

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Шебзухова Татьяна Александровна
Должность: Директор Пятигорского института (филиал) Северо-Кавказского
федерального университета
Дата подписания: 23.08.2023 17:19:53
Уникальный программный ключ:
d74ce93cd40e39275c3ba2f58486412a1c8ef96f

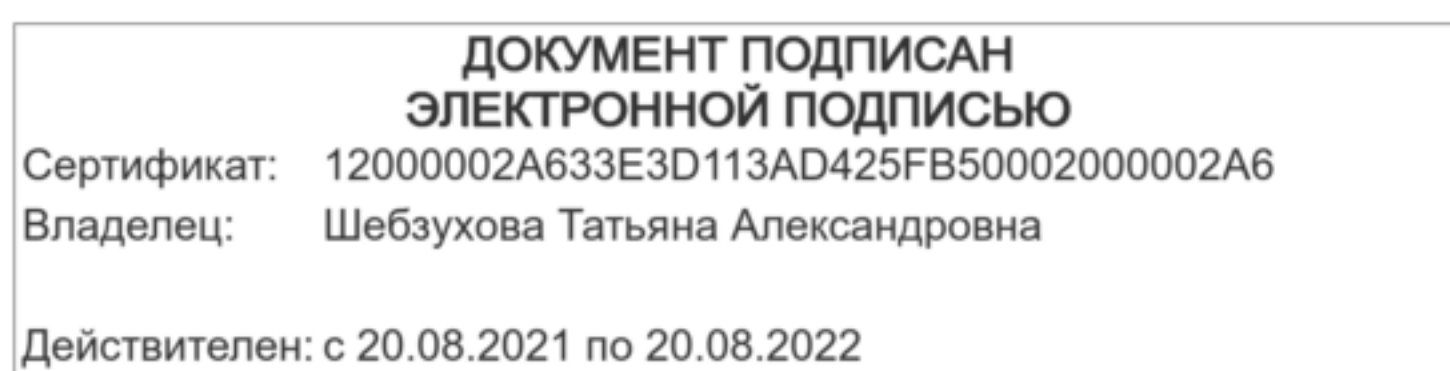
МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕ-
НИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания
по выполнению лабораторных работ
по дисциплине «ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

№ п/п		Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование лабораторных работ	
4.	Содержание лабораторных работ	
4.1	Лабораторная работа №1. Распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов.	
4.2	Лабораторная работа №2. Исследование электрической прочности воздушных промежутков в резко неоднородном поле.	
4.3	Лабораторная работа №3. Статистические закономерности пробоя.	
4.4	Лабораторная работа №4. Исследование перенапряжений в обмотках трансформатора.	
4.5	Лабораторная работа №5. Защитные разрядники и ограничители перенапряжений.	
4.6	Лабораторная работа №6. Исследование модели каскадного выпрямителя высокого напряжения.	
4.7	Лабораторная работа №7. Генератор импульсных напряжений 750 кВ.	
4.8	Лабораторная работа №8. Определение зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов.	
5	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	
5.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины	
5.2	Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине	
5.3	Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины	
	Приложения	



Введение

Целью работы в лаборатории является углубление и закрепление приобретенных теоретических знаний путем экспериментальной проверки теоретических положений, а также знакомство с электронными компонентами, оборудованием, измерительными приборами и аппаратурой, используемыми в лаборатории.

В результате выполнения лабораторных работ студенты должны приобрести умения и навыки по сборке и исследованию электронных схем и приборов, измерениям электрических величин. Тематика лабораторных работ полностью соответствует содержанию основных разделов курса, изучаемого в высших технических учебных заведениях. В предлагаемом учебном пособии описано одиннадцать лабораторных работ. В описании каждой лабораторной работы сформулирована ее цель, изложены основные теоретические положения, описана схема установки для проведения экспериментального исследования, даны рекомендации по проведению опытов и обработке результатов измерений, а также контрольные вопросы.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Основными целями дисциплины являются: формирование у студентов стройной и устойчивой системы знаний о фундаментальных закономерностях зажигания и развития электрических разрядов в диэлектрических средах, механизмах пробоя диэлектриков при воздействии сильных электрических полей, видах изоляции высоковольтного оборудования и методах контроля ее состояния, способах получения и измерения высоких напряжений, природе возникновения перенапряжений и способов защиты от них.

В результате освоения данной дисциплины обеспечивается достижение целей основной образовательной программы «Электроэнергетика и электротехника»; приобретенные знания, умения и навыки позволят подготовить выпускника:

- способного к расчету, анализу и проектированию электроэнергетических элементов, объектов и систем с использованием современных средств автоматизации проектных разработок;
- научно-исследовательской деятельности, в том числе в междисциплинарных областях, связанной с математическим моделированием процессов в электроэнергетических системах и объектах, проведением экспериментальных исследований и анализом их результатов;
- к самостоятельному обучению и освоению новых знаний и умений для реализации своей профессиональной карьеры.

2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства:

- Комплект учебно-лабораторного оборудования «Электротехнические материалы».

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения. Переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

3. Наименование лабораторных работ

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022			
	5 семестр 1. Распределение напряжений по элементам гирлянды подвесных изоляторов.	1,5	

	Выяснение причин неравномерного распределения напряжения по элементам изоляционных конструкций. Определение распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов. Изучение влияния защитной арматуры на характер распределения напряжения вдоль гирлянды. Ознакомление с методикой поиска дефектных изоляторов в гирлянде.		
2	Лабораторная работа № 2. Исследование электрической прочности воздушных промежутков в резко неоднородном поле. Изучение особенностей развития разряда в неоднородных полях. Исследование влияния полярности электродов на разрядные напряжения в резко неоднородном электрическом поле воздушного промежутка. исследование влияния барьера на электрическую прочность воздушного промежутка. Экспериментальное определение оптимального расположения барьера.		
3	Лабораторная работа № 3. Статистические закономерности пробоя. Ознакомление с основными статистическими закономерностями пробоя при испытании образцов газовой и жидкой изоляции. Изучение статистических методов обработки и анализа экспериментальных данных при испытании изоляции. Расчет параметров и построение дифференциальных и интегральных кривых распределения вероятностей пробоя.		
4	Лабораторная работа № 4. Исследование перенапряжений в обмотках трансформатора. Ознакомиться со схемой и работой анализатора переходных процессов. Изучить методы определения перенапряжений в главной и продольной изоляции обмотки трансформатора при воздействии на обмотку грозовых импульсов.		
5	Лабораторная работа № 5. Защитные разрядники и ограничители перенапряжений. Ознакомление с назначением, принципом действия и конструкцией разрядников и ограничителей перенапряжений (ОПН). Изучение особенностей работы и применения основных типов трубчатых и вентильных разрядников и ОПН. Расчет характеристик и защитного действия разрядников с использованием ЭВМ.	1,5	
6	Лабораторная работа № 6. Исследование моды разряда в промежутке выпрямителя высокого напря-		

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
 ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	Изучение устройства и принципа действия каскадного выпрямителя высокого напряжения. Определение изменений потенциалов различных точек схемы трехкаскадного выпрямителя в установившемся режиме при холостом ходе. Снятие зависимостей выходного напряжения и пульсаций напряжения от тока нагрузки и числа ступеней выпрямителя.		
7	Лабораторная работа № 7. Генератор импульсных напряжений 750 кВ. Ознакомиться со способами получения грозовых импульсов, устройством и работой ГИН 750 кВ; Изучить методы регулирования параметров грозового импульса и методы их измерения; Произвести измерение амплитуды грозового импульса с помощью измерительных шаров диаметром 50 см. Ознакомиться с методами регистрации формы грозового импульса с помощью электронного осциллографа.		
8	Лабораторная работа № 8. Определение зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Изучить расчетные методы определения зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Ознакомиться с экспериментальными методами исследования защитных зон молниеотводов с использованием ГИН. Определить экспериментально и сравнить с расчетными зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Провести визуальное исследование зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов по компьютерной программе.		
	Итого за 5 семестр:	3	
	Итого:	3	

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

4. Содержание лабораторных работ

Лабораторная работа №1. Распределение напряжения по элементам гирлянды подвесных изоляторов

Цель работы: Выяснение причин неравномерного распределения напряжения по элементам изоляционных конструкций. Определение распределения напряжения по гирлянде подвесных изоляторов. Изучение влияния защитной арматуры на характер распределения напряжения вдоль гирлянды. Ознакомление с методикой поиска дефектных изоляторов в гирлянде.

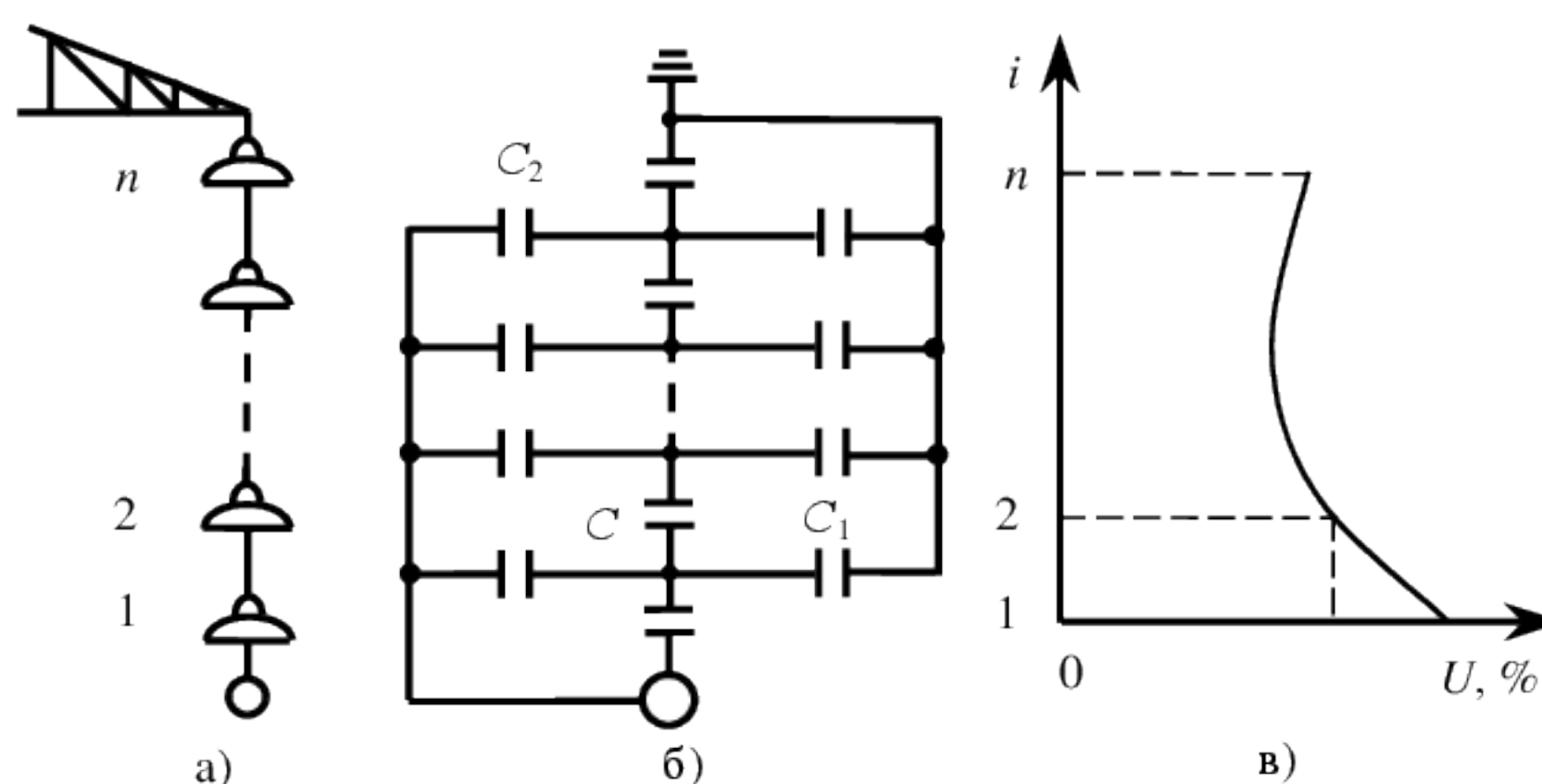
Основы теории:

В электрических установках имеет место неравномерное распределение напряжения по отдельным элементам и участкам изоляции. Это приводит к возникновению короны и частичных разрядов на отдельных элементах и в объемах изоляции, что в конечном итоге является причиной появления начальных дефектов и последующего развития повреждения изоляции.

Во внешней изоляции наиболее неравномерное распределение напряжения наблюдается на гирляндах подвесных изоляторов, опорных изоляционных колонках, высоковольтных выводах трансформаторов и выключателей.

Рассмотрим характер распределения напряжения для гирлянды подвесных изоляторов, состоящей из n элементов (рис. 1.1).

Гирлянду изоляторов можно представить электрической схемой замещения (рис. 1.1,б), где $C = 40...70$ пФ – собственная емкость изолятора; $C_1 = 4...5$ пФ – емкость изолятора относительно земли; $C_2 = 0,5...1,0$ пФ – емкость изолятора относительно провода.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 1.1 – Гирлянда подвесных изоляторов:
а – схема установки; б – емкостная схема замещения;
в – распределение напряжения по изоляторам гирлянды.

Основное влияние на неравномерность распределения напряжения по элементам гирлянды, как видно из схемы замещения рис. 1.1 б, оказывают токи, протекающие по емкостям C_1 и C_2 .

Падение напряжения на каждом элементе гирлянды будет определяться алгебраической суммой токов, протекающих по изолятору. Поскольку $C_1 > C_2$, то наибольший ток протекает по изолятору, расположенному около провода, наименьший – по изолятору, расположенному где-то в середине гирлянды, а затем несколько увеличивается на элементах у заземленной опоры. Более подробный анализ схемы замещения гирлянды дан в соответствующей литературе [1, 2].

Неравномерность распределения напряжения по изоляторам будет увеличиваться с увеличением числа элементов в гирлянде, так как в этом случае величина эквивалентной емкости, обусловленная собственной емкостью изоляторов $C_{\Sigma} = \frac{C}{n}$, будет соизмерима с емкостями C_1 и C_2 .

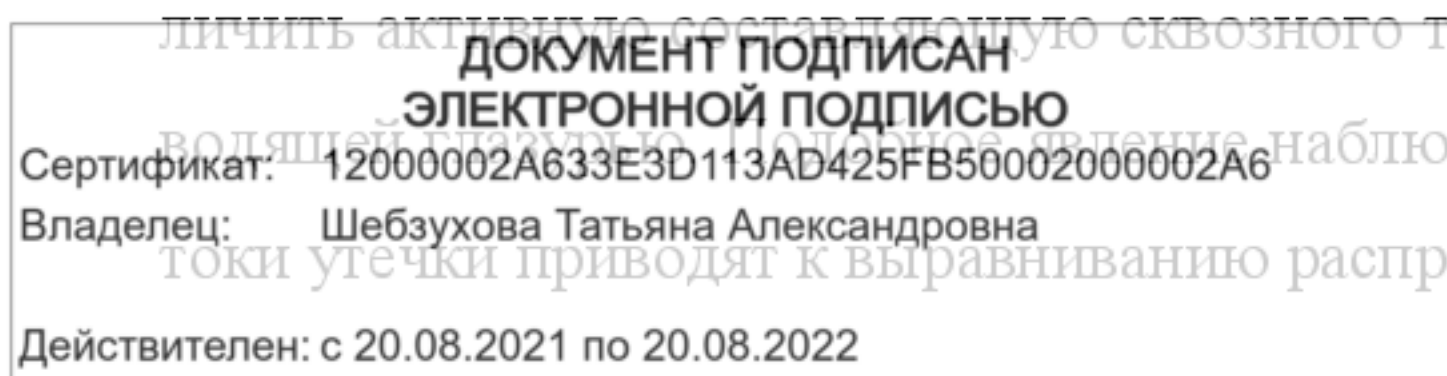
При наличии шести и более изоляторов в гирлянде на первый от провода изолятор приходится примерно 20–25 % фазного напряжения. Таким образом, при номинальном напряжении 154 кВ и выше изоляторы, расположенные вблизи провода, будут коронировать.

Для выравнивания распределения напряжения вдоль гирлянды применяют защитную арматуру в виде колец, овалов, восьмерок и т. п., укрепленных на обоих концах гирлянды или только на линейном конце. Арматура увеличивает емкости C_2 и C_{Σ} . Аналогичным образом можно выровнять распределение напряжения вдоль стержневых изоляторов.

Арматура также защищает изоляторы от воздействия дуги при перекрытии изоляторов, так как дуга при перекрытии гирлянды возникает между электродами арматуры.

Из анализа схемы замещения гирлянды также следует, что более равномерного распределения напряжения по изоляторам можно достичь, увеличивая собственную емкость изолятора, т.е. используя более массивные изоляторы или сдвоенные гирлянды. В этом случае токи, протекающие по емкостям C_1 и C_2 , оказывают меньшее влияние на величину токов в емкостях C .

Распределение напряжения по гирлянде станет также более равномерным, если увеличить активную составляющую сквозного тока, например, покрывая изоляторы полупрозрачным материалом, который пропускает солнечный свет. Это наблюдается при дожде, когда возросшие активные токи утечки приводят к выравниванию распределения напряжения.



Измерить распределение напряжения по изоляторам гирлянды можно с помощью измерительной штанги или шарового разрядника.

Измерительная штанга представляет собой систему из двух электродов. Электроды с помощью контактных приспособлений (в виде «усов», щупов) соединяются с верхней и нижней металлической арматурой изолятора. Расстояние между электродами можно изменять путем поворота рукоятки штанги. Электрическое поле между электродами – слабонеоднородное, и напряжение пробоя воздушного промежутка между электродами будет зависеть от расстояния. Шкала измерительной штанги проградуирована в киловольтах. Имеются также штанги с электростатическими вольтметрами.

Методика определения распределения напряжения по элементам гирлянды с помощью шарового разрядника следующая:

- 1) Разрядник поочередно подключается параллельно каждому изолятору.
- 2) Включается испытательная установка, и плавно поднимается напряжение от нуля до возникновения устойчивого разряда между шариками разрядника.
- 3) Относительное значение напряжения на каждом изоляторе определяется расчетным путем.

Для каждого изолятора производится три измерения. Необходимо следить, чтобы в процессе измерений расстояние между шариками разрядника оставалось неизменным.

Так как напряжение по изоляторам распределяется неравномерно, то величина напряжения $U_{\bar{a}}$, приложенного к i -му изолятору, при котором пробивается разрядник, будет зависеть от места положения изолятора в гирлянде, т. е.

$$U_{\bar{a}1} \neq U_{\bar{a}2} \neq \dots \neq U_{\bar{a}} \neq \dots \neq U_{\bar{a}n}$$

Наименьшее значение будет иметь $U_{\bar{a}1}$, при установке разрядника на первом изоляторе от провода, а наибольшее $U_{\bar{a}}$ при установке разрядника где-то в середине гирлянды.

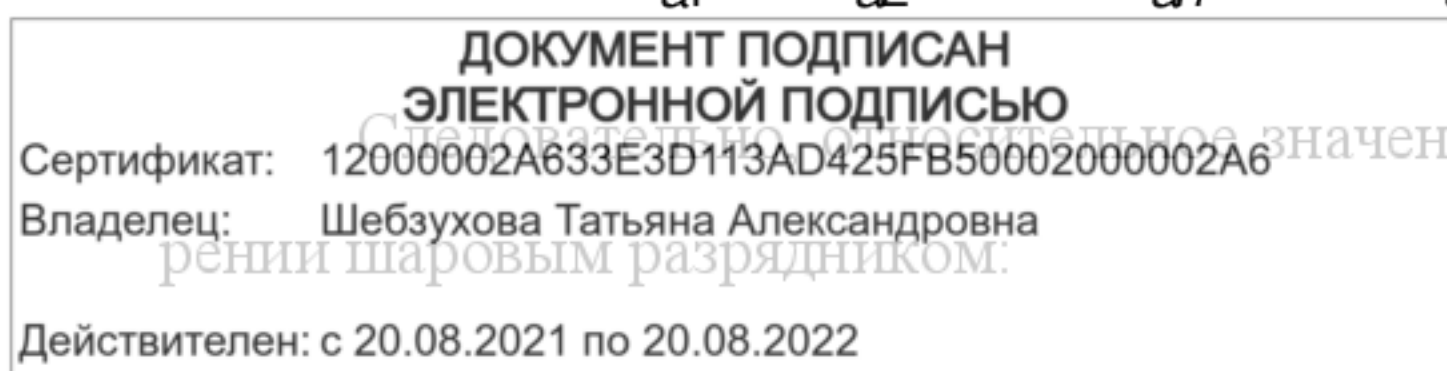
$$U_{\text{эск}} = \frac{U}{U_{\bar{a}k}}$$

где U – напряжение, при котором пробивается разрядник;

$U_{\bar{a}k}$ – напряжение на гирлянде при установке разрядника на k -ом изоляторе.

Для всей гирлянды

$$\frac{U}{U_{\bar{a}1}} + \frac{U}{U_{\bar{a}2}} + \dots + \frac{U}{U_{\bar{a}n}} = U \left(\frac{1}{U_{\bar{a}1}} + \frac{1}{U_{\bar{a}2}} + \dots + \frac{1}{U_{\bar{a}n}} \right) = U \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_{\bar{a}}} = 1$$



Среднее арифметическое значение напряжения на k -ом изоляторе при измерении шаровым разрядником:

$$U_{\text{вс } k} = \frac{1}{U_{\text{вк}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_{\text{вi}}}}$$

или в процентах

$$U_{\text{из } k \%} = \frac{100}{U_{\text{вк}} \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_{\text{вi}}}}$$

Во внутренней изоляции наибольшая неравномерность распределения напряжения по объему изоляции наблюдается в кабелях, трансформаторах и генераторах.

