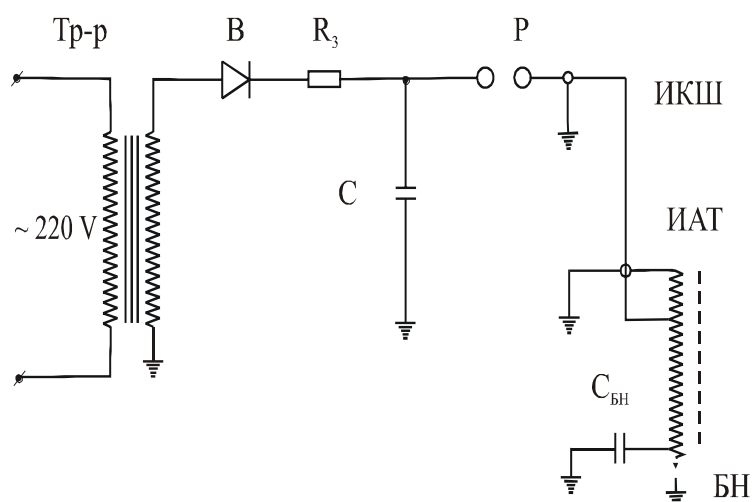


Рис. 8.6. Схема погружного источника импульсов:

Tr-p – высоковольтный трансформатор; *V* – выпрямитель;

R₃ – защитное сопротивление; *P* – разрядник;

ИАТ – импульсный автотрансформатор; *C* – емкостный накопитель;

C_{БН} – емкость бурового наконечника; *БН* – буровой наконечник

Корпус имеет следующие геометрические размеры: диаметр – 174 мм, длина – 700 мм. Крепится к буровой коронке. Коаксиально в корпусе размещается труба, служащая для подачи промывочной жидкости к забою скважины. Этот источник генерирует импульсы с амплитудой 200...220 кВ, длительностью фронта 0,7...0,9 мкс, при энергии, выделяемой в канале разряда, 100...400 Дж. Частота посылок импульсов составляет 5 имп/с. При этих параметрах средняя скорость бурения в

крупнозернистых песчаниках составляет 0,9 м/ч. Это перспективное направление требует доработки как в конструкции, так и в выборе изоляционных материалов, т. к. на глубинах более 1 км увеличивается температура и давление на забое и в самом инструменте. На наш взгляд, эта схема наиболее перспективна для бурения глубоких скважин, т. к. часть источника импульсов располагается на поверхности, генерируя первичный импульс с небольшой амплитудой, а преобразование его в импульс с высокой амплитудой и требуемым фронтом осуществляется в импульсном трансформаторе непосредственно у забоя скважины. Существуют также различные схемы коррекции формы импульса, которые используются в источниках импульсов для бурения электроимпульсным способом. К ним следует отнести обостряющие разрядники, обостряющие малоиндуктивные емкости и их комбинации.

Развитие технологии электроимпульсного бурения скважин находится на уровне лабораторных и полупромышленных исследований, поэтому, с целью сравнения с традиционными методами, приведем данные исследований и испытаний устройств в производственных условиях. При использовании традиционных методов бурения скорости проходки скважин такого диаметра и по таким горным породам на порядок ниже, что указывает на перспективность электроимпульсного бурения.

Значительный интерес представляют работы, связанные с электроимпульсным бурением скважин глубже 100 м, особенно в районах, где существуют обводненные пласты. Такая скважина была пробурена вблизи реки Томь, где породы были представлены крепким окварцованным песчаником. Бурение осуществлялось радиально-тангенциальной коронкой диаметром 140 мм и с межэлектродными промежутками 20, 25 и 30 мм. В качестве промывочной жидкости использовали дизельное топливо, которое служило также изоляцией токоведущих элементов бурового снаряда. Источником импульсов служил генератор импульсных напряжений (ГИН) с регулируемой амплитудой напряжения 150...300 кВ, разрядной емкостью 0,025...0,1 мкФ и частотой следования импульсов до 10 имп/с. Скважина была пробурена до глубины 233 м. Скорость бурения без учета вспомогательных операций составляла 1,3; 3,0 и 5...6 м/ч для буровых наконечников с межэлектродными промежутками 20, 25 и 30 мм соответственно. Энергоемкость процесса для оптимальных условий – 650 Дж/см³. Следует отметить, что с наличием водопритока промывочную жидкость отстаивали, дизельное топливо в отстойниках отделялось от воды и подавалось снова в скважину. Наличие ~10 % воды в промывочной жидкости не сказывалось на показателях бурения.