В изоляции кабелей наибольшая напряженность электрического поля наблюдается у токоведущих жил. Поэтому для выравнивания поля по толщине изоляции применяют градирование изоляции. Сущность градирования заключается в том, что изоляция, например бумажная, имеет слои с различными величинами коэффициента диэлектрической проницаемости ϵ ; ближе к жиле используется бумага с большим ϵ .

В трансформаторах наибольшая неоднородность электрического поля - у торца обмотки, примыкающего к магнитопроводу. Для выравнивания поля применяют емкостные кольца и экраны.

В электрических машинах максимальная неоднородность электрического поля возникает в местах выхода секции из пазов статора. Здесь для выравнивания электрического поля применяют покрытие лобовых участков изоляции полупроводящим лаком на определенную длину. Подробнее о методах регулирования полей в силовых кабелях, трансформаторах и машинах смотрите.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Определить распределение напряжения вдоль гирлянды из шести стеклянных изоляторов типа ПС70 с помощью штанги и методом шарового разрядника при:

- 1) отсутствии дефектных изоляторов;
- 2) наличии дефектного изолятора;

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Работа выполняется на высоковольтной испытательной установке 60 кВ (рис. 1.2). Траверса должна быть заземлена, а высокое напряжение подводится к проводу.

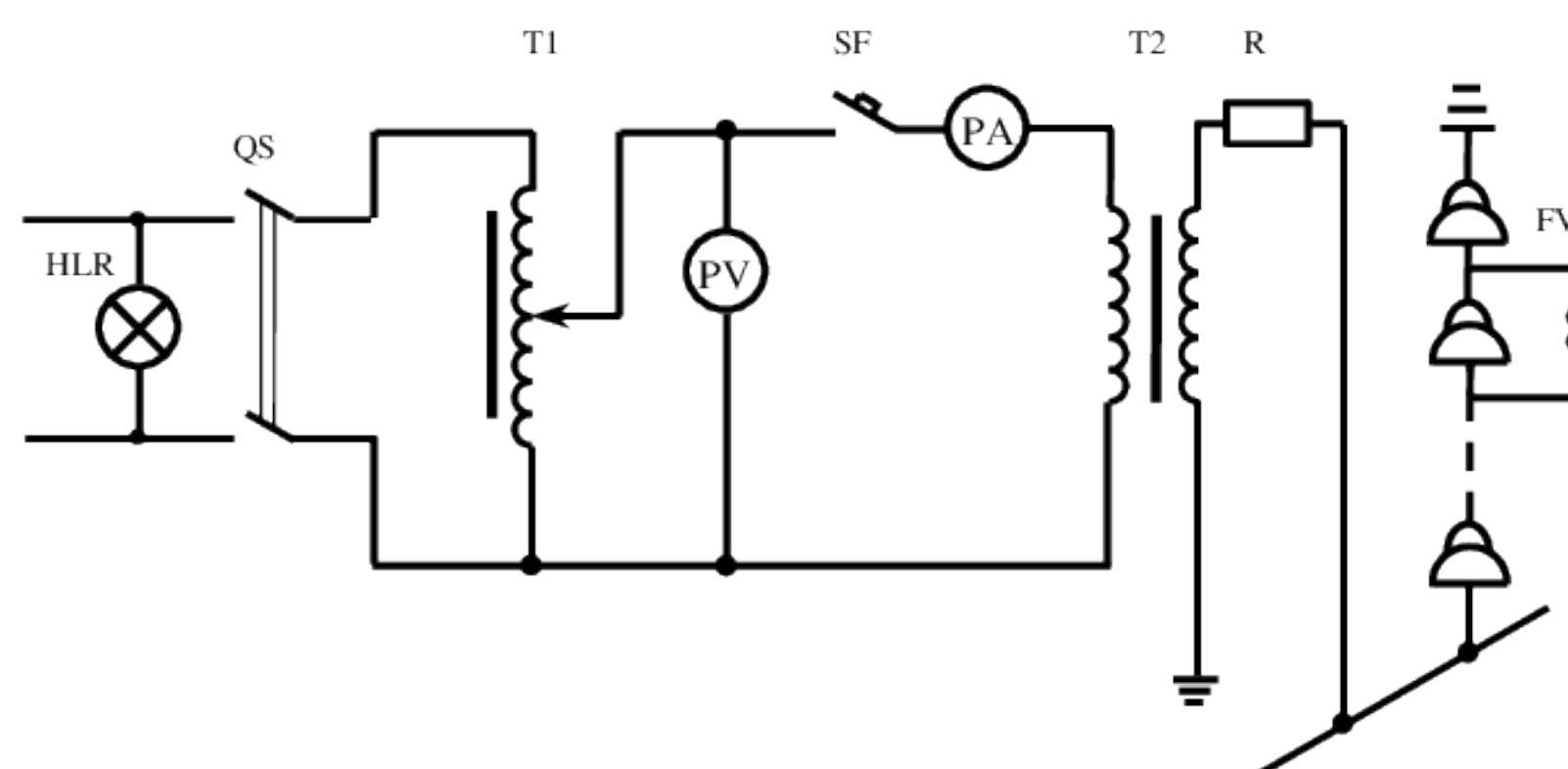


Рисунок 1.2 – Схема испытания установки

При измерении напряжения штангой необходимо:

- 1) включить испытательную установку и установить напряжение по низкой стороне 200 В, что соответствует вторичному напряжению 60 кВ;
- 2) с помощью штанги замерить напряжение U_k на каждом изоляторе, при котором возникает пробой между электродами штанги. Результаты измерений занести в табл. 1.1;
- 3) значения напряжений в процентах на каждом изоляторе занести в табл. 1.1, определив их по соотношению

$$U_{k\%} = \frac{U_k 100}{U_{\hat{A}i}}$$

где $U_{\hat{A}i}$ – напряжение, приложенное к гирлянде изоляторов (в нашем случае 60 кВ);

- 4) для проверки правильности измерений необходимо вычислить сумму $\sum U_{k\%}$.

Если сумма отличается от 100 % более чем на $\pm 10\%$, то измерения следует считать неудовлетворительными, и опыт нужно повторить.

Таблица 1.1

Номер изолятора от провода, i	Измерения шаровым разрядником						Измерения штангой	
	$U_{1\bar{a}},$ В	$U_{1'\bar{a}},$ В	$U_{1''\bar{a}},$ В	$\bar{U}_{1\bar{a}},$ В	$U_{2\bar{a}},$ кВ	$U_{\text{ср } k\%},$ %	$U_k,$ кВ	$U_{k\%},$ %
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022								

2								
3								
4								
5								
6								

Последовательность определения распределения напряжения по гирлянде изоляторов с помощью шарового разрядника следующая:

- 1) подключить разрядник поочередно параллельно каждому изолятору;
- 2) включить испытательную установку и плавно поднять напряжение от нуля до возникновения устойчивого разряда между шариками разрядника;

3) величину напряжения разряда $U_{1\bar{a}}$ (на стороне 200 В) занести в табл. 1.1. Для каждого изолятора произвести три измерения ($U'_{1\bar{a}}$, $U''_{1\bar{a}}$ и $U'''_{1\bar{a}}$). Необходимо следить, чтобы в процессе измерений расстояние между шариками разрядника оставалось неизменным;

4) занести в табл. 1.1 значения напряжений на гирлянде (на стороне 60 кВ), при котором наступает разряд, определив их по выражению

$$U_{2\bar{a}} = K \bar{U}_{1\bar{a}}$$

где $K = \frac{60}{0,2}$ – коэффициент трансформации трансформатора;

5) вычислить значения напряжений в процентах для каждого изолятора по выражению (1.5);

6) результаты расчетов занести в табл. 1.1. Для каждого варианта должна быть определена сумма $\sum U_{k\%}$. Если сумма отличается от 100 %, то необходимо повторить расчет.

На основании полученных результатов необходимо:

1. Построить зависимость $U_{\text{вс}} k\% = f(i)$ для всех случаев в одних координатах (расчеты могут быть выполнены по компьютерной программе).

2. Определить коэффициент неравномерности распределения напряжения вдоль гирлянды для всех случаев

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$\eta = \frac{U_{\text{вс}} k\% \max}{U_{\text{вс}} k\% \min}$

где $U_{\text{вс } k\% \text{ max}}$ и $U_{\text{вс } k\% \text{ min}}$ – наибольшее и наименьшее напряжение на изоляторах гирлянды.

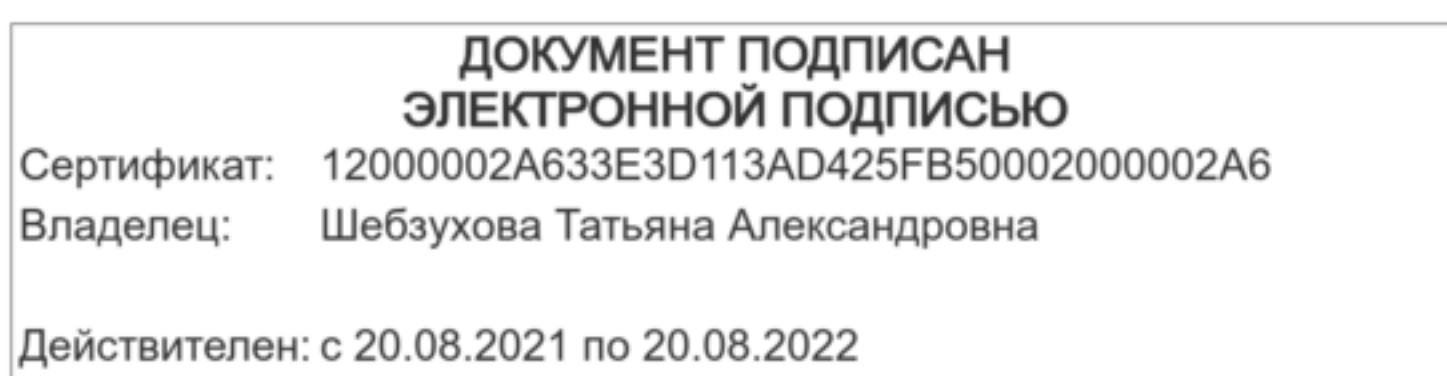
Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Объяснить причины неравномерности распределения напряжения в изоляционных конструкциях.
2. В чем проявляется отрицательное действие неравномерного распределения напряжения?
3. Перечислить способы выравнивания напряжения по изоляторам гирлянды, а также при выполнении изоляции кабелей, трансформаторов и генераторов.
4. Пояснить с использованием полученных результатов влияние дефектного изолятора на распределение напряжения по гирлянде.
5. Перечислить способы выявления дефектных изоляторов.
6. Виды защитной арматуры и экранов и для чего они применяются.



Лабораторная работа №2. Исследование электрической прочности воздушных промежутков в резко неоднородном поле

Цель работы: Изучение особенностей развития разряда в неоднородных полях. Исследование влияния полярности электродов на разрядные напряжения в резко неоднородном электрическом поле воздушного промежутка. исследование влияния барьера на электрическую прочность воздушного промежутка. Экспериментальное определение оптимального расположения барьера.

Основы теории:

Электрическая прочность воздушных промежутков зависит от ряда факторов, в том числе от рода напряжения, формы электродов и их полярности.

В однородном электрическом поле ($E = \text{const}$) разряд в воздухе возникает при напряженности поля, близкой к 3 МВ/м, и не сопровождается явлением короны.

Степень неоднородности электрического поля принято характеризовать коэффициентом неоднородности K_n , равным отношению максимальной напряженности поля между электродами (E_{max}) к средней ее величине (E_{cp}): $K_n = E_{\text{max}} / E_{\text{cp}}$, где $E_{\text{cp}} = U/S$. Для однородных полей $K_n = 1$, для неоднородных $K_n > 1$ и увеличивается при уменьшении радиуса кривизны электродов и росте расстояния между ними. Условно считается, что поле будет слабонеоднородным при $K_n < 2$ и резко неоднородным при $K_n > 2 \dots 4$. Эта граница характерна для случая концентрических цилиндров при $R/r = 3$, для параллельных проводов $S/r = 30$ и для двух сфер одинакового радиуса $S/r = 8$ (S - везде расстояние между электродами) [1].

Электрическое поле промежутка с электродами острие-плоскость является неоднородным ($K_n > 4$). В таком промежутке разрядные напряжения оказываются значительно более низкими, чем в воздушных промежутках с однородными или слабонеоднородными полями. При этом искровому разряду (пробою) предшествует корона.

При любой полярности электродов острие-плоскость ионизации начинается у острия, поскольку напряженность поля здесь больше, чем у плоскости. Образующийся при этом объемный заряд состоит, в основном, из положительных ионов, т.к. электроны, обладающие малой массой и, следовательно, большей подвижностью, практически мгновенно покидают область ионизации. Положительный объемный заряд искажает поле и оказывает существенное влияние на процесс развития разряда.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Как видно из рис. 1, при положительной полярности острия возникающий при ионизации объемный заряд уменьшает напряженность поля непосредственно у острия и увеличивает ее в остальной части промежутка.

При отрицательной полярности острия влияние объемного заряда будет противоположным, - он увеличивает напряженность поля около острия и ослабляет ее в остальной части промежутка. В результате изменяется напряжение возникновения короны U_k и разрядное напряжение промежутка U_p .

При положительной полярности острия возникновение короны будет затруднено, т.к. напряженность поля непосредственно у острия понижена. Для возникновения короны потребуется более высокое напряжение, т.е. $U_k^+ > U_k^-$.

Поскольку напряженность поля по направлению к плоскости при положительной полярности острия увеличивается, а при отрицательной уменьшается (рис.2.1), то при дальнейшем повышении напряжения при положительном острие разряд в промежутке произойдет при более низком напряжении, т.е. $U_p^+ < U_p^-$.

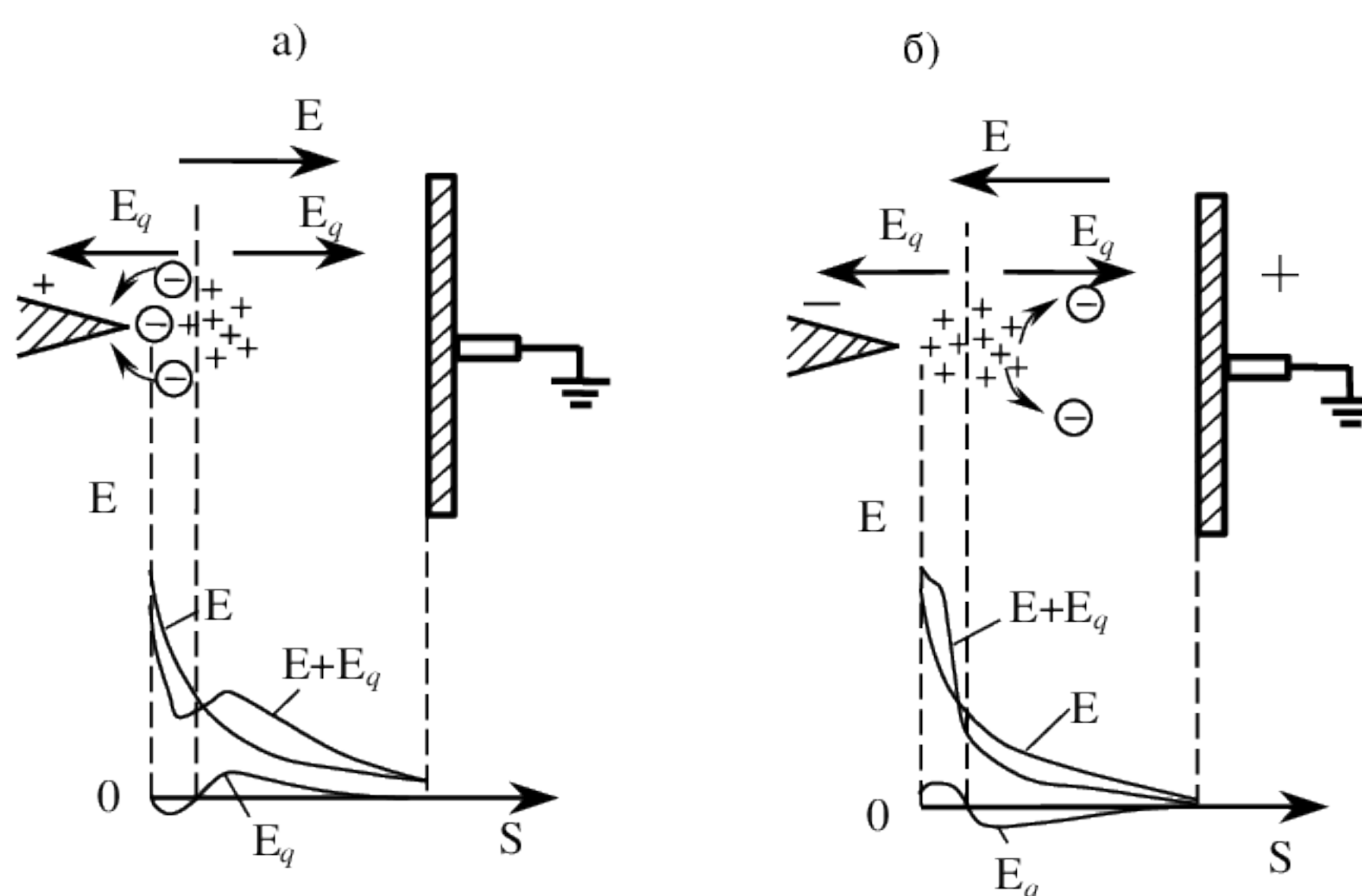
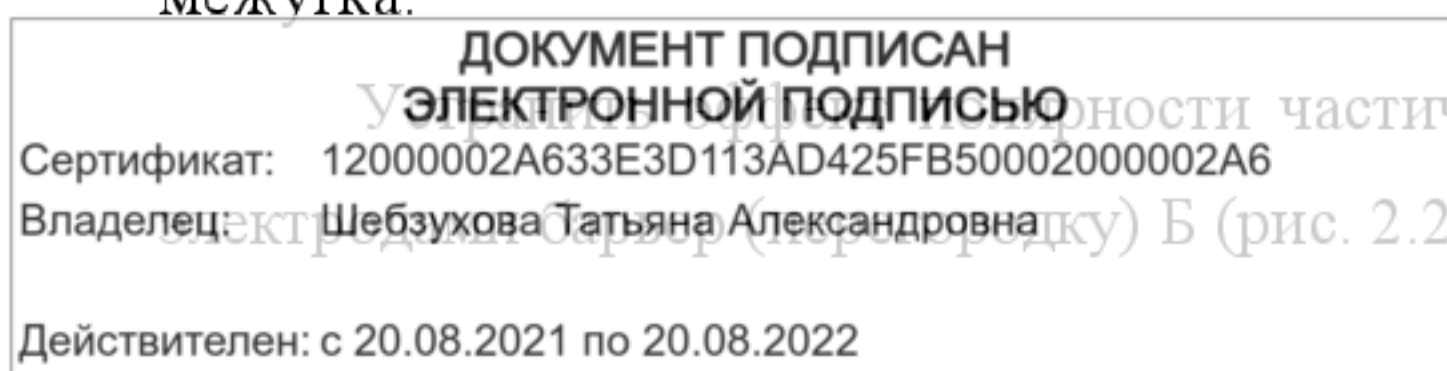


Рисунок 2.1 – Напряженность электрического поля в промежутке острие-плоскость: E - без учета влияния объемных зарядов; E_q - создаваемая положительными объемными зарядами; $E+E_q$ – результирующая

Зависимость разрядного напряжения в несимметричных полях от полярности электродов называют эффектом полярности.

Управлять электрическим полем разрядного промежутка и его электрической прочностью можно, например, поместив между электродами тороидальный проводящий экран, на который подан тот или иной потенциал. В зависимости от положения экрана и значения его потенциала можно добиться увеличения или уменьшения разрядного напряжения промежутка.



Увеличить электрическую прочность промежутка (или полностью можно, поместив между электродами тороидальный проводящий экран) Б (рис. 2.2) из диэлектрика.

Материал барьера существенного значения не имеет; важно, чтобы барьер был достаточно плотным, непроницаемым для ионов.

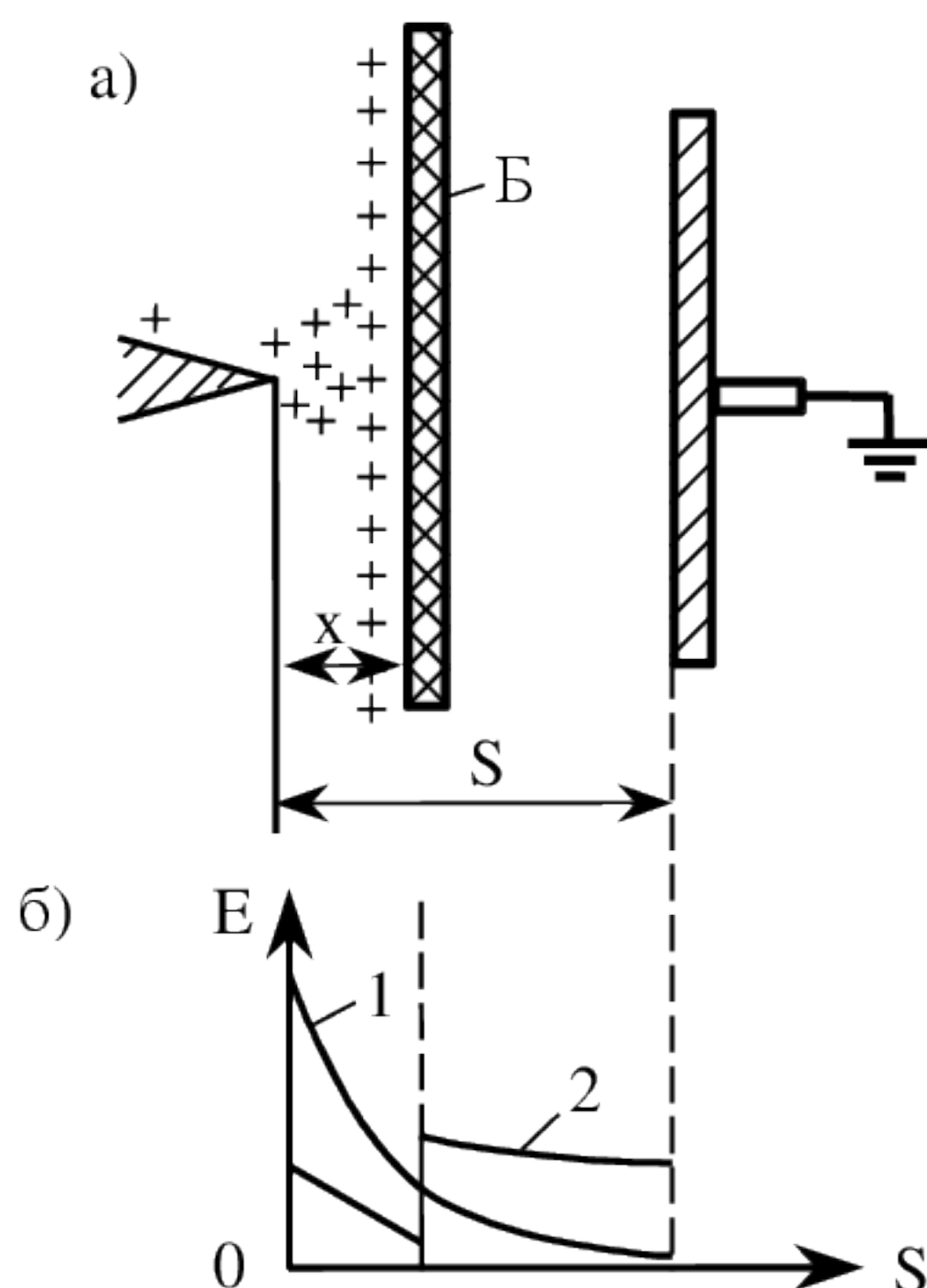


Рисунок 2.2 – Барьер (а) и напряженность электрического поля (б) в промежутке острье-плоскость: 1- без барьера; 2 - с барьером

При наличии барьера и положительной полярности острья положительные ионы на поверхности барьера, распределяются тем более равномерным слоем, чем дальше от острья установлен барьер. В результате напряженность электрического поля на участке барьер-плоскость несколько повышается, но, распределяется более равномерно (рис. 2.2, б) в промежутке, что и приводит к заметному увеличению разрядного напряжения при оптимальном положении экрана.

При наличии барьера и отрицательной полярности острья наблюдается как снижение разрядного напряжения промежутка, так и незначительное его увеличение (рис. 2.3).

При переменном напряжении (при частоте 50 Гц) в промежутке острье-плоскость разряд возникает при положительной полярности напряжения на стержне, поскольку при этом разрядное напряжение значительно ниже, чем при отрицательной полярности острья. Поэтому применение барьера для увеличения прочности промежутков эффективно и при напряжении промышленной частоты.

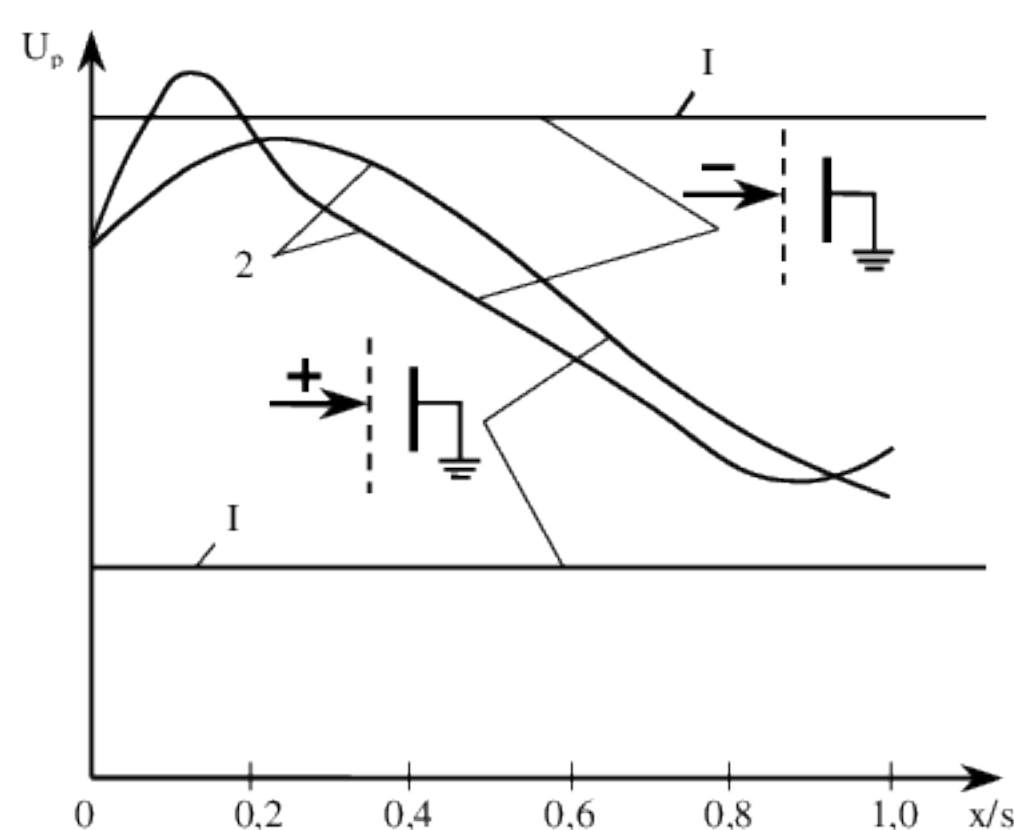


Рисунок 2.3 – Разрядные напряжения промежутка острие-плоскость:
1 – без барьера; 2 – с барьером.

Разрядные напряжения промежутка с электродами острие-острие при переменном напряжении будут выше, чем разрядные напряжения промежутка острие-плоскость. Это объясняется тем, что в последнем случае (в силу большой емкости системы канал стримера - плоскость) плотность заряда на фронте стримера и, следовательно, напряженность поля вблизи него оказываются более высокими, что облегчает условие распространения стримера вглубь промежутка.

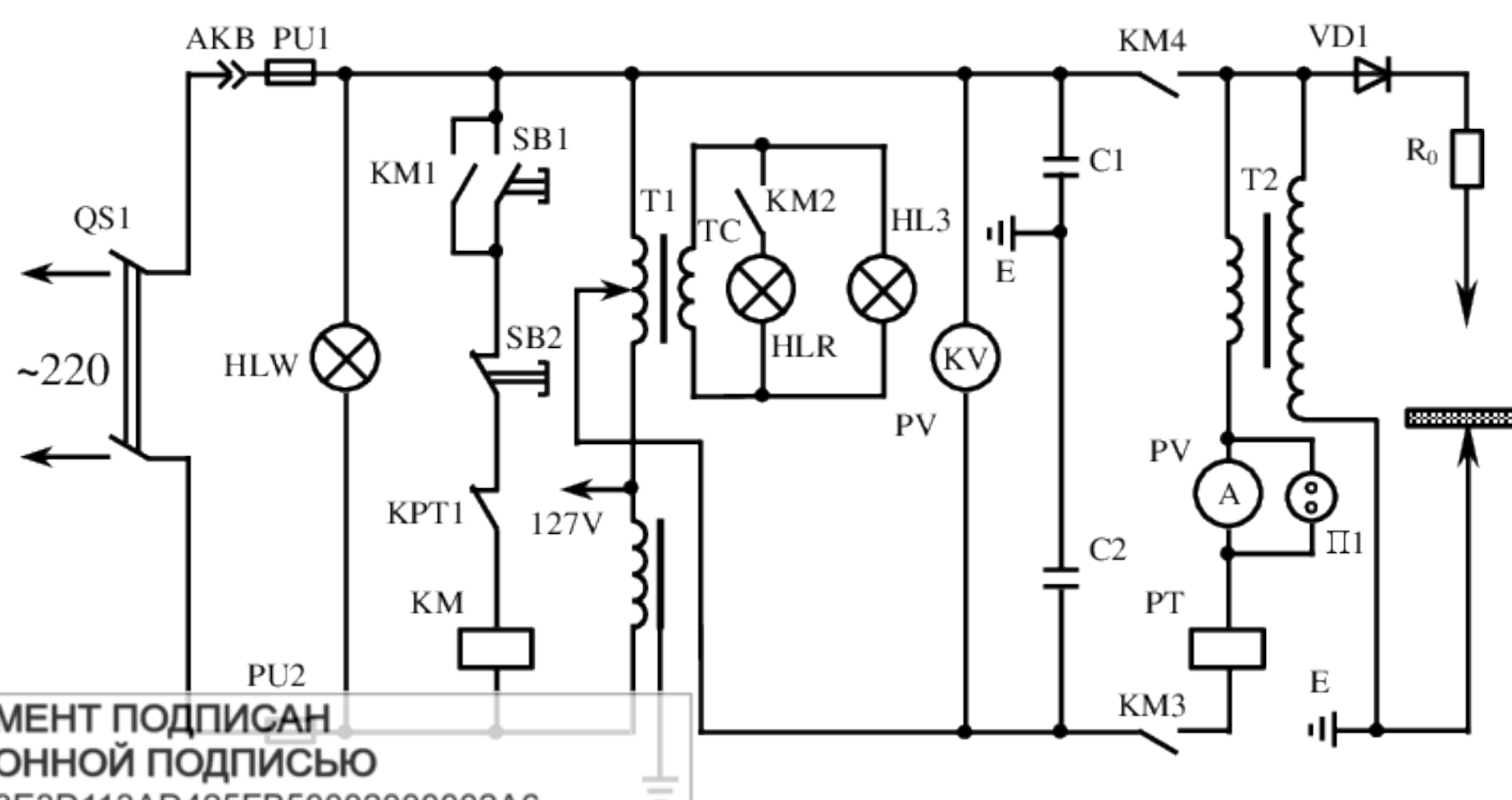
Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

Работа выполняется на выпрямительной установке, схема которой приведена на рис.

2.4.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 2.4 – Принципиальная схема выпрямительной установки:

Работа на установке производится в следующем порядке:

1. Необходимо убедиться, что установка полностью отключена от сети:

Выключены рубильник QS1 щитка управления, регулятор регулировочного трансформатора T1 находится в отключенном положении, и на выход высокого напряжения ВН установки наложено временное заземление.

2. После этого можно заходить за ограждение установки и производить необходимые изменения в схеме исследования.

3. Закончив работу за ограждением, закрывают дверь ограждения, включают цепь блокировки АКВ, снимают временное заземление.

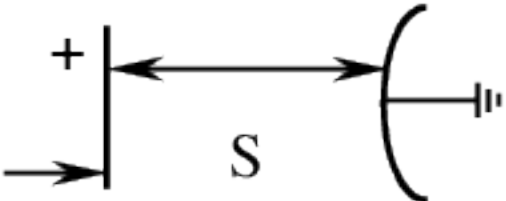
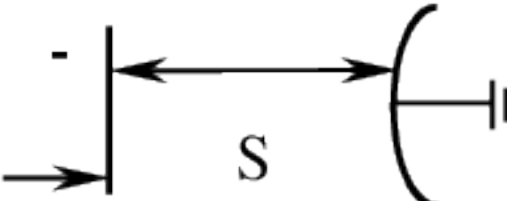
4. Включают рубильник QS1 щитка питания, при этом подается напряжение на регулировочный трансформатор T1, загораются сигнальные лампы HLW и HL3.

5. Включают кнопку QS1 на пульте управления, при этом замыкаются контакты магнитного пускателя KM и подается напряжение на высоковольтный трансформатор T2, сигнальную лампу HLR и обмотку токового реле РТ.

1. Определить разрядные напряжения воздушного промежутка острие-плоскость в зависимости от расстояния S между электродами при положительной и отрицательной полярности острия.

Результаты опытов сводят в таблицу следующей формы.

Таблица 2.1

S, см					S, см				
	U, кВ			U _{п,ср} , кВ		U, кВ			U _{п,ср} , кВ
	1	2	3			1	2	3	
1					0,5				
---					---				
5					2,5				

Здесь $U_{p,ср}$ – среднее значение напряжения между электродами в момент пробоя, кВ.

На основании полученных данных построить зависимость $U_p = f(S)$.

1. Определить разрядные напряжения промежутка острие-плоскость с барьером при различных расстояниях S между электродами и различной полярности острия.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Барьер располагают в специальном приспособлении; расстояние S указывает преподаватель. Результаты опытов заносят в таблицу следующей формы.

2. На основании полученных результатов построить зависимости $U_p = f(x/S)$ для различной полярности электродов. На этом же графике показать разрядные напряжения промежутка для данного расстояния S при различных полярностях острия без барьера.

Распределение и напряженности электрического поля влияют на конструктивные особенности и эксплуатационные характеристики электротехнического оборудования. Поэтому расчет напряженности электрического поля представляет важную задачу при проектировании токопроводов, изоляторов, экранов и других конструкций изоляции.

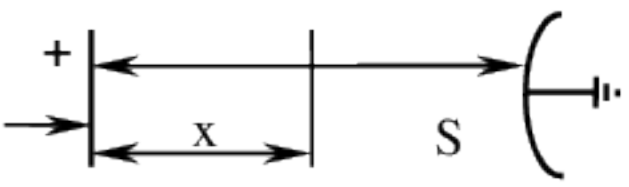
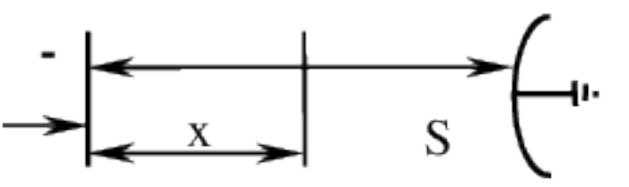
В изоляционных конструкциях с неоднородным полем, например, в коаксиальных токопроводах (рис. 2.5, а) напряженность электрического поля E в любой точке на расстоянии r от оси равна

$$E = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

где U - напряжение между жилой и оболочкой;

r_1 и r_2 - внутренний и наружный радиусы изоляции.

Таблица 2.2

x/S								
	U, кВ			U _{р.ср} , кВ	U, кВ			U _{р.ср} , кВ
	1	2	3		1	2	3	
0,0								
0,25(0,2)								
- - -								
0,75(0,8)								
1,0								

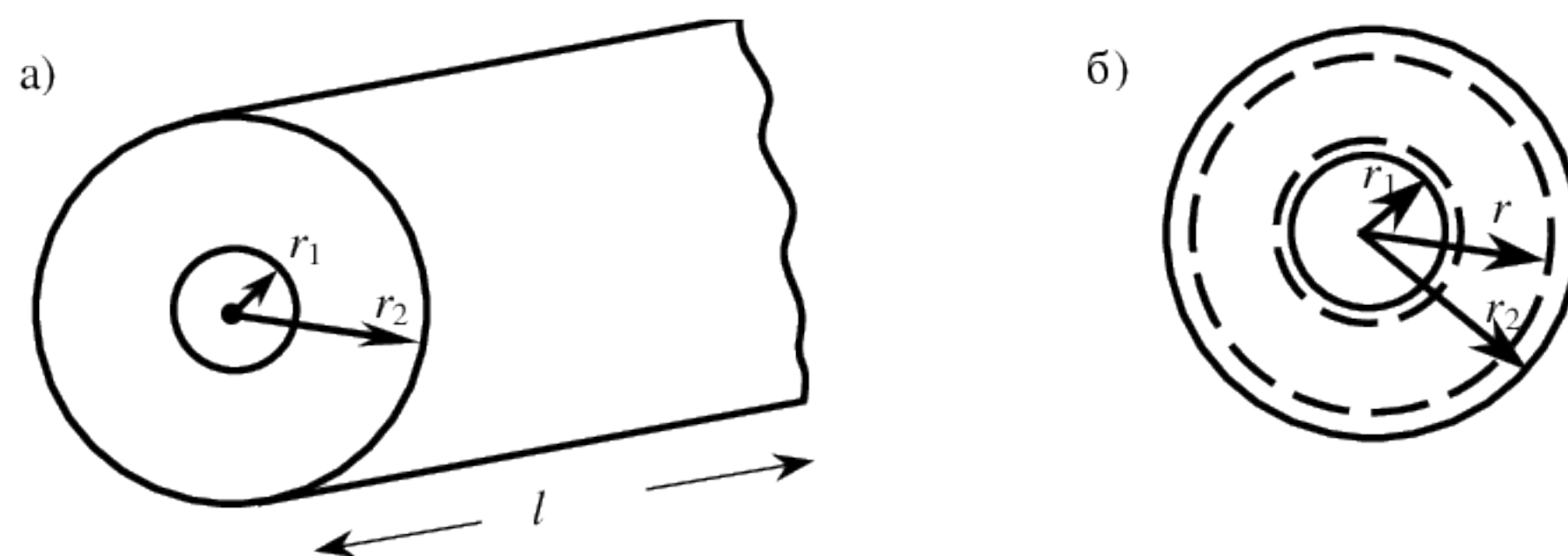


Рисунок 2.5 – Расчет напряженности электрического поля
в изоляционных конструкциях с неоднородным полем:

а – в коаксиальных токопроводах; б – в сферическом конденсаторе

Расчет напряженности поля в любой точке сферического конденсатора (рис. 2.5, б) выполняется по формуле

$$E = \frac{U \cdot r_1 \cdot r_2}{r^2 (r_2 - r_1)}$$

Подобные точные соотношения получены и для других сравнительно простых систем электродов.

Расчет напряженности электрического поля в реальных изоляционных конструкциях часто представляет собой сложную и трудоемкую задачу, и поэтому выполняется с применением численных методов и ЭВМ.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Схема испытательной установки.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

2. Расчет напряженности поля в виде таблиц и графиков.
3. Выводы по результатам работы и заключение о наиболее выгодном расположении барьера для данных электродов.

Лабораторная работа №3. Статистические закономерности пробоя

Цель работы: Ознакомление с основными статистическими закономерностями пробоя при испытании образцов газовой и жидкой изоляции. Изучение статистических методов обработки и анализа экспериментальных данных при испытании изоляции. Расчет параметров и построение дифференциальных и интегральных кривых распределения вероятностей пробоя.

Основы теории:

Образцы изоляции (газовой, жидкой, твердой) и изоляционные конструкции подвергаются различного рода испытаниям. Например, электрическая прочность газовых промежутков и конструкций при постоянном или переменном напряжении определяется при непрерывном подъеме напряжения до пробоя. Скорость нарастания напряжения в этом случае, как правило, не лимитируется. При повторных испытаниях наблюдаемые значения пробивных напряжений будут неодинаковы. Разброс пробивных напряжений при таком виде испытаний определяется многими причинами: не идентичностью промежутков от испытания к испытанию; нестабильной погрешностью измерительного прибора; субъективностью оператора; статистическими закономерностями, связанными с возникновением и развитием самого процесса разряда и т.п., - т.е. разброс зависит от многих случайных факторов.

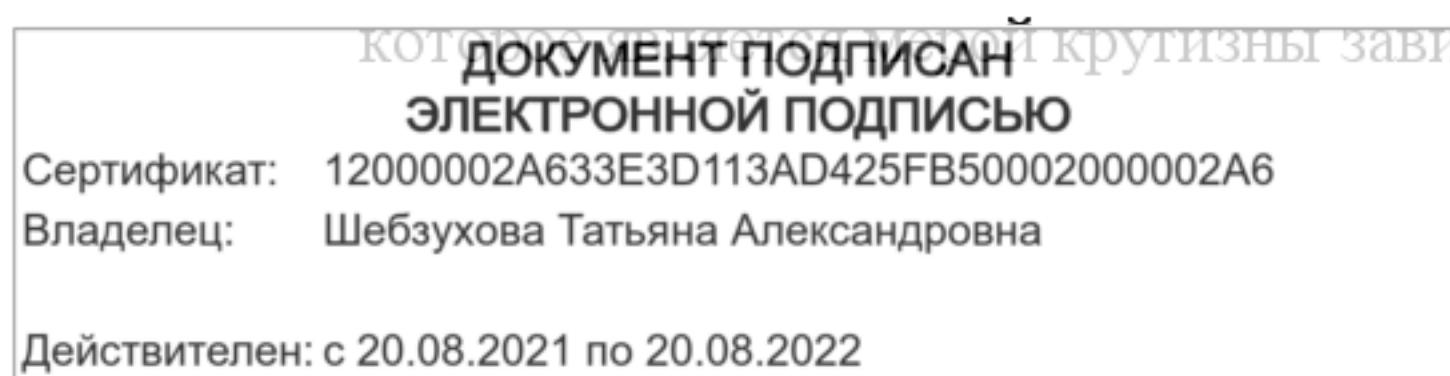
Среднее значение пробивного напряжения:

$$\bar{U}_p = \frac{\sum_{K=1}^N U_{PK}}{N}$$

Часто приводится как характеристики электрической прочности образца или изоляционной конструкции. Однако для многих практических случаев важно знать, помимо $\bar{U}_p$, характеристики, связанные с разбросом пробивных напряжений; минимальное пробивное напряжение $U_{p \min}$; вероятность пробоя при подъеме напряжения до данной величины $U_i - P(U_p \leq U_i)$; среднеквадратичное отклонение

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{K=1}^N (U_{PK} - \bar{U}_p)^2}{N - 1}}$$

которое является функцией крутизны зависимости $P(U_p \leq U_i)$.