В этих работах показана возможность бурения скважин электроимпульсным способом на существующих буровых снарядах на глубину более 100 м. Однако использование таких промывочных жидкостей, как дизельное топливо ограничено в связи с его высокой стоимостью и экологическими последствиями, связанными с его утечками. Одной из областей использования таких жидкостей является бурение скважин и отверстий, например под опоры мостов, или глубоких шурфов для взятия проб, а также бурение на вечной мерзлоте, где использовать водные растворы невозможно, а утечки промывочной жидкости минимальны.

Кратко рассмотрим процессы, которые развиваются последовательно друг за другом при электроимпульсном разрушении неоднородного материала. Горные породы, включая руды, можно рассматривать как высоко гетерогенные материалы. К неоднородностям в них следует отнести микро- и макротрещины, поры, различные минералы, границы их срастания, являющиеся местом концентрации дефектов, и т. д.

В предпробивной стадии развития электрического разряда формирование его траектории определяется геометрическим расположением электрофизических неоднородностей в материале, в качестве которых могут выступать минералы, границы их срастания и поры с ионизированным газом, отличающиеся проводимостью и диэлектрической проницаемостью. Таким образом, уже в предпробивной стадии траектория канала разряда ориентируется на неоднородность в материале. Этот процесс хорошо изучен и подтвержден экспериментально как на моделях, так и на реальных горных породах.

8.2. Экспериментальная часть

Цель: исследование эффективности резания камня электрическими импульсными разрядами в зависимости от шага и скорости перемещения стержневой электродной системы; исследование процесса электроимпульсного бурения горной породы.

8.2.1. Исследование процесса ЭИ-резания камня

1. Ознакомиться со схемой установки, расположением ее элементов и объектов испытания, с порядком проведения измерений и правилами ТБ при выполнении данной работы.
2. Провести измерение сопротивления воды.
3. Установить образец в испытательную ячейку и провести экспериментальное резание для четырех различных значений шага m (число циклов для каждого значения шага $k=5$, где цикл представляет собой перемещение электродов в одну сторону), данные занести в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Результаты экспериментального исследования резания камня

| № п/п | Число импульсов | Шаг перемещения | Параметры щели | | | | Примечание |
|----------|--------------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|------------|
| | | | глубина, h , мм | ширина, b , мм | длина, l , мм | объем V , см ³ | |
| | $n\Sigma$ | m , мм/имп | | | | | |

4. Рассчитать следующие параметры ЭИ-процесса:

- запасенную энергию ГИН, Дж:

$$W_{\text{гин}} = \frac{C \times U^2}{2}; \quad (8.1)$$

- число импульсов на длине межэлектродного промежутка, имп\мм:

$$n_{\text{мЭП}} = \frac{S}{m}, \quad (8.2)$$

где S – длина межэлектродного промежутка; m – шаг перемещения электродов;

- площадь обработанной поверхности, см²:

$$P = \frac{V}{b}, \quad (8.3)$$

где V – объем щели; b – ширина щели;

- суммарную затраченную энергию, Дж:

$$W_{\Sigma} = W_{\text{гин}} \times n_{\Sigma}, \quad (8.4)$$

где $n\Sigma$ – суммарное число импульсов на прорезание щели;

- глубину разрушения за один цикл, мм:

$$H = \frac{h}{k}, \quad (8.5)$$

где h – глубина прорезаемой щели при заданном шаге;

- удельные объемные энергозатраты, Дж/см³:

$$W_0 = \frac{W_{\Sigma}}{V}; \quad (8.6)$$

- удельные поверхностные энергозатраты, Дж/см²:

$$W_{\Pi} = \frac{W_{\Sigma}}{P}; \quad (8.7)$$

- эффективность импульса, см²/имп:

$$A = \frac{P}{n_{\Sigma}}; \quad (8.8)$$

- удельную энергию межэлектродного промежутка, Дж:

$$W_{\text{МЭП}} = W_{\text{ГИН}} \times n_{\text{МЭП}} \quad (8.9)$$

Результаты расчета занести в табл. 8.2.

Таблица 8.2

Результаты расчета параметров процесса ЭИ-резания

| № п/п | h , мм/имп | P , см ² | W_{Σ} , Дж | H , мм | W_0 , Дж/см ³ | W_{Π} , Дж/см ² | A , см ² /имп | $W_{\text{МЭП}}$, Дж | Примечания |
|----------|-----------------|--------------------------|----------------------|-------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|------------|
| | | | | | | | | | |

В отчете необходимо графически представить зависимости изменения удельных энергозатрат (объемных и поверхностных) от удельной энергии МЭП; зависимость изменения глубины разрушения за цикл от шага перемещения; зависимости изменения удельных энергозатрат от шага перемещения.

8.2.2. Исследование процесса электроимпульсного бурения

1. Ознакомиться со схемой буровой установки, расположением ее базовых элементов и объектов испытания, с порядком проведения измерений и правилами ТБ и поведения в высоковольтном зале при выполнении данной работы.

2. Посредством тщательного осмотра ознакомиться с устройством погружного ГИН, предназначенного для использования в технологическом процессе ЭИ-бурения. Зарисовать принципиальную схему, указать тип и количество конденсаторов и их основные параметры (емкость и напряжение).

3. Изучить устройство бурового наконечника.

4. Наблюдая за процедурой бурения, зафиксировать основные параметры процесса: напряжение ГИН, частоту следования импульсов ГИН, глубину бурения, тип бурового наконечника, тип рабочей жидкости и ее основные параметры.

Объяснить полученные результаты. Подготовить отчет согласно требованиям, сформулированным в разделе 8.3.

Контрольные вопросы

1. Почему происходит внедрение канала разряда в твердый диэлектрик, а не перекрытие его по поверхности?

2. Что является инструментом, разрушающим диэлектрик при электроимпульсном способе?

3. Что происходит с параметрами импульса при погружении электродной системы в воду, по сравнению с диэлектрическими жидкостями, и каковы причины этого явления?

4. В чем заключаются преимущества электроимпульсного способа по сравнению с механическими способами и какие недостатки, на Ваш взгляд, имеет ЭИ-способ применительно к резанию диэлектриков?

5. Каковы основные требования к ГИН, предназначенному для технологии ЭИ-бурения?

6. Каковы принципы реализации частотного режима работы ГИН?

7. В каких сферах способ ЭИ-бурения наиболее эффективен?

8. В чем суть открытия профессора А.А. Воробьева, на основе которого оказалась возможной реализация процесса ЭИ-резания и бурения?

9. Каковы, на Ваш взгляд, пути улучшения основных рабочих характеристик и повышения экономической эффективности технологии электроимпульсного резания и бурения?

Отчет по экспериментальной части выполняется на листах белой бумаги формата А4 в строгом соответствии с СТО ТПУ. На защите отчета необходимо быть готовыми строить ответы на основе как изученного теоретического материала, так и результатов, полученных лично подгруппой в ходе выполнения экспериментальных исследований.

Список литературы

1. Сканави Г.П. Физика диэлектриков (область сильных полей) / Г.П. Сканави. – Москва : ГИФМЛ, 1958. – 907 с.

2. Техника высоких напряжений : учебное пособие для вузов И.М. Богатенков, Г.М. Иманов, В.Е. Кизеветтер и др. ; под ред. Г.С. Кучинского. – Санкт-Петербург : Изд-во ПЭИПК, 1998. – 700 с.

3. Воробьев Г.А. Критерий внедрения канала разряда в твердый диэлектрик, помещенный в изолированную жидкость / Г.А. Воробьев, А.Т. Чепиков, В.Ф. Бажов // Известия вузов. Физика. – 1998. – № 12. – С. 110–113.

4. Семкин Б.В. Основы электроимпульсного разрушения материалов / Б.В. Семкин, А.Ф. Усов, В.И. Курец. – Санкт-Петербург : Наука, 1993. – 276 с.

5. Воробьев А.А. Электрический пробой и разрушение твердых диэлектриков / А.А. Воробьев, Г.А. Воробьев. – Москва : Высшая школа, 1966. – 224 с.

6. Месяц Г.А. О природе эффекта «Воробьевых» в физике импульсного пробоя твердых диэлектриков / Г.А. Месяц // Письма в ЖТФ. – 2005. – № 31. – С. 51–59.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебном пособии рассмотрены основные электрофизические процессы, протекающие в диэлектрических средах при приложении к ним сильных электрических полей. Изложены базовые положения и методика экспериментального исследования закона Пашена и вольт-секундных характеристик воды. Рассмотрен эффект полярности в жидких диэлектриках при воздействии на них высокого импульсного напряжения. Изложены основные положения теории Фока-Семенова, вводится понятие дилатонов. Экспериментальная часть, посвященная данной тематике, выполняется на модели, позволяющей исследовать широкий спектр возможных комбинаций параметров и характеристик процесса пробоя.

Рассмотрены процессы зажигания и развития коронного разряда, процессы формирования потерь и иных вредных факторов и способов борьбы с ними. В ходе выполнения лабораторных работ моделируются реальные ситуации на ЛЭП высокого и сверхвысокого напряжения.