Зависимость вероятности пробоя от величины напряжения по экспериментальным данным строится следующим методом. Разделим диапазон полученных N значений пробивных напряжений на n равных элементарных диапазонов ΔU по соотношению

$$\frac{U_{P_{\max}} - U_{P_{\min}}}{n} = \Delta U$$

Каждому из этих элементарных диапазонов пробивного напряжения будет соответствовать число пробоев $\Delta n_1; \Delta n_2 \dots \Delta n_n$ и

$$\sum_{k=1}^n \Delta n_k = N$$

Величина $\frac{\Delta n_k}{N} = p_k$ приблизительно равна вероятности того, что пробой произойдет в диапазоне значения напряжения от U_k до U_{k+1} .

При условиях нормировки $\Delta U=1$ и $\sum_{k=1}^{K=N} p_k = 1$ получается экспериментальная гистограмма (рис.3.1) распределения плотности вероятности пробоев. Суммируя p_k от p_1 до p_i получаем: $P_i(U_p \leq U_i) = \sum_{k=1}^{k=i} p_k$ - приближенную вероятность того, что пробой произойдет при U_p . Ступенчатый график $P_i(U_p \leq U_i)$ дает экспериментальную зависимость P_i от напряжения. Из теории вероятности известно, что при $N \rightarrow \infty, \Delta U \rightarrow dU, \Delta n_k \rightarrow dn$ функция $P_k(U)$ представляет собой распределение плотности вероятности или дифференциальную кривую распределения вероятностей пробоя.

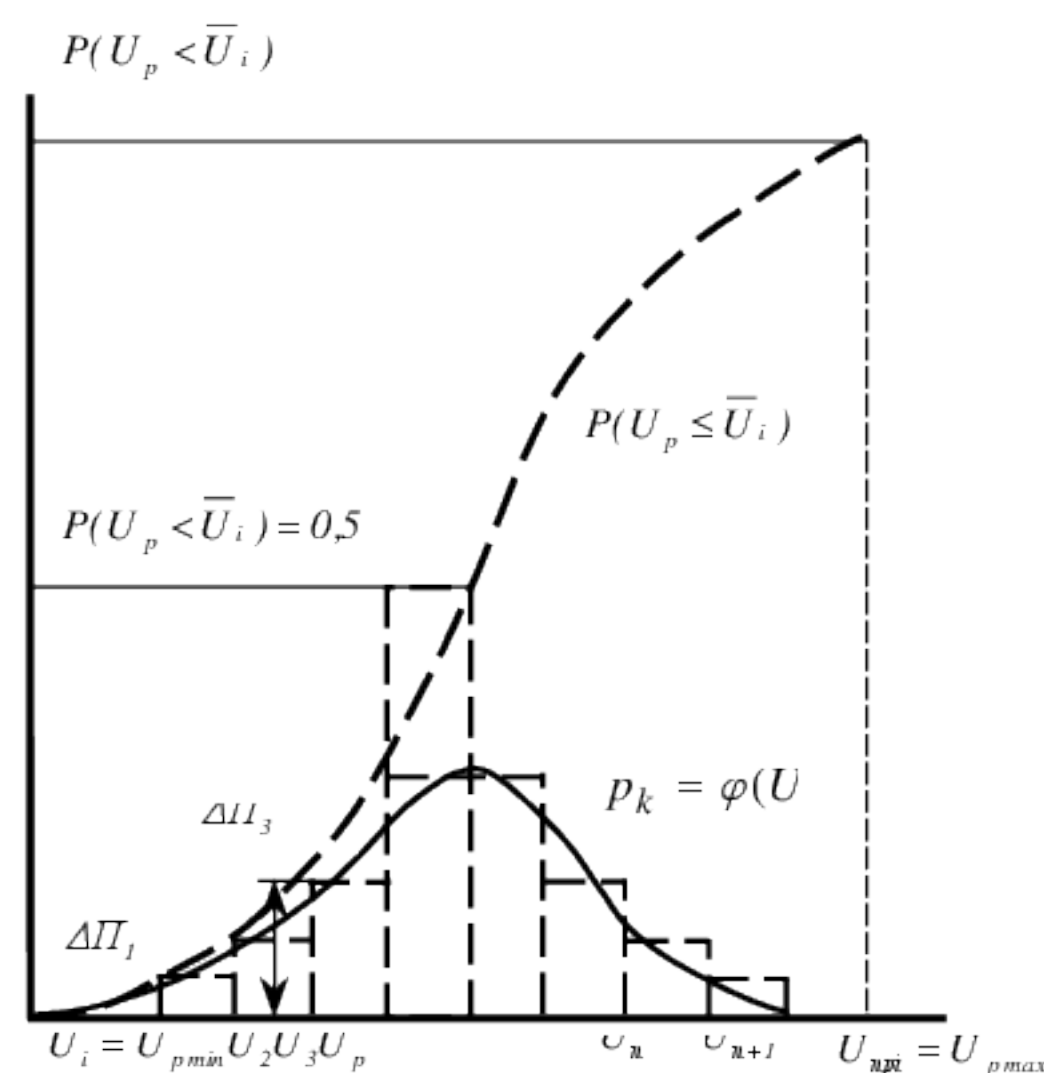


Рисунок 3.1. Построение экспериментальных гистограмм распределения вероятности пробоя и дифференциальных кривых

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

дифференциального и интегрального распределений

При этом

$$P(U_p < U_1) = \int_{-\infty}^{U_1} p_k(U) \cdot dU$$

интегральная кривая распределения вероятности пробоя. В общем случае эти кривые экспериментально получены быть не могут ($N \rightarrow \infty$). Однако, исходя из физических предпосылок, экспериментальные гистограммы для p_k и $P_i(U_p \leq U_i)$ могут быть аппроксимированы каким-либо математическим законом распределения вероятностей.

Многочисленные исследования показали, что при многократных пробоях воздушных промежутков зависимость вероятности возникновения разряда от напряжения разряда в пределах $-3\sigma \dots +3\sigma$ удовлетворительно описывается функцией нормального распределения Гаусса

$$P(U \leq U_p) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{U_p} \exp\left[-\frac{(U_p - \bar{U}_p)^2}{2\sigma^2}\right] dU_p,$$

где $\bar{U}_p$ и σ - параметры распределения.

Точность определения найденных значений $\bar{U}_p$ и σ по сравнению с истинным зависит от N . Например, относительная погрешность определения σ и $\bar{U}_p$ с надежностью 0,95 находится по соотношениям

$$\varepsilon_{U_p}^x = \frac{1,96}{\sqrt{N}} \cdot \frac{\sigma}{\bar{U}_p};$$

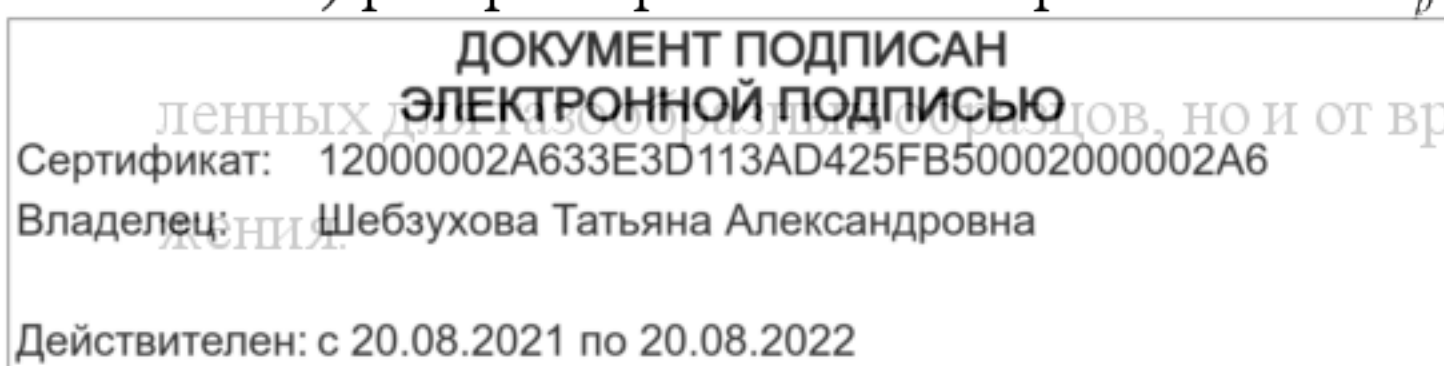
$$\varepsilon_{\sigma}^x = \frac{1,96}{\sqrt{2N}}.$$

Соответствующие абсолютные погрешности

$$\varepsilon_{\bar{U}_p} = \varepsilon_{U_p}^x \cdot \bar{U}_p; \quad \varepsilon_{\sigma} = \varepsilon_{\sigma}^x \cdot \sigma.$$

Построение кривых нормального распределения по известным параметрам σ и $\bar{U}_p$ производится с использованием соответствующих таблиц, приведенных в пособиях и справочниках по теории вероятности и математической статистике (некоторые табличные значения приведены в приложении к данной работе).

При аналогичных испытаниях образцов жидкости (например, трансформаторного масла) разброс пробивных напряжений и $\bar{U}_p$ зависят не только от всех факторов, перечис-



Формирование разряда в технически чистой жидкости при сравнительно длительном воздействии напряжения (секунды и более) связано с наличием и расположением в момент испытания в промежутке различного рода примесей, пузырьков, их накоплением, деформацией и т.д.

Поэтому разброс пробивных напряжений в жидкости будет больше, чем в газе, и, повторяем, будет сильно зависеть от скорости подъема напряжения. Следовательно, при испытаниях жидких образцов скорость нарастания напряжения должна быть строго лимитирована.

Кривая $\frac{N_{pi}(U_p \leq U_i)}{N} \approx P_i(U_p \leq U_i)$ при испытаниях жидкой изоляции также удовлетворительно аппроксимируется усеченным (от -3σ до $+3\sigma$) интегральным распределением Гаусса, хотя отличие действительной кривой от нормального закона здесь может быть более заметно.

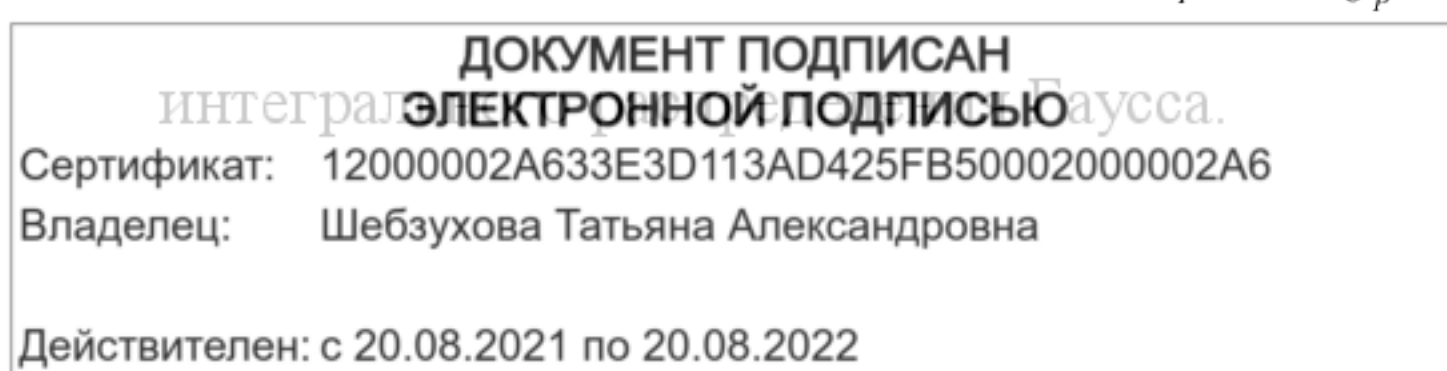
Для большинства практически важных случаев при известной (найденной) кривой распределения вероятностей пробоев по напряжениям за минимальное разрядное напряжение при идентичных условиях опыта принимается $U_{p \min} = \bar{U}_p - 3\sigma$.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Получить экспериментальные данные для определения статических характеристик пробоя при испытании воздушных и масляных промежутков при плавном подъеме напряжения промышленной частоты.
2. Построить по экспериментальным данным гистограммы для p_k , рассчитать $P_i(U_p < U_i)$ и $\bar{U}_p$ и оценить точность их определения.
3. По найденным $\bar{U}_p$ и σ , используя таблицы, построить график нормального распределения (интегральная кривая) и определить U_{min} .
4. Для полученных опытных данных по программе ЭВМ (по отдельной инструкции) построить гистограммы плотности вероятности и вероятности пробоев для разных величин n . Рассчитать параметры $\bar{U}_p$, σ , $\varepsilon_{\bar{U}_p}$, ε_σ и получить кривые дифференциального и



Работа выполняется на высоковольтной испытательной установке, которая приведена на рис. 3.2.

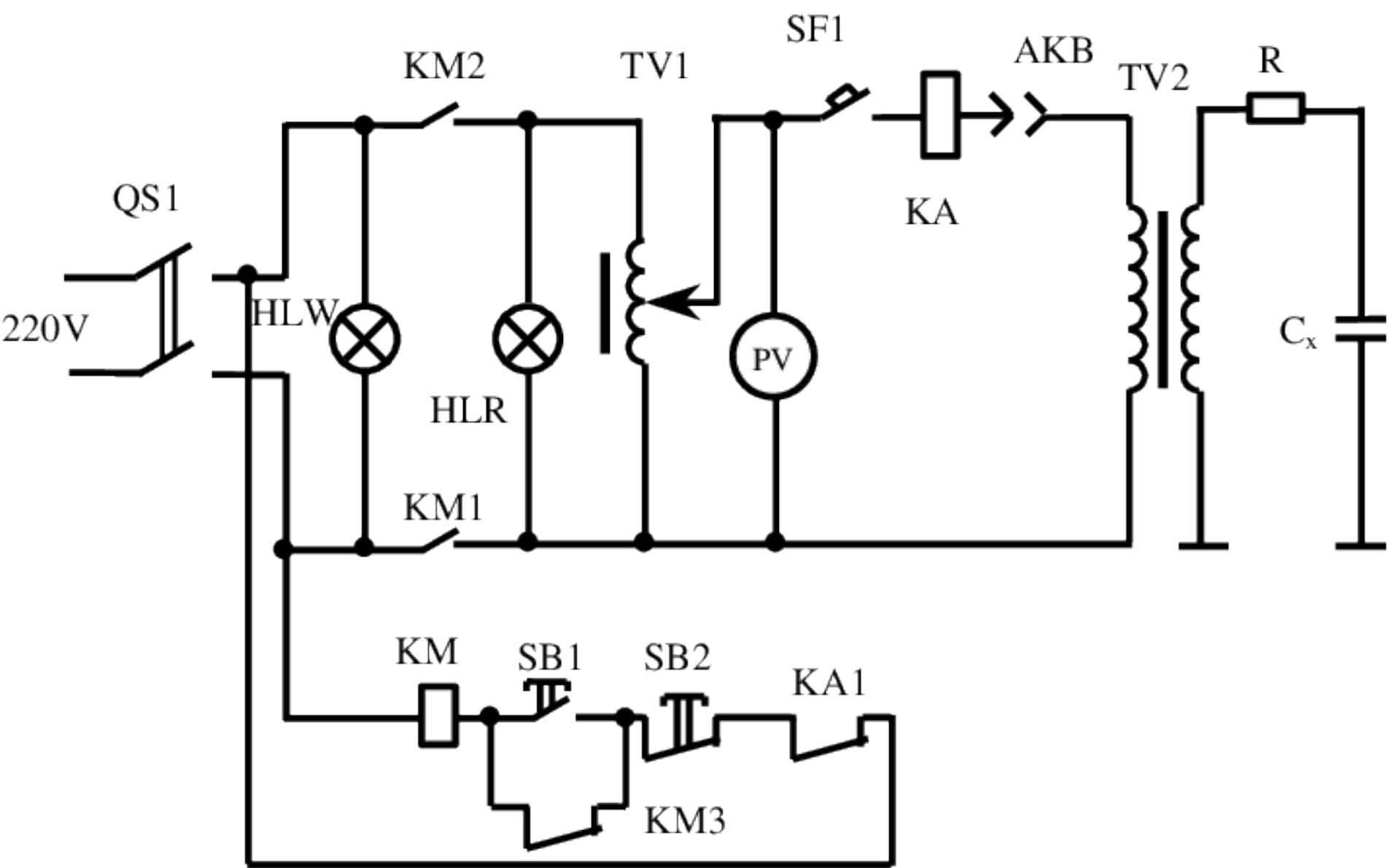


Рисунок 3.2 – принципиальная схема испытательной установки

Включение обеспечивается с помощью рубильника QS1, кнопки SB1 (ВКЛ) и магнитного пускателя KM. Отключение и защита – с помощью токового реле КА, автомата SF1 и кнопки SB2 (ОТКЛ).

При выполнении опытов использовать заданные преподавателем промежутки. Рекомендуется для получения приемлемых оценок выполнить N=50 опытов для каждого промежутка. Скорость подъема напряжения и условия проведения опытов выдержать, по возможности, постоянным. Для построения гистограммы по данным 50 опытов n принимается обычно в пределах 7-9. При работе с программой ЭВМ число диапазонов n можно менять.

Результаты измерений записать в табл. 3.1, а расчеты – в табл. 3.2.

Таблица 3.1

№ п/п	U ₁ , В	U ₂ , кВ U ₂ =k _{гр} U ₁	U _{2i} , кВ	№ п/п	U ₁ , В	U ₂ , кВ	U _{2i} , кВ
1			$U_{2,1} \approx U_{pmin}$	26			$U_{2,26} \approx \overline{U}_p$
2				27			
...			$U_{2,25} \approx \overline{U}_p$	...			$U_{2,50} \approx U_{pmax}$
				50			

25

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Таблица 3.2

№ П/ П	$U_{pk} - \bar{U}_p$	Δn_k	$\frac{\Delta n_k}{N} = P_k$	$P_i(U_p \leq U_i)$	$\bar{U}_p$	σ	$\varepsilon_{\bar{U}_p}$	ε_σ

По полученным и рассчитанным данным построить гистограммы для $p_k(\Delta U_k)$ и $P_i(U_p \leq U_i)$, интегральную кривую нормального распределения Гаусса в пределах $(-3\sigma) \dots (+3\sigma)$.

Вероятность попадания нормально распределенной случайной величины U (в нашем случае - вероятность пробоя) в интервал (U_1, U_2) вычисляется по формуле

$$P(U_1 < U < U_2) = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{U_2 - \bar{U}}{\sigma} \right) - \Phi \left(\frac{U_1 - \bar{U}}{\sigma} \right) \right],$$

где $\Phi \left(\frac{U - \bar{U}}{\sigma} \right) = \frac{2}{\sqrt{2\pi}} \int_0^{\frac{U - \bar{U}}{\sigma}} e^{-\frac{t^2}{2}} \cdot dt$ - функция Лапласа (интеграл вероятности), некото-

рые значения которой приведены в таблице.

Приведем расчет одной точки. Допустим, по экспериментальным данным $\sigma = 5$ кВ, $\bar{U} = 30$ кВ. Определим $P(U \leq 25)$.

$$\begin{aligned} P(U_p \leq 25) &= P(0 \leq U_{np} \leq 25) = \frac{1}{2} \left[\Phi \left(\frac{25 - 30}{5} \right) - \Phi \left(\frac{0 - 30}{5} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{2} [\Phi(-1) - \Phi(-6)] = \frac{1}{2} [-0,6827 + 1] = 0,1586 \end{aligned}$$

Интеграл вероятности является функцией нечетной и

$$\Phi(-U) = -\Phi(U).$$

Аналогично рассчитываются все остальные точки в пределах от -3σ до $+3\sigma$.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

4. Порядок выполнения работ по оборудованию и материалов;

5. Порядок выполнения работ;

6. Вычисления и обработка результатов;

7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Чем определяется разброс пробивных напряжений образцов изоляции?
2. Почему разброс пробивных напряжений жидкой изоляции больше, чем воздушной?
3. Является ли исчерпывающей характеристикой изоляционных возможностей конструкции величина $\bar{U}_p$?
4. Поясните смысл основных параметров нормального распределения ($\sigma, \bar{U}_p$).
5. Почему нормальное распределение Гаусса удовлетворительно аппроксимирует экспериментальную кривую $P(U_p = U_i)$ в пределах $\bar{U}_p \pm 3\sigma$?
6. Часто очень важной величиной для оценки изоляции является величина $U_{p,min}$. Почему?
7. Определите необходимый объем испытаний для оценки $\bar{U}_p$ и σ при заданной величине погрешности.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Лабораторная работа №4. Исследование перенапряжений в обмотках трансформатора

Цель работы: Ознакомиться со схемой и работой анализатора переходных процессов. Изучить методы определения перенапряжений в главной и продольной изоляции обмотки трансформатора при воздействии на обмотку грозовых импульсов.

Основы теории:

Изоляция обмоток высоковольтных силовых трансформаторов в значительной мере определяется перенапряжениями, возникающими в обмотках при воздействии на них грозовых импульсов. При падении на обмотку импульсной волны возникают сложные электромагнитные процессы, которые приводят к быстро меняющемуся перенапряжением на элементах главной и продольной изоляции.

Точный расчет этих процессов практически невозможен вследствие взаимного влияния многих элементов: распределенных продольных и поперечных емкостей обмотки, собственных и взаимных индуктивностей витков и обмоток и т.п. Поэтому наряду с теоретическими приближенными расчетами и моделированием процессов с помощью ЭВМ часто и наиболее плодотворно используются испытания на моделях или реальных обмотках с применением анализатора переходных процессов.

Обмотка трансформатора может быть представлена линейной электрической цепью (рис. 4.1), параметры которой отнесены к единице длины.

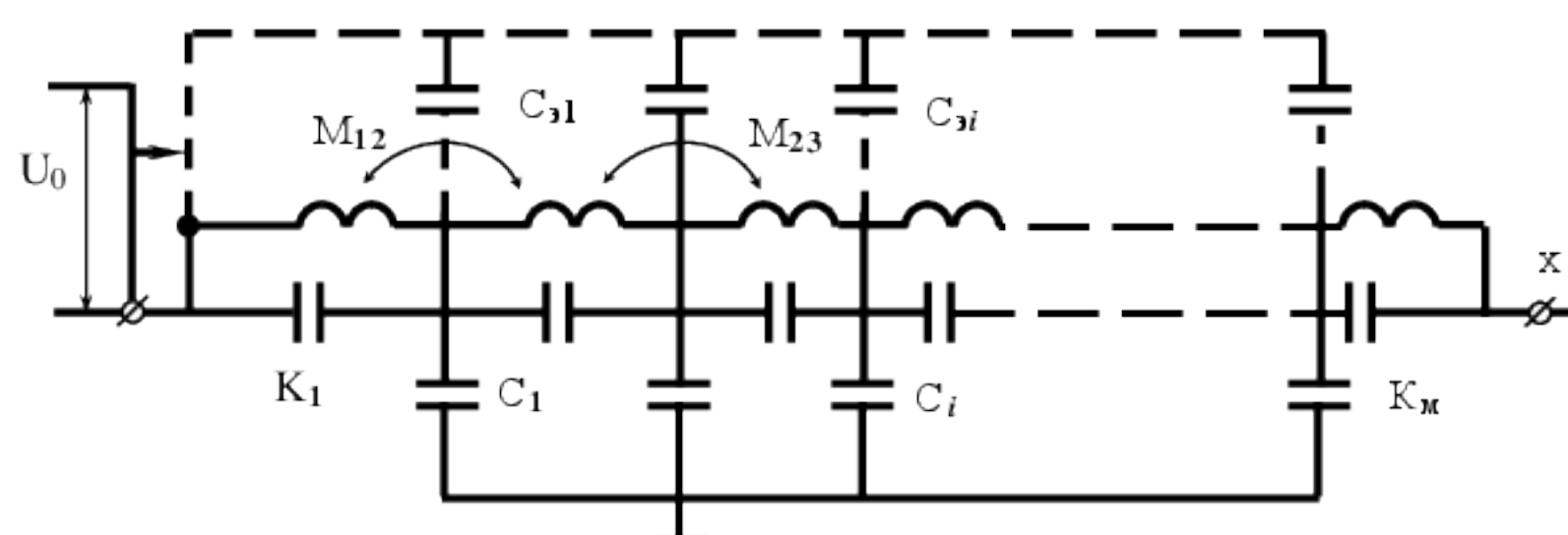


Рисунок 4.1 – Схема замещения обмотки однофазного трансформатора при падении на обмотку прямоугольной волны.

При падении на трансформатор прямоугольной волны $U_0 = const$ индуктивности в первый момент не пропускают тока, и распределение напряжения вдоль обмотки определяются только емкостями C и K . Расчет такой емкостной цепочки ([1], [3], с.201), приводит к

приближенно

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$U_{\text{нач}}(x) \approx U_0 e^{-\alpha \frac{x}{t}} \approx U_0 e^{-\alpha x},$$

Справедливому и для случая заземленной, и для случая изолированной нейтрали. При этом для современных трансформаторов:

$$al = \sqrt{\frac{C}{K}} \cdot l = \sqrt{\frac{C \cdot l}{K/l}} = \sqrt{\frac{C_{об}}{K_{об}}} = 10 \div 20 .$$

Так как витки и катушки обмотки соединены между собой и образуют токопроводящую цепь, первоначально возникшее распределение напряжения не может сохраниться. Возникает периодический переходный процесс, который закончится установившимся (принужденным) распределением напряжения вдоль обмотки. Принимая $M_{nk} \ll L$ для схемы рис. 4.1, получим:

при заземленной нейтрали:

$$U_{ycm}(x) = U_0 \left(1 - \frac{x}{l}\right);$$

при изолированной нейтрали:

$$U_{ycm}(x) = U_0 .$$

Напряжение в некоторой точке x в произвольный момент переходного процесса может быть представлено в виде:

$$U(x, t) = U_{ycm}(x) + U_{св}(x, t) = U_{ycm}(x) + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k(x) \cos \omega_k t$$

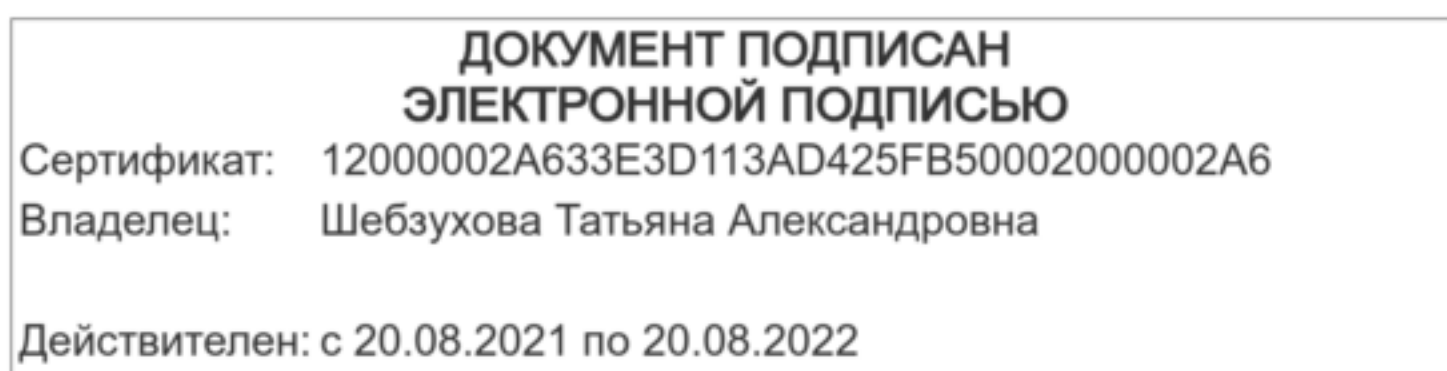
где ω_k - частота k -ой пространственной гармоники,

$U_k(x)$ - функция распределения по x затухающих амплитуд собственных колебаний частоты ω .

Частота составляющих определяется параметрами эквивалентной схемы (рис.4.1),

$$\omega_k = \frac{k\pi}{\sqrt{LC + K^2 \pi^2 LK}},$$

а амплитуды зависят от рассматриваемой точки и краевых условий. Например, при глухом заземлении нейтрали $U_1(x)$, $U_2(x)$ и $U_3(x)$ распределены по длине обмотки, как показано на рис. 4.2,а – кривые 1, 2, 3. С ростом номера гармоники амплитуды быстро уменьшаются, поэтому для грубой оценки переходного процесса достаточно учитывать лишь три первые составляющие. Характерные кривые перенапряжения в обмотке в различные моменты времени представлены на рис.4.2. Кривая, проведенная через максимальные значения напряжения, возникающие в обмотке в различные моменты времени, называется огибающей максимальных потенциалов.



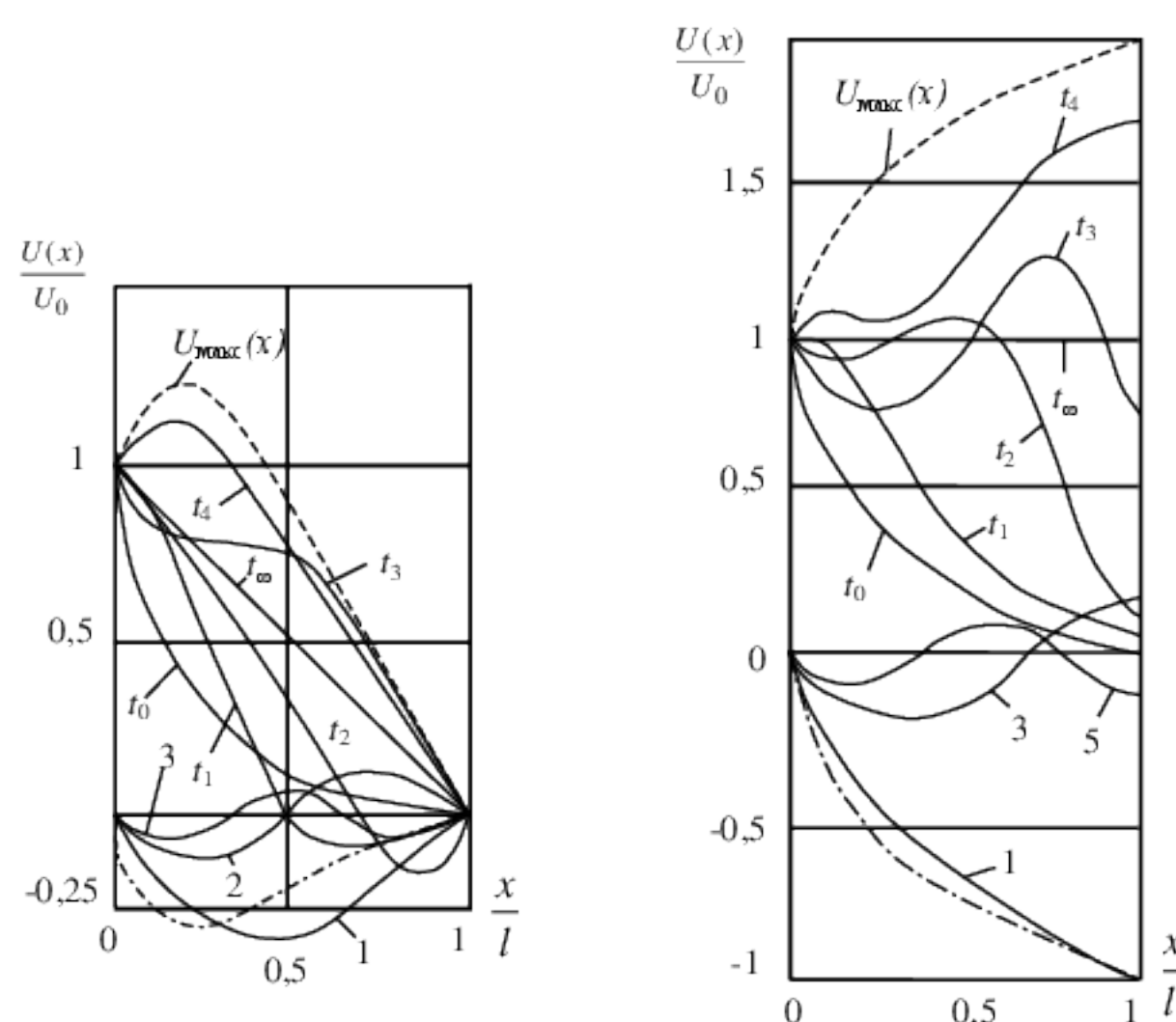


Рисунок 4.2 – Кривые распределения напряжения по обмотке трансформатора

Для приближенной оценки максимально возможных потенциалов в каждой точке обмотки можно считать, что гармонические колебания не затухают и период колебания T всех гармоник одинаков. Тогда

$$U(x)_{\max} = U_{\text{уст}}(x) + \sum_{k=1}^{k=\infty} U_k(x) =$$

$$= U_{\text{уст}}(x) + [U_{\text{уст}}(x) - U_{\text{нач}}(x)] = 2U_{\text{уст}}(x) - U_{\text{нач}}(x)$$

Как видно из рис. 4.2 максимальные напряжения при изолированной нейтрали наблюдаются на конце обмотки и могут достичь величин $(1,7-1,9) U_0$. Для трансформаторов с заземленной нейтралью максимальное напряжение до $(1,2-1,3) U_0$ наблюдается вблизи начала обмотки $\left(\frac{x}{\ell} \approx 0,3\right)$.

Максимальные напряженности в продольной изоляции наблюдаются в начале обмотки в первый момент после падения волны. Величина максимального градиента может быть оценена по соотношению

$$\left| \frac{dU}{dx} \right| = U_0 \alpha e^{-\alpha x}$$

$$E_{\max} = \left| \frac{dU}{dx} \right|_{\max} = \left| \frac{dU}{dx} \right|_{x=0} = U_0 \cdot \alpha = \frac{U_0}{l} \alpha l = E_{\text{ср}} \cdot \sigma \ell$$

где $E_{\text{ср}} = \frac{U_0}{\ell}$ - продольная напряженность при равномерном распределении напряже-

ния вдоль обмотки.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Максимальные напряжения на продольной изоляции распространяются вглубь обмотки, при этом уменьшается их амплитуда.

Для снижения перенапряжений, возникающих на главной и продольной изоляции, в некоторых трансформаторах устанавливаются емкостные экраны в виде разомкнутых колец, соединенных с началом обмотки. В этом случае поперечные токи, оттекающие от обмотки через емкости C_i , компенсируются токами, подтекающими через емкости $C_{эi}$, и первоначальное распределение напряжения вдоль обмотки выравнивается. Полное устранение колебательного процесса в обмотке трансформатора с заземленной нейтралью при $C_i = const$ наступает при условии

$$C_{эi} = \frac{m-i}{i} C_i$$

где i – номер катушки, считая от начала обмотки; m – число катушек в обмотке (рис.4.1).

В настоящей работе с помощью анализатора переходных процессов исследуются перенапряжения в обмотке трансформатора ТМ 10/380 320 кВА. Используется изолированная обмотка ВН одной фазы. Обмотка низкого напряжения этой фазы разомкнута.

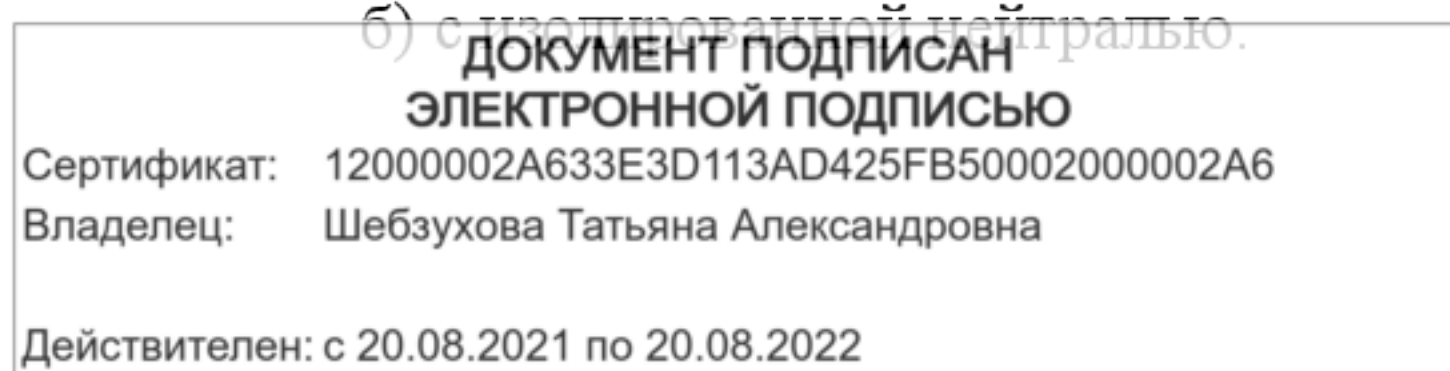
Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Подать напряжение на схему с помощью выключателя QS1 и автотрансформатором Т1 установить необходимое напряжение на тиристоре VU1, VD1 (по указанию преподавателя).
2. Изменяя системой напряжение R1, C2 на управляющем электроде открыть тиристор. На выходе генератора появляются импульсы.
3. Проконтролировать форму импульса с помощью осциллографа.
4. Подключить исследуемый трансформатор к генератору импульсов согласно рис. 4.5.
5. С помощью осциллографа исследовать изменение напряжения при переходном процессе в отдельных точках (1,2,3,4,5,6) обмотки на главной изоляции (рис. 4.3):
 - а) с заземленной нейтралью;

б) с изолированной нейтралью.



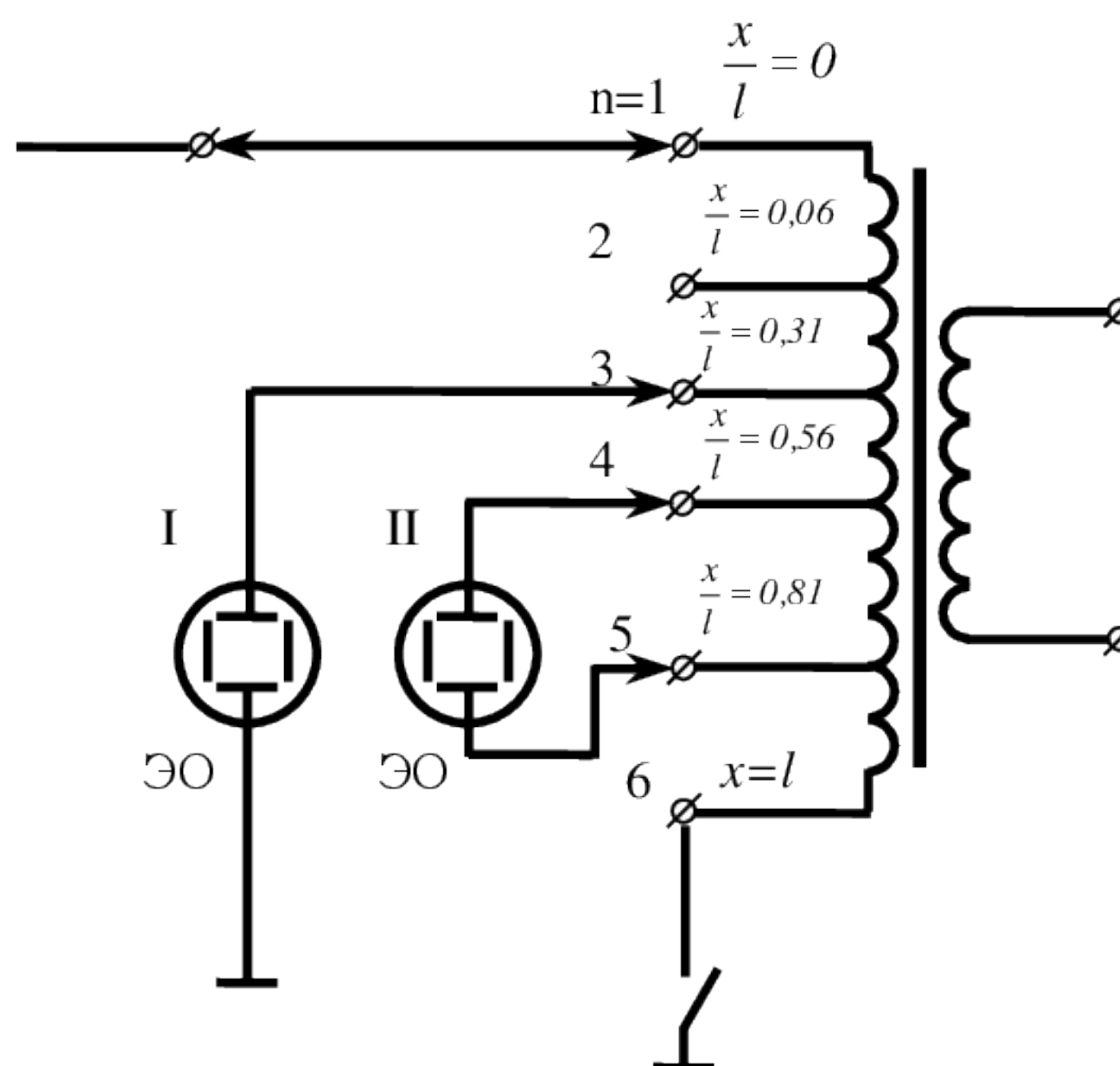


Рисунок 4.3 – Схема подключения осциллографа при исследовании перенапряжений в обмотке трансформатора; 1 - измерение напряжения на главной изоляции; 2 – измерение напряжения на продольной изоляции

Результаты работы записать в табл. 4.1.

Таблица 4.2

Исследуемый участок обмотки	Заземленная нейтраль	Изолированная нейтраль
	$\Delta U_{\text{макс}}$	$\Delta U_{\text{макс}}$
1-2		
2-3		
.....		

Зарисовать 2-3 характерные осциллограммы.

Проверить влияние величины R_2 на ΔU при изолированной и заземленной нейтрали.

По результатам табл. 4.2 построить в относительных единицах кривые $\frac{E_{\text{макс}}(x)}{E_{\text{ср}}} = f(x)$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$E_{\text{макс}}(x) = \frac{\Delta U_{\text{макс}}}{\Delta l}$ или, например

$$E_{\text{макс}}(1-2) = \frac{\Delta U_{\text{макс}}(1-2)}{0,06} \text{ и т.д.}$$

Аналогичные исследования можно произвести на модели обмотки, схема которой соответствует схеме замещения трансформатора (рис. 4.1). Смонтированная в лаборатории ТВН модель имеет следующие параметры: емкости катушек относительно земли $C_3 = C_1 = \dots C_i \dots = C_\partial = 800 \text{ нФ}$; продольные емкости $C_n = K_1 = \dots K_i = K_{10} = 820 \text{ нФ}$; $L_1 = L_i = \dots L_{10} = 1,8 \text{ Гн}$. При таких величинах емкостей $al = \sqrt{\frac{C_i}{C_n}} \cdot N \approx 10$, т.е. соответствует al реальных трансформаторов.