Дано описание уникального явления превышения электрической прочности жидких диэлектриков над электрической прочностью твердых тел на границе раздела, которое лежит в основе технологического процесса электроимпульсного бурения и резания горных пород. Рассмотрены условия при которых данный эффект может быть успешно реализован в горнодобывающей промышленности.

Практикум органично дополнит теоретическую часть по ряду специальных дисциплин как при подготовке бакалавров, так и магистров по направлениям 13.03.02 и 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника».

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

α – коэффициент ударной ионизации электронами, т. е. число свободных электронов, образуемых одним электроном на 1 см пути от катода к аноду при столкновении его с нейтральными атомами и молекулами.

β – коэффициент ударной ионизации положительными ионами, т. е. число свободных электронов, образуемых одним положительным ионом при столкновении с нейтральными частицами газа на 1 см пути от анода к катоду.

γ – коэффициент поверхностной ионизации, т. е. число электронов, вылетевших с 1 см² поверхности катода в результате бомбардировки ее положительными ионами.

Минимум кривой Пашена – точка на графике зависимости закона Пашена, соответствующая минимальному значению пробивного напряжения для данного газа.

ВСХ – вольт-секундная характеристика изоляции – зависимость пробивного напряжения от времени воздействия.

ГИН – генератор импульсных напряжений.

ВТ – высоковольтный трансформатор.

ОЗ – объемный заряд в локальной области диэлектрической среды.

Дилатоны – области в объеме диэлектрической среды с отрицательной плотностью зарядов.

Контрагирование – сжатие канала пробоя по мере его развития и распространения.

Электроимпульсная технология – технологический процесс, основанный на применении свойств импульсных электрических разрядов для модификации свойств конструкционных материалов и изделий.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|---------------------------------|
| ПРЕДИСЛОВИЕ | Ошибка! Закладка не определена. |
| ВВЕДЕНИЕ | 4 |
| Глава 1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНА ПАШЕНА | 5 |
| 1.1. Теория процесса | 5 |
| 1.2. Экспериментальная часть | 11 |
| Глава 2. ВОЛЬТ-СЕКУНДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОДЫ | 17 |
| 2.1. Теория процесса | 17 |
| 2.2. Экспериментальная часть | Ошибка! Закладка не определена. |
| Глава 3. ЭФФЕКТ ПОЛЯРНОСТИ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ПРОБОЕ ЖИДКИХ ДИЭЛЕКТРИКОВ | 29 |
| 3.1. Теория процесса | 29 |
| 3.2. Экспериментальная часть | 30 |
| Глава 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОБОЯ ТВЕРДЫХ ДИЭЛЕКТРИКОВ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ ФОКА–СЕМЕНОВА | 35 |
| 4.1. Теория процесса | 35 |
| 4.2. Компьютерная модель процесса | 39 |
| Глава 5. ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ КОРОННОГО РАЗРЯДА НА РАСЩЕПЛЕННОЙ ФАЗЕ ЛЭП СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ | 47 |
| 5.1. Теория процесса | 47 |
| 5.2. Экспериментальная часть | 62 |
| Глава 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПОТЕРЬ ЭНЕРГИИ ПРИ КОРОНИРОВАНИИ ЛЭП СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ | 65 |
| 6.1. Теория процесса | 65 |
| 6.2. Экспериментальная часть | 70 |
| Глава 7. РЕГУЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА ДЛИННЫХ ГИРЛЯНДАХ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ | 73 |
| 7.1. Теория процесса | 73 |
| 7.2. Экспериментальная часть | 76 |
| Глава 8. ЭФФЕКТ КАРДИНАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ НА ГРАНИЦЕ ЖИДКОСТЬ – ТВЕРДАЯ СРЕДА | 80 |
| 8.1. Электрофизические основы открытия профессора А.А. Воробьева | 80 |
| 8.2. Экспериментальная часть | 93 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 98 |
| СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ | 99 |

Учебное издание

ВАЖОВ ВЛАДИСЛАВ ФЕДОРОВИЧ
МЫТНИКОВ АЛЕКСЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ
В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СРЕДАХ
ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СИЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОЛЕЙ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

Корректурa *И.О. Фамилия*
Компьютерная верстка *К.С. Чечельницкая*
Дизайн обложки *И.О. Фамилия*

Подписано к печати 00.00.2021. Формат 60×84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать CANON. Усл. печ. л. 5,93. Уч.-изд. л. 5,67.

Заказ 000-21. Тираж 100 экз.



Издательство

ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