Все условные точки модели имеют выводы, позволяющие набирать чисто емкостные цепочные схемы, схемы с индуктивностями, схемы с C_∂ .

Емкости C_∂ - сменные и могут меняться от 100 пФ до 3000 пФ, что дает возможность регулировать первоначальное распределение напряжения вдоль обмотки от экспоненциального $U(n) = U_0 \cdot e^{-\alpha x}$ при $C_\partial = 0$ до линейного при

$$C_\partial = \frac{N-n}{n} C_\partial.$$

В качестве индуктивностей L используются дроссели. Собственная частота колебаний модели обмотки при включенных C_n и C_∂ лежит в пределах $10^3 \div 2 \cdot 10^3$ Гц, что близко к собственным частотам колебаний обмоток реальных трансформаторов. Однако эта частота несколько ниже собственной частоты исследуемого трансформатора ТМ – 10/0,4; 320 кВА ($5 \cdot 10^3$ Гц). Переходной процесс в модели регистрируется более четко и наглядно, и работа с моделью достаточно проста.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Контрольные вопросы:

1. Нарисуйте схему замещения обмотки трансформатора в момент падения на обмотку прямоугольной волны, в установившемся режиме и в переходном режиме.
2. Что такое огибающие максимальных потенциалов?
3. На каком участке обмотки возможны максимальные напряжения в переходном режиме для случая: а) с заземленной нейтралью; б) с изолированной нейтралью?
4. Как оценить величину напряженности в продольной изоляции, если известна кривая распределения напряжения вдоль обмотки?
5. В какой части обмотки наблюдаются наибольшие напряжения на продольной изоляции?
6. Какие вы знаете способы выравнивания распределения напряжения вдоль обмотки?
7. Как работает схема анализатора переходных процессов? Назначение ее отдельных элементов.
8. Как находится первоначальное и установившееся распределение напряжения вдоль обмотки с помощью осциллограмм, полученных при работе анализатора переходных процессов?
9. Как влияет на максимальное напряжение в главной изоляции и максимальные градиенты в продольной изоляции крутизна фронта падающей на обмотку волны?

Лабораторная работа №5. Защитные разрядники и ограничители перенапряжений

Цель работы: Ознакомление с назначением, принципом действия и конструкцией разрядников и ограничителей перенапряжений (ОПН). Изучение особенностей работы и применения основных типов трубчатых и вентильных разрядников и ОПН. Расчет характеристик и защитного действия разрядников с использованием ЭВМ.

Основы теории:

Волны перенапряжений, возникшие на линиях при ударах молнии, распространяются по проводам, доходят до подстанции и могут представлять опасность для изоляции установленного на подстанции оборудования. Такой же опасности могут подвергаться отдельные места на линии, имеющие ослабленную изоляцию или особенно ответственные участки (транспозиционные опоры, пролеты пересечения, переходы через транспортные магистрали, большие реки и т.д.). В этих случаях наряду с защитой от прямых ударов с помощью молниеотводов применяется защита от набегающих волн. Для предупреждения повреждения какой-либо изоляционной конструкции параллельно может быть включен искровой промежуток ИП (рис. 5.1, а), вольт-секундная (U_p-t_p) характеристика которого должна лежать ниже U_p-t_p характеристики защищаемой изоляции (рис. 5.1, соответственно кривые 2 и 1). При соблюдении этого условия падение волны перенапряжений вызовет пробой ИП с последующим резким падением («срезом») напряжения на ИП и защищаемой изоляции.

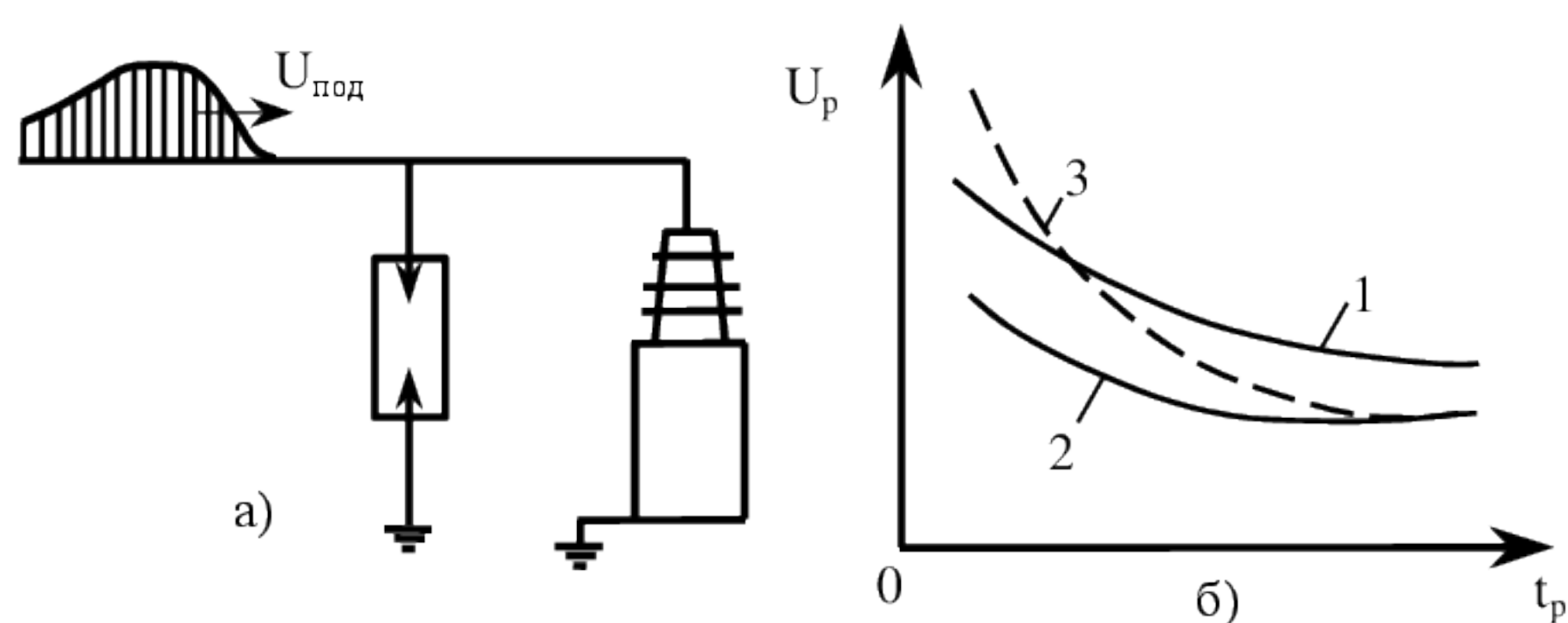
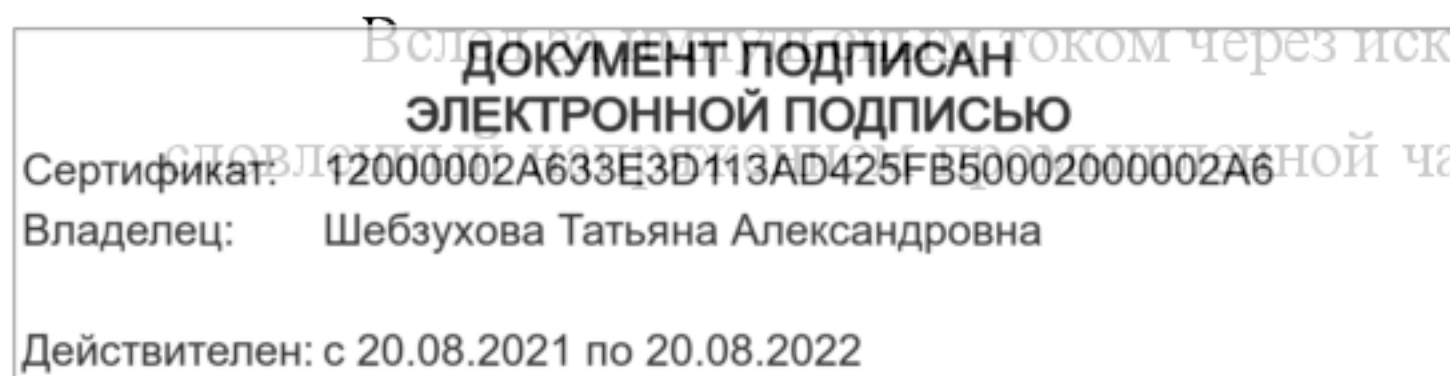


Рисунок 5.1 – Принцип защиты от набегающих волн:

а – принципиальная схема; б – вольт-амперные характеристики



Вслед за этим ток через искровой промежуток начнет протекать ток, обусловленный частотой электроустановки, - сопровождающий

ток, который должен быть отключен с помощью релейной защиты и отключающих аппаратов.

Защитные разрядники обеспечивают не только защиту изоляции от перенапряжения, но и гашение дуги сопровождающего тока в течение времени, меньшего, чем время действия релейной защиты.

В последнее время активно внедряются ограничители перенапряжений (ОПН), представляющие собой устройство с варистором, ограничивающим сопровождающий ток практически до нуля. ОПН включают непосредственно, параллельно изоляции, без искрового промежутка.

Существует два основных типа разрядников, отличающихся принципом гашения дуги сопровождающего тока: трубчатые (РТ), в которых гашение дуги осуществляется созданием интенсивного продольного дутья и вентильные (РВ), в которых дуга гаснет благодаря уменьшению сопровождающего тока с помощью нелинейного сопротивления (варистора), включенного последовательно с искровым промежутком или достаточно сложной системой гашения дуги сопровождающего тока.

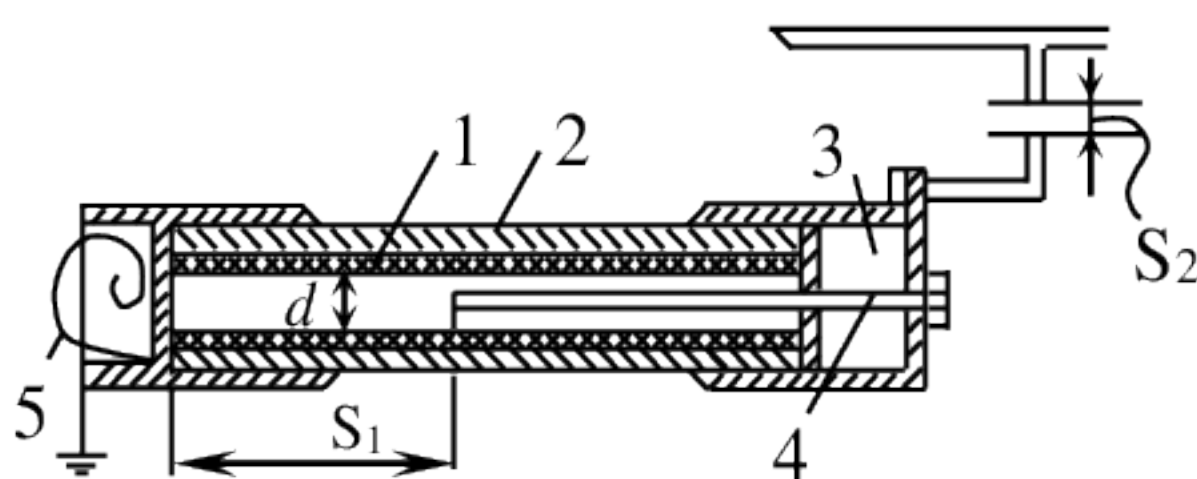


Рисунок 5.2 – Трубчатый разрядник

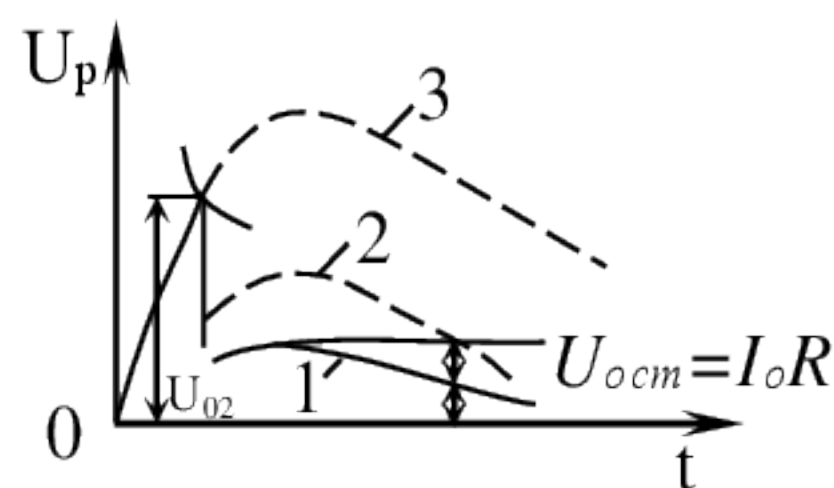


Рисунок 5.3 – Определение остающегося напряжения разрядника

При перенапряжении в сети оба искровых промежутка пробиваются, и волна перенапряжения срезается. По пути, созданным импульсным разрядом, начинает протекать сопровождающий ток, и искровой разряд переходит в дуговой. Под действием высокой температуры канала дуги материал трубки разлагается с выделением большого количества газов, давление в ней резко возрастает (до нескольких МПа), и газы с силой вырываются через отверстия фланца 3, создавая интенсивное продольное дутье. В результате дуга гаснет при первом прохождении тока через нуль.

При срабатывании разрядника из него выбрасываются раскаленные газы в виде факела длиной 1,5-3,5 м и шириной 1-2,5 м и раздается звук, напоминающий выстрел. Поэтому для предупреждения междуфазных замыканий при монтаже разрядников нужно следить, чтобы в зону выброса не попадали токоведущие части соседних фаз.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Напряжение срабатывания разрядников можно регулировать, изменяя расстояние внешнего искрового промежутка S_2 , но нельзя снижать ниже определенного минимума (табл. 5.1), так как это вызывает слишком частые срабатывания и повышенный износ разрядника.

Таблица 5.1

U_n , кВ	3	6	10	35	110	220
S_2 , мм	8	10	15	100	400	500

Величина остающегося напряжения (кривые 1 и 2, рис.5.3) определяется, в основном, сопротивлением заземления разрядника R_3 , которое должно быть, по возможности, малым. По нормам $R_3 \leq 10$ Ом, тогда при $Z=400$ Ом имеем $U_{ост} \approx 0,05U_n$.

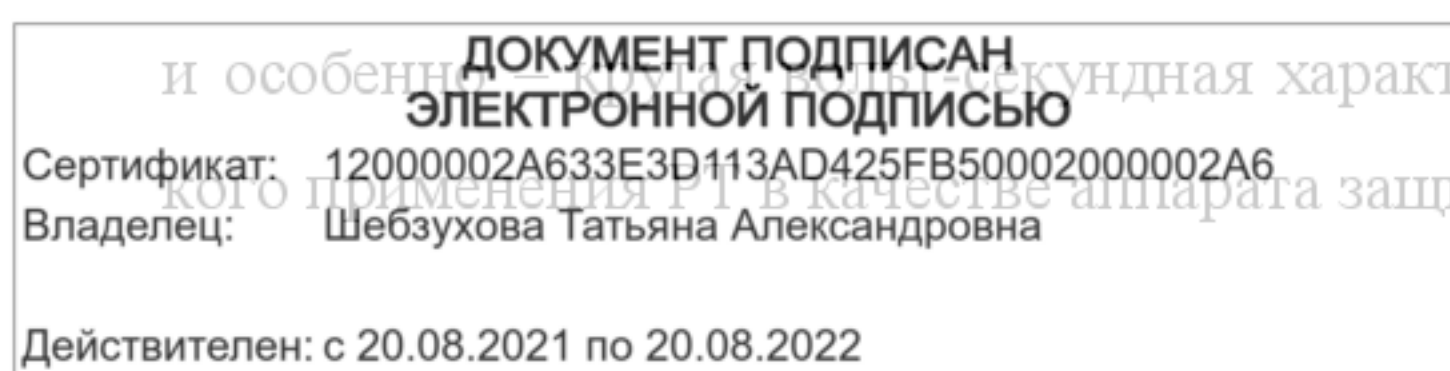
$$\frac{2U_n}{Z + R_3} R_3 = \frac{2U_n}{400 + 10} \cdot 10 \approx 0,05U_n$$

Для успешного гашения дуги необходима определенная интенсивность газообразования, поэтому существует нижний предел отключаемых токов I_{min} , при которых разрядник еще может погасить дугу в течении 1-2 полупериодов. Верхний предел отключаемых токов I_{max} также ограничивается, так как слишком интенсивное газообразование может привести к разрушению (разрыву) разрядника. Диапазон отключаемых токов указывается в обозначении разрядника: например, РТВ $\frac{35}{0,5 - 2,5}$ означает трубчатый разрядник винипластовый на 35 кВ с пределами токов 0,5...2,5 кА.

Выбор трубчатых разрядников производится по номинальному напряжению сети и пределам токов короткого замыкания (КЗ) сети в точке установки РТ. Максимальный ток КЗ рассчитывают при условии включения всех элементов сети (линии, трансформаторы, генераторы) с учетом апериодической составляющей тока КЗ, минимальный ток – при схеме сети с частично выключенными элементами (например, для капитального ремонта) и без учета апериодической составляющей. Найденные пределы тока КЗ должны укладываться в пределы отключаемых токов трубчатого разрядника. Трубчатые разрядники выпускаются на напряжение от 3 до 220 кВ, отключаемые токи лежат в пределах от 0,2...7,0 и 1,5...30 кА при напряжении 3...35 кВ до 0,4...7,0 и 2,2...30 кА при напряжении 110 кВ.

Основным недостатком трубчатых разрядников являются: наличие зоны выхлопа; крутой срез волны перенапряжения; замыкания (хотя и кратковременные) линий на землю,

и особенности конструкции, обуславливающая характеристика, исключающая возможность широкого применения РТ в качестве аппарата защиты подстанционного оборудования.



Недостатком РТ является также наличие предельных отключаемых токов, что осложняется их производство и эксплуатацию.

Благодаря своей простоте и низкой стоимости трубчатые разрядники применяются в качестве вспомогательных средств защиты подстанций, а также отдельных участков линий. Следует, однако, отметить, что в последнее время применение трубчатых разрядников все более ограничивается, и есть предпосылки, что в сетях РБ скоро их не останется вовсе (по последним данным уже не осталось).

Вентильные разрядники являются основными аппаратами в схемах защиты изоляции электрооборудования станций и подстанций.

Вентильный разрядник, например, РВС (рис.5.4) состоит из системы соединенных последовательно искровых промежутков ИП и варистора (нелинейного сопротивления). Сопротивление варистора зависит от приложенного напряжения, поэтому его вольтамперная характеристика (и соответственно разрядника в целом) также нелинейная (рис.5.5).

Работает вентильный разрядник следующим образом. Когда мгновенное значение волны перенапряжения U_n на разряднике достигает импульсного пробивного напряжения искровых промежутков, они пробиваются. Сопротивление разрядника при этом мало, и через него протекает значительный по величине импульсный ток I_p , который и определяет напряжение на разряднике. Наибольшее напряжение на разряднике при максимально допустимом импульсном токе через него $I_{u, max}$ называют остающимся напряжением $U_{ост}$. Это напряжение должно быть на 20...25% меньше импульсной прочности защищаемой изоляции. После прохождения импульсного тока через разрядник начинает протекать сопровождающий ток промышленной частоты $I_{сопр}$, обусловленной рабочим напряжением сети. Так как это напряжение значительно ниже амплитуды импульса перенапряжения, то сопротивление варистора резко возрастает, и величина сопровождающего тока ограничивается до величины, при которой дуга, разбитая в искровых промежутках на большое число отдельных дужек небольшой длины, гасится при первом же переходе сопровождающего тока через нуль.

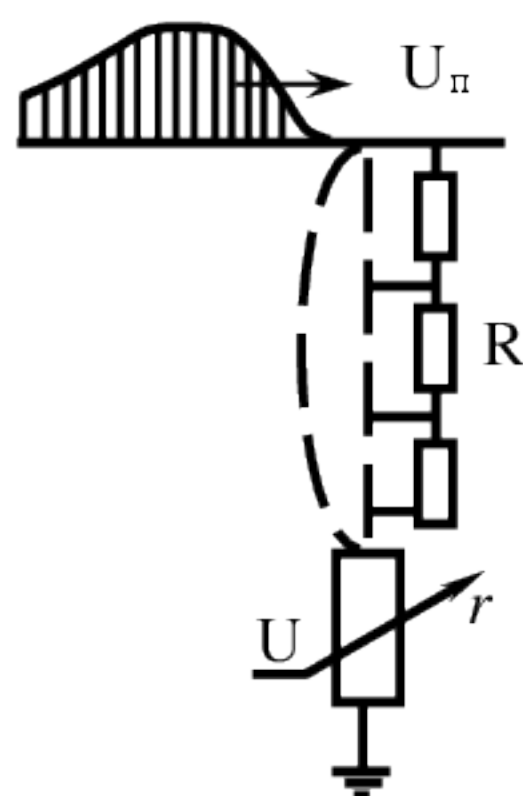


Рисунок 5.4 – Устройство и схема включения вентильного разрядника (пунктиром показан вариант ОПН).

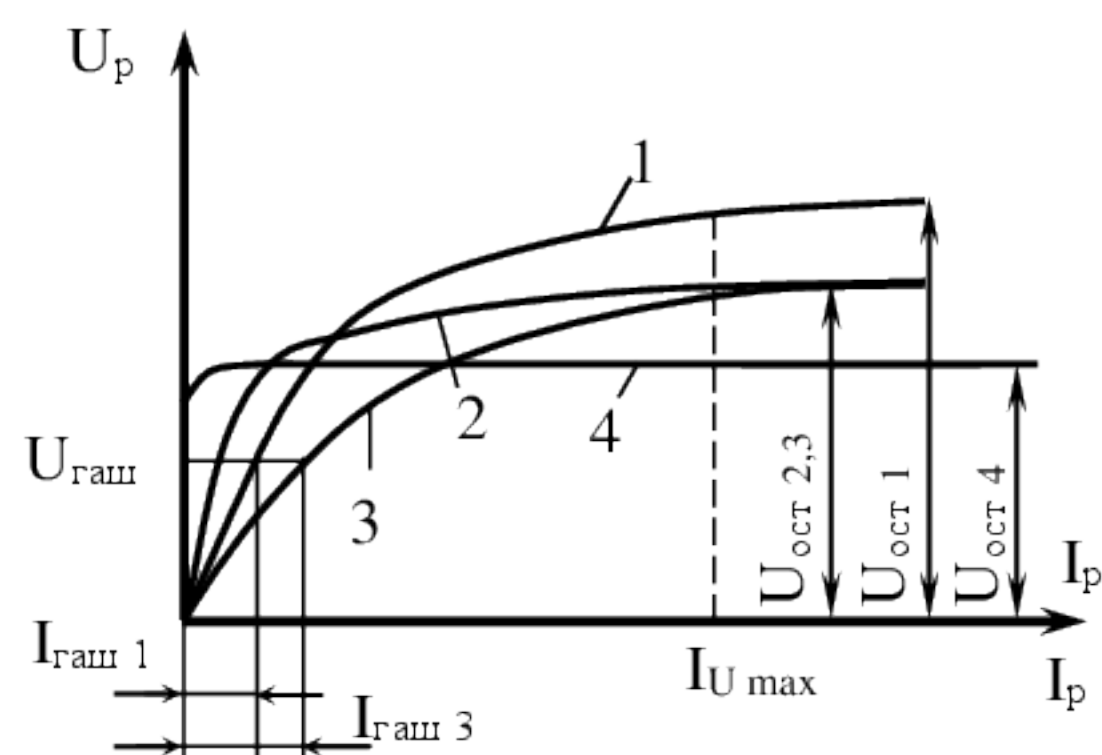


Рисунок 5.5 – Вольтамперная характеристика разрядника.

Наибольшее действующее значение напряжения гашения дуги $U_{гаш}$, при котором надежно обрывается проходящий через разрядник ток, называемый током гашения $I_{гаш}$, должно быть выше максимально возможного напряжения на разряднике в момент гашения дуги, иначе разрядник может не погасить дугу сопровождающего тока при первом прохождении его через нуль и выйдет из строя.

$$U_{гаш} = K_z U_{ном},$$

где $U_{ном}$ - номинальное линейное напряжение;

K_z - коэффициент, зависящий от способа заземления нейтрали;

$K_z = 0,8$ или $1,1$ для установки с заземленной и изолированной нейтралью соответственно.

Важной характеристикой вентильных разрядников является коэффициент защиты

$$K_{заш} = \frac{U_{ост}}{U_{гаш}}.$$

Так как $U_{гаш}$ зависит от $U_{ном}$ установки, то $K_{заш}$ определяет значение $U_{ост}$ разрядника, т.е. требуемый уровень изоляции. Снижение уровня изоляции при сохранении надежности защиты ее с помощью РВ может быть достигнуто путем применения разрядников или ОПН с более пологой вольтамперной характеристикой (рис. 5.5, кривые 2,4) или путем увеличения тока гашения за счет улучшения дутогасящих свойств искровых промежутков (кривая 3).

Искровые промежутки вентильных разрядников делаются многократными, т.е. состоящими из большего числа последовательно соединенных единичных промежутков. Про-

стейший **ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ** (рис. 5.6) состоит из двух латунных электродов 1, разде-

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

ленных изолирующей шайбой 2. Электрическое поле между электродами близко к однородному, поэтому промежутки пробиваются при коэффициенте импульса, близком к единице. Количество единичных промежутков в разряднике устанавливают из расчета примерно 1 промежуток на 1-2 кВ фазового номинального напряжения разрядника.

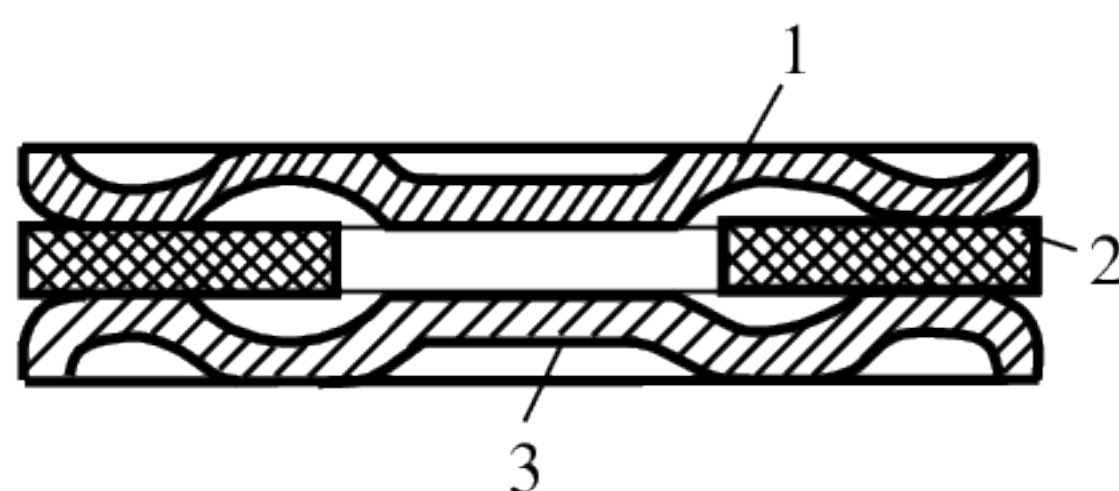


Рисунок 5.6 – Единичный искровой промежуток с неподвижной дугой

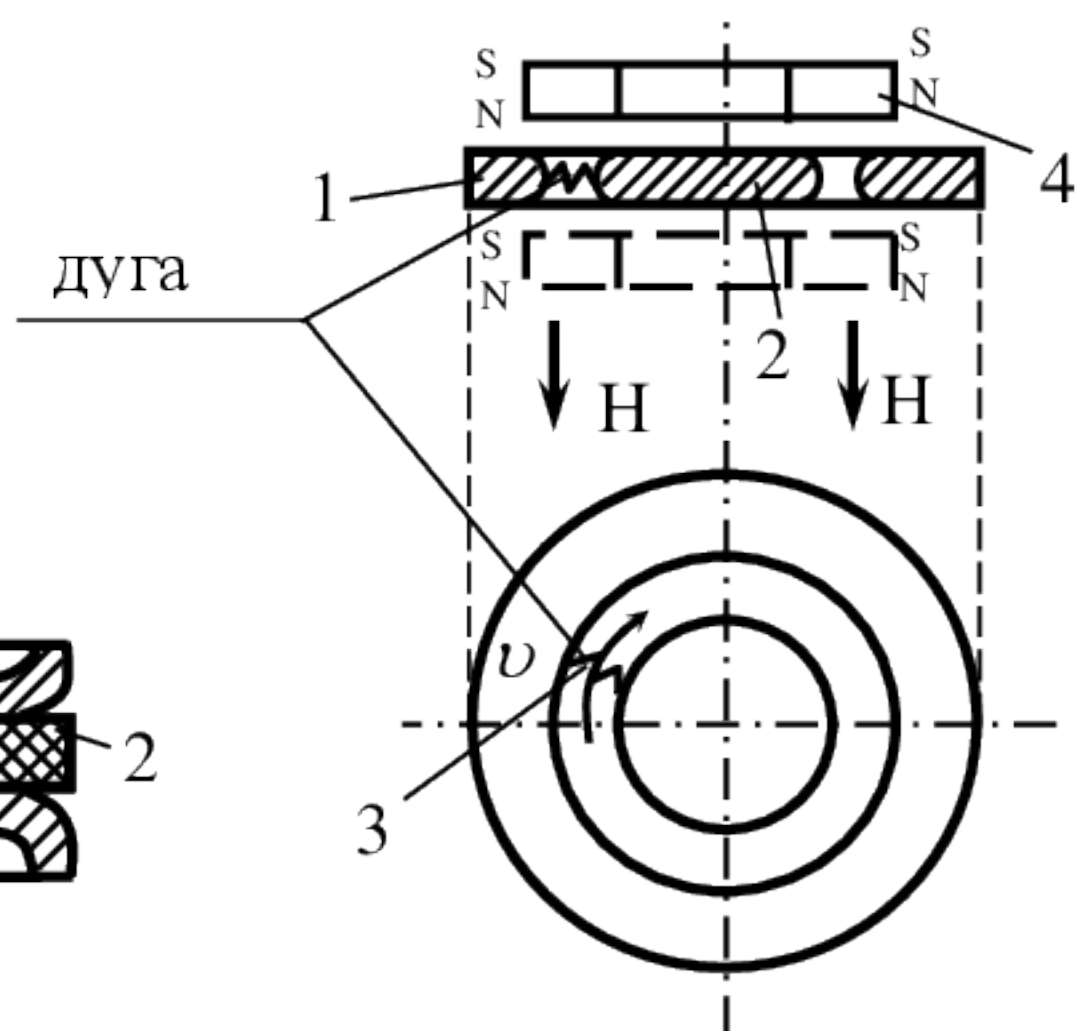


Рисунок 5.7 – Единичный искровой промежуток с вращающейся дугой

Таким образом, дуга сопровождающего тока оказывается разбитой на ряд дуг малой длины, что обеспечивает при токах $I_{собр}$ до 100 А надежное гашение дуги. Применяются такие промежутки в разрядниках РВП и РВС. При сопровождающих токах свыше 100 А применяются промежутки с подвижной дугой.

Такой промежуток (рис. 5.7) представляет собой зазор между кольцом 1 и диском 2. Дуга 3, горящая между этими электродами, в результате взаимодействия с магнитным полем, создаваемым постоянным магнитом 4, перемещается с большой скоростью по кольцевому зазору, что обеспечивает ее гашение. Указанные промежутки надежно гасят дугу при $I_{собр}$ до 250...300 А.

Принцип действия искровых промежутков с растягивающейся дугой показан на рис. 5.8. Два электрода 1 располагаются между стенками дугогасительной камеры 2 в магнитном поле Н. в таком поле на дугу 4 сопровождающего тока действует сила F, в результате чего дуга перемещается и растягивается между перегородками 3 камеры 2, стремясь занять конечное положение 4, охлаждается и гаснет. Стенки камеры 2 изготавливаются из дугогасительной керамики. Промежутки с растягивающейся дугой применяются в разрядниках РВТ и РВРД.

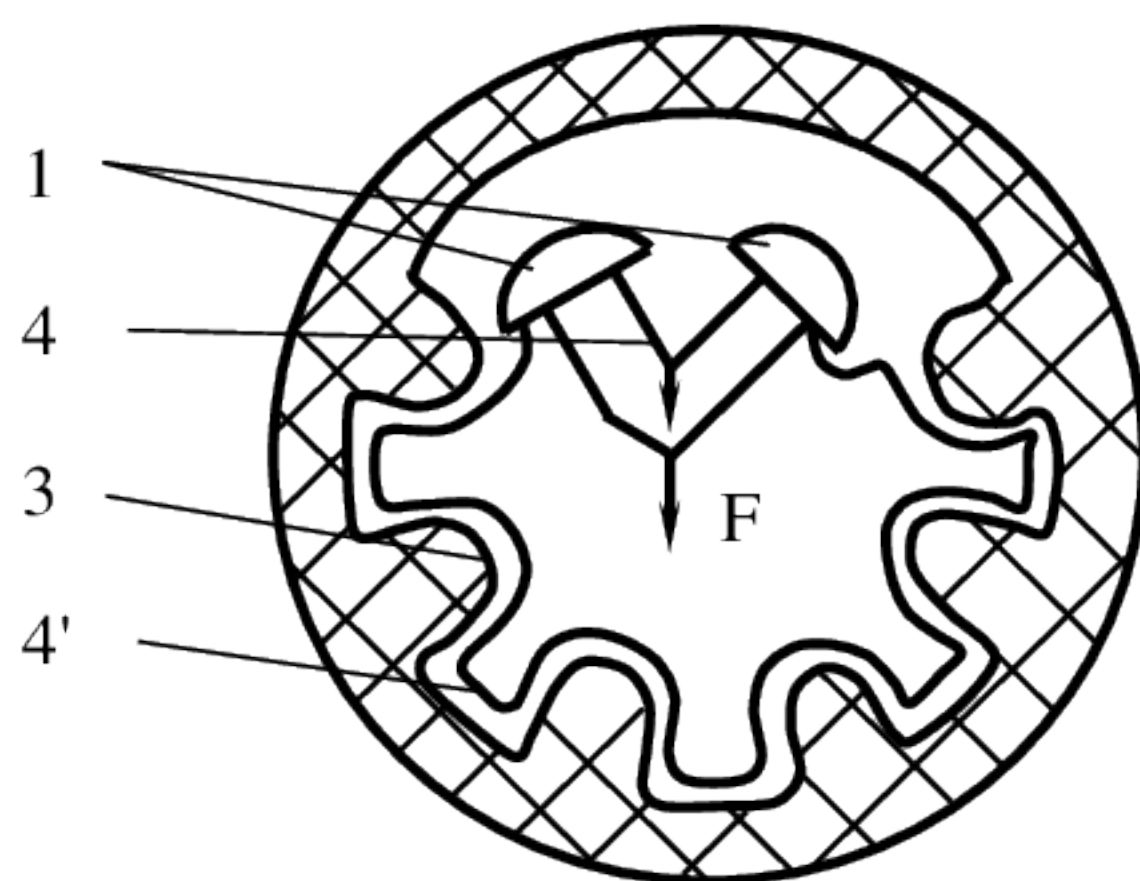


Рисунок 5.8 – Искровой промежуток с растягивающейся дугой

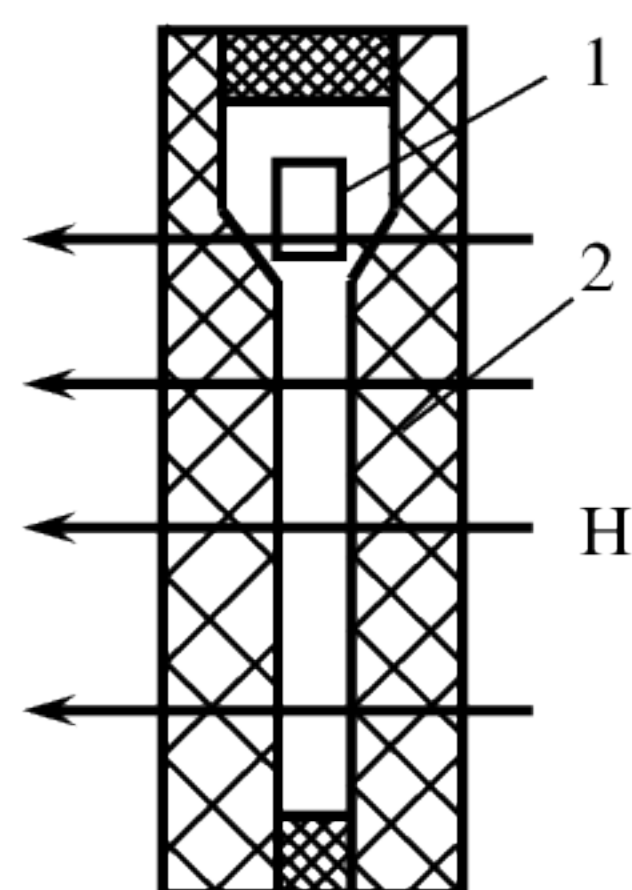


Рисунок 5.9 – Варисторы вентильных разрядников

Для увеличения пробивного напряжения разрядников при промышленной частоте и облегчения гашения дуги сопровождающего тока распределения напряжения по искровым промежуткам должно быть равномерным. Для этого искровые промежутки шунтируют резисторами R (рис. 5.4), сопротивление которых выбирают так, чтобы через них протекал ток, превышающий в несколько раз емкостный ток искровых промежутков.

Рабочие сопротивления (варисторы) r разрядников РВС, РВП изготавливаются из порошка электротехнического карборунда SiC . На поверхности зерен карборунда имеется тонкий запорный слой из окиси кремния SiO_2 .

Удельное сопротивление зерен карборунда невелико – порядка 10^{-2} Ом м, а сопротивление запорного слоя нелинейно зависит от напряженности электрического поля. При малых напряженностях (небольших напряжениях на варисторе) удельное сопротивление запорного слоя составляет $10^4 \dots 10^6$ Ом·м, все приложенное напряжение падает при этом на запорный слой, который и определяет сопротивление варистора.

При повышении напряженности поля сопротивление запорного слоя резко падает, и величина сопротивления варистора начинает определяться сопротивлением собственно карборунда.

Нелинейное сопротивление вентильных разрядников выполняется в виде дисков, состоящих из карборундового порошка и связующего материала. В настоящее время применяются диски из вилита и тервита. Для изготовления вилитовых дисков в качестве связующего применяется жидкое стекло. Это позволяет спекать диски при сравнительно низкой температуре (около 300 °С). Тервитовые диски при изготовлении обжигаются, при темпера-

туре свинца. При этом часть запорных пленок выгорает, что повышает пропускную способность материала, но уменьшает степень нелинейности.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Вентильные разрядники по ГОСТ 16537-70, который устанавливает требования к электрическим характеристикам вентильных разрядников, разделены на четыре группы. К 1 группе отнесены разрядники с наилучшими защитными свойствами, т.е. имеющие наименьшее значение остающегося напряжения. К этой группе относятся разрядники серий РВТ и РВРД. Затем следуют разрядники 2 группы – серии РВМ, разрядники 3 группы – серии РВС и 4 – серии РВП.

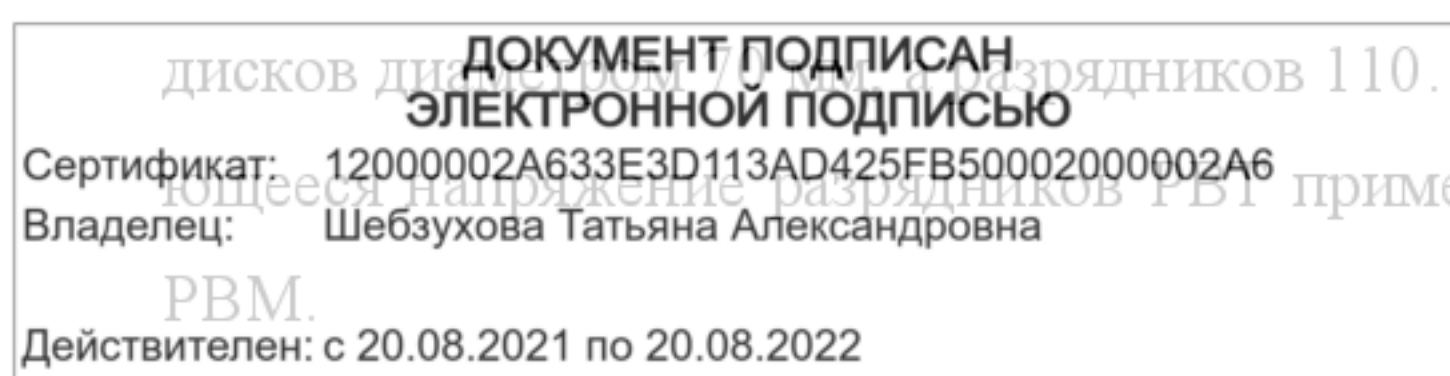
Облегченные разрядники серии РВП применяются для защиты изоляции подстанций напряжением 3...10 кВ. они имеют варисторы из дисков диаметром 55 мм, и импульсный ток для них не должен превышать 5 кА.

Разрядники унифицированной серии РВС служат для защиты электрооборудования подстанций и выпускаются в виде элементов на напряжение 15,20,33,35 кВ, причем элемент на 33 кВ предназначен исключительно для комплектования разрядников на более высокие напряжения (110...220 кВ). Пропускная способность разрядников 10 кА (диаметр дисков 100 мм).

Вентильные разрядники с магнитным гашением маркируются на напряжение 3...35 кВ как РВМ, на напряжение 110 кВ и выше, как РВМГ (грозозащитные). Разрядники РВМ применяются, в основном, для защиты изоляции вращающихся машин. На напряжение 3...20 кВ разрядники выпускаются в виде отдельных элементов, на напряжение 35 кВ и выше комплектуются из нескольких элементов. В разрядниках этих серий применены искровые промежутки с магнитным гашением. Блоки единичных искровых промежутков шунтируются нелинейным резистором полукольцевой формы. Применение вилитовых дисков диаметром 150 мм позволило вдвое увеличить пропускную способность разрядников РВМ и РВМГ по сравнению с разрядниками типа РВС.

В новой серии магнитно-вентильных разрядников РВТ (разрядник вентильный токоограничивающий) применены токоограничивающие искровые промежутки с растягивающейся дугой (рис.5.8). Магнитное поле создается катушками, включенными последовательно с искровыми промежутками. За время протекания импульсного тока дуга существенно растянуться не успевает, и сопротивление ее не велико. При протекании сопровождающего тока промышленной частоты дуга вводится в узкую щель разрядника, растягивается, ее сопротивление возрастает, и величина сопровождающего тока ограничивается уже не только сопротивлением рабочего варистора, но и сопротивлением дуги.

Варисторы разрядников РВТ на напряжение 3...10 кВ комплектуется из тервитовых



дисков диаметром 70 мм. Разрядники 110...500 кВ – из дисков диаметром 100 мм. Оста-
ющееся напряжение разрядников РВТ примерно на 20 % ниже, чем у разрядников серии

ОПН выполняется в виде системы керамических резисторов на основе окиси цинка (ZnO) с высокой степенью нелинейности. Металлизированные с торцов диски (например, 4 параллельных колонки из дисков диаметром 28 мм и высотой 8 мм – ОПН 110) размещаются в геометрическом изолирующем корпусе. ОПН обеспечивают ограничение сопровождающего тока до $10^{-4} \dots 10^{-5}$ А при рабочем напряжении сети, обладая достаточно высокой пропускной способностью при перенапряжениях. Уровень ограничения грозовых перенапряжений с помощью ОПН составляет $(2,0 \dots 2,2) U_{\phi}$, коммутационных – $(1,68 \dots 1,8) U_{\phi}$.

Расчетными величинами при выборе и установке ОПН являются длительность воздействия перенапряжения. В зависимости от длительности воздействия определяется параметр $T_c = \frac{U_n(t)}{U_c}$, где U_c – напряжение на ОПН, которое он должен выдерживать как угодно долго; $U_n(t)$ – перенапряжение заданной длительности. Типичная характеристика $T_c = f[U_n(t)]$ приведена на рис. 5.10.

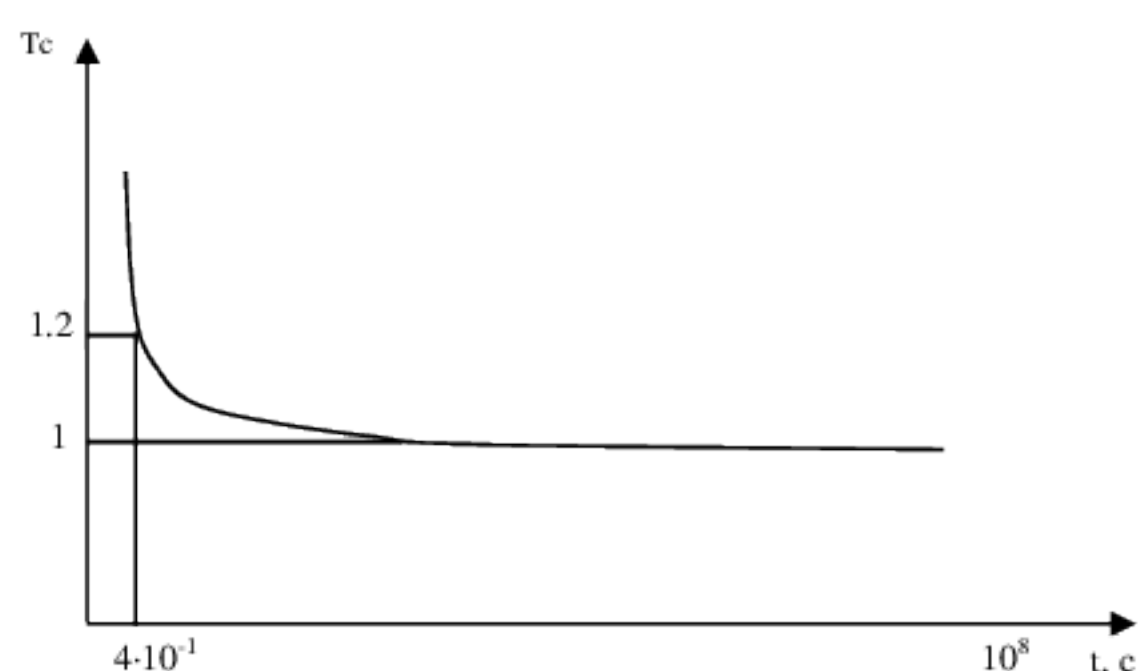
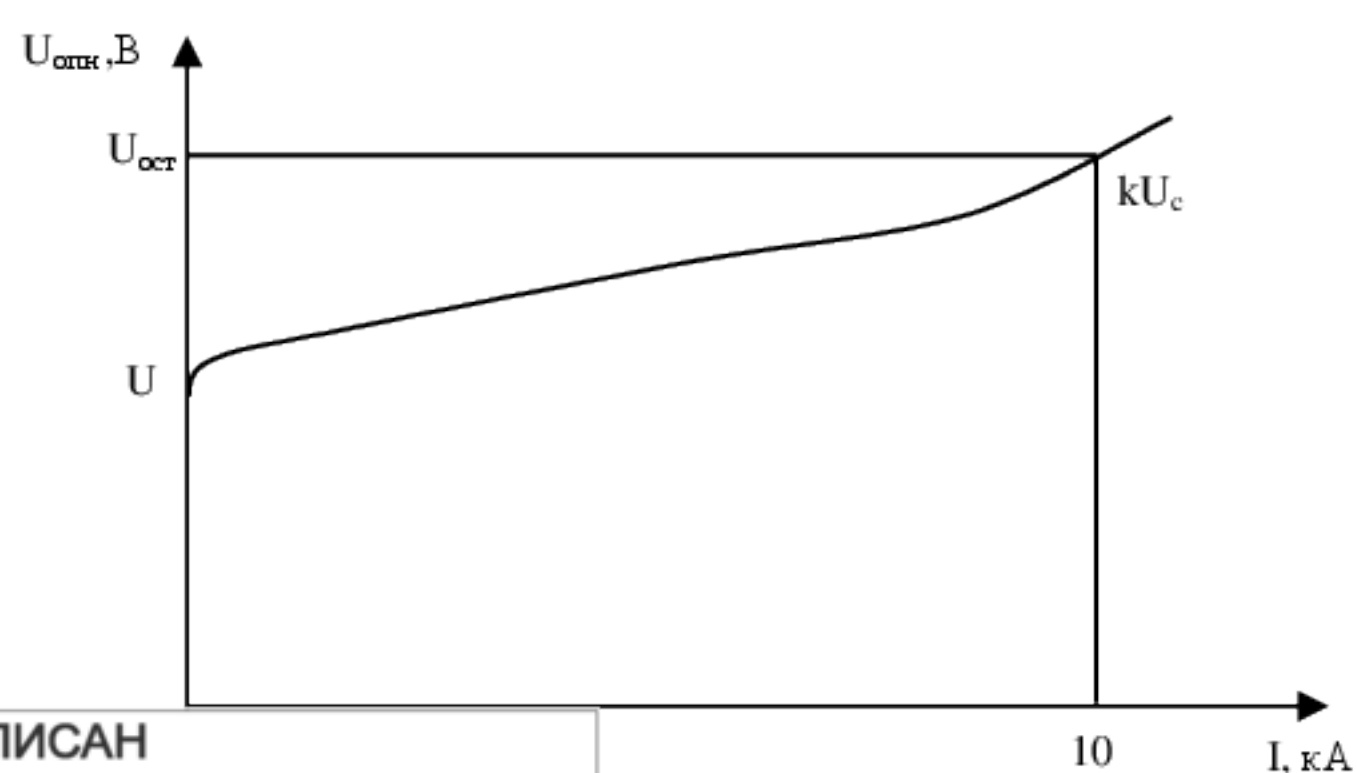


Рисунок 5.10 – Зависимость $T_c = \frac{U_n(t)}{U_c}$

Эта характеристика необходима для корректного выбора уставок релейной защиты и других систем автоматики. Так же расчетной величиной при выборе ОПН является количество импульсов заданной формы и максимальное значение импульсного тока. Соответствующее нормированному остающемуся напряжению $U_{ост}$. Типичная характеристика $U_{опн} = f(I)$ приведена на рис. 5.11.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 5.11 – Соотношение $U_{ост}$ к U_c в зависимости от импульсного тока

В зависимости от типа и назначения ОПН $K=2\div 4$. При $U_{онн} \leq U_c$, ток протекающий через нелинейный резистор, составляет единицы mA и главной проблемой при эксплуатации ОПН является недопущение возрастания этого тока (разгерметизация и увлажнение конструкции и т.д.).

Методика расчета и выбора ОПН продолжает совершенствоваться, и со временем ОПН должны заменить все виды защитных разрядников.

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Эскиз вентильного разрядника (РВС-6 или РВС-15) с указанием основных размеров.
2. Эскиз трубчатых разрядников (РТВ, РТФ). На эскизах должно быть показано внутреннее устройство разрядников.
3. Эскиз и описание искровых промежутков разрядников типа РВС и РВМ.
4. Описание варисторов вентильных разрядников.
5. Эскиз и описание ОПН (по указанию преподавателя).
6. Построить вольтамперную характеристику разрядника РВС-6, если известно, что $\alpha=0,22$ и $U_p=30000V$ при токе $I_p=5000A$, считая, что напряжение на разряднике изменяется по закону $U_p = CI_p^\alpha$.
7. Выполнить расчет $U_p = f(I_p)$ и $U_{онн} = f(I_{онн})$ для вентильных разрядников разных типов и ОПН с использованием программы ЭВМ (по указанию преподавателя).
8. Выполнить расчет перенапряжения на подстанции по программе (выполняется расчет по отдельной инструкции).

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

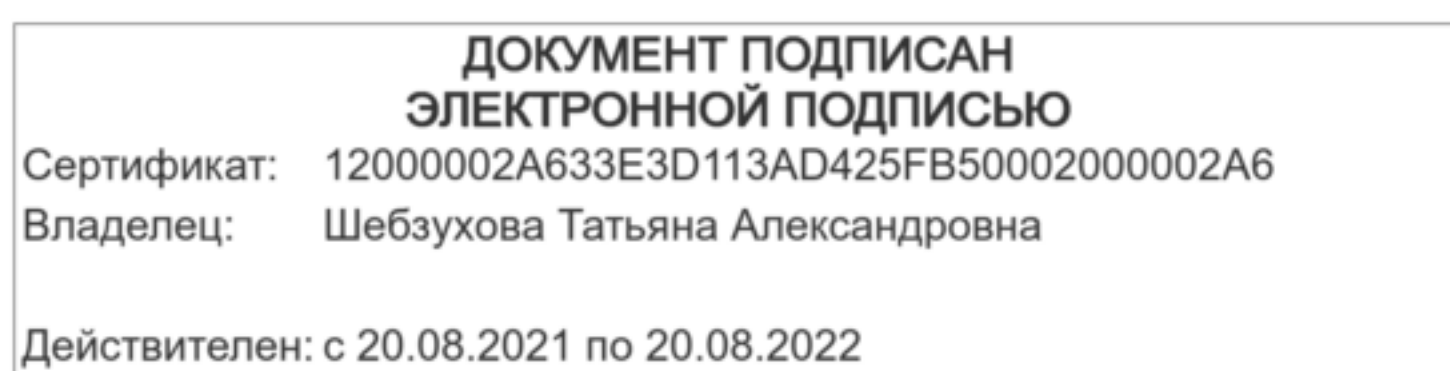
1. Название работы;

2. ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
4. Описание используемого оборудования и материалов;	
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Назначение трубчатых и вентильных разрядников.
2. Принцип работы трубчатых и вентильных разрядников.
3. Применение и особенность работы отдельных типов вентильных разрядников (РВП, РВС, РВМГ, РВТ, РВРД, ОПН).
4. Конструкции вентильных и трубчатых разрядников и назначение их отдельных частей.
5. Методика расчета и выбора ОПН.
6. Примеры расчета установки трубчатых, вентильных разрядников и ОПН.



Лабораторная работа №6. Исследование модели каскадного выпрямителя высокого напряжения

Цель работы: Изучение устройства и принципа действия каскадного выпрямителя высокого напряжения. Определение изменений потенциалов различных точек схемы трехкаскадного выпрямителя в установившемся режиме при холостом ходе. Снятие зависимостей выходного напряжения и пульсаций напряжения от тока нагрузки и числа ступеней выпрямителя.

Основы теории:

Высокое напряжение постоянного тока для испытания изоляционных конструкций получают обычно с помощью высоковольтных выпрямителей, в которых в качестве вентилей используются полупроводниковые выпрямительные диоды.

При относительно небольших напряжениях (до 100-200 кВ) применяют однополупериодные, двухполупериодные или мостовые схемы выпрямления. Эти схемы питаются от сети переменного тока через повышающий трансформатор. Вторичное амплитудное напряжение трансформатора должно быть приблизительно равно требуемому напряжению постоянного тока.

Для получения более высоких напряжений могут быть использованы схемы выпрямления с умножением напряжения – схемы удвоения напряжения или многоступенчатые схемы. Они позволяют получить более высокое постоянное напряжение, чем вторичное напряжение питающего трансформатора при сравнительно небольшом обратном напряжении на вентильях.

Рассмотрим работу схемы, приведенной на рис. 6.1. Для упрощения анализа предположим, что вентили и конденсаторы идеальные.

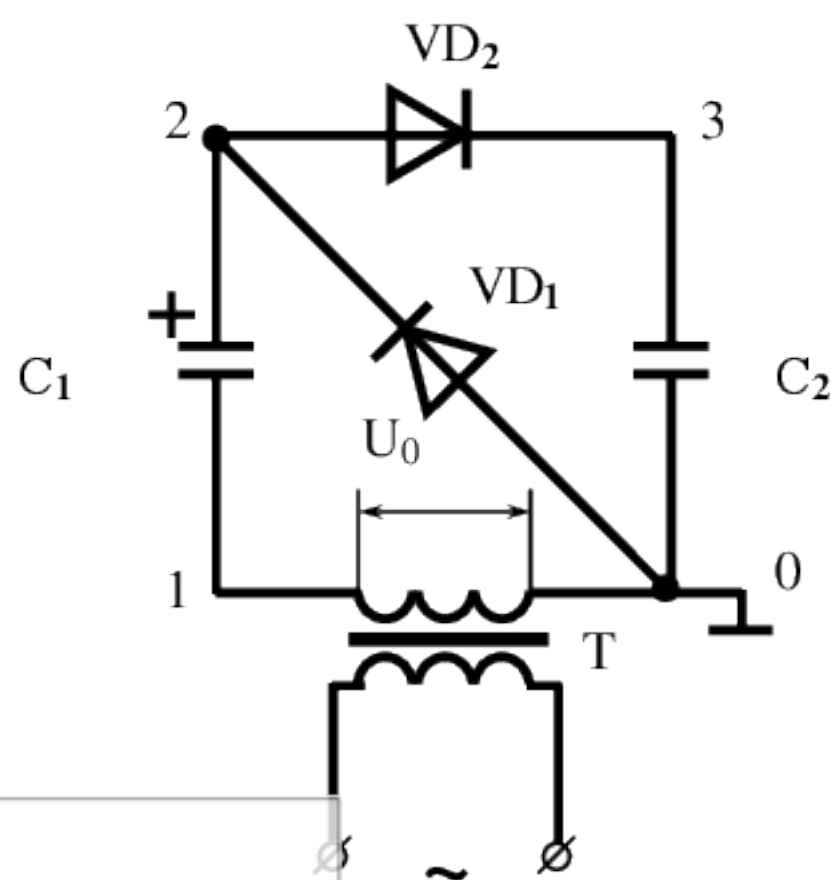


Рис. 6.1 – Схема одной ступени каскадного выпрямителя

Пусть на схему подано напряжение $U_2 = U_{2m} \cdot \sin(\omega t + \pi)$ (рис. 6.2). В течение первой четверти периода ($0 - t_1$) клапан VD_2 закрыт, а клапан VD_1 открыт и конденсатор C_1 заряжается по контуру 0-2-1. В момент t_1 , напряжение на конденсаторе $U_{C1} = U_{2m}$ и заряд $Q_1 = Q_m = C_1 \cdot U_{2m}$. Затем, U_2 пройдя через отрицательный максимум, начинает увеличиваться. Потенциал φ_2 точки 2 становится положительным. Клапан VD_1 закрывается, а клапан VD_2 открывается. В течение времени $t_1 - t_2$ под действием напряжения источника питания и напряжения на конденсаторе C_1 , который включен согласно, в цепи 1-2-3-0 протекает ток. Конденсатор C_1 разряжается, а конденсатор C_2 заряжается. Напряжение на C_2 достигает максимальной величины в момент t_2 .

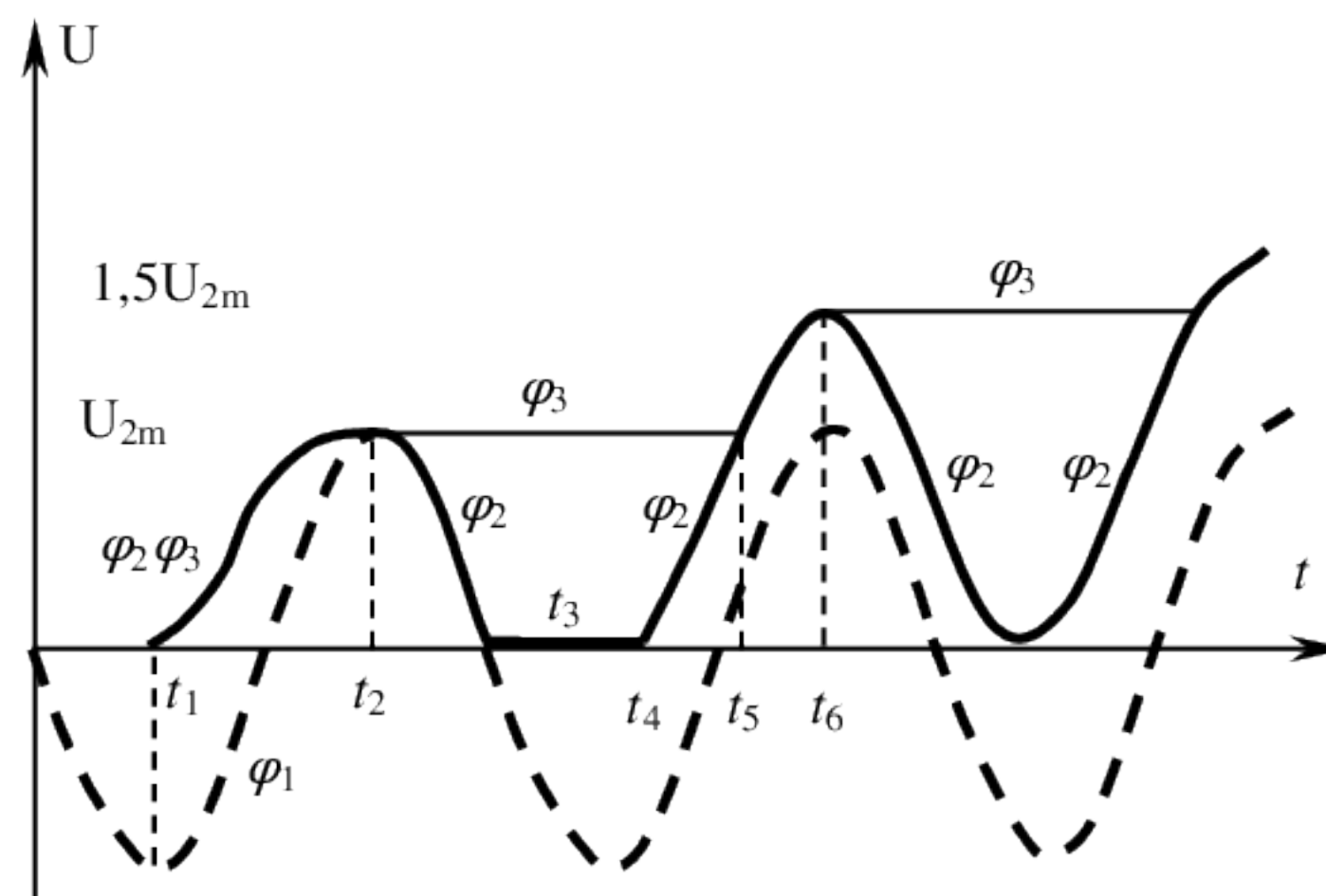


Рисунок 6.2 – Изменение потенциалов точек схемы (рис. 6.1) при зарядке выпрямителя

Для определения U_{C1} и U_{C2} рассмотрим контур 1-2-3-0. Клапан VD_2 включен в прямом направлении, и его сопротивление равно нулю. Поэтому $U_2 + U_{C1} = U_{C2}$. В момент времени t_2 : $U_2 = U_{2m}$, а напряжение на конденсаторе C_2 $U_{C2} = \frac{Q}{C_2}$, где Q - заряд, переместившийся по контуру за время $t_1 - t_2$. Заряд конденсатора C_1 уменьшится и станет

равным $Q_1 - Q$, поэтому $U_{C1} = \frac{Q_1 - Q}{C_1}$. Учитывая это, получим:

$$U_{2m} + \frac{Q_1 - Q}{C_1} = \frac{Q}{C_2}, \text{ или}$$

$$U_{2m} + \frac{Q}{C_2} = Q \frac{C_1 + C_2}{C_1 \cdot C_2}.$$

Так как

$$Q_1 / C_1 = U_{2m}, \text{ то}$$

$$Q = 2U_{2m} \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2},$$

Откуда:

$$U_{C1} = 2U_{2m} \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2};$$

$$U_{C2} = 2U_{2m} \frac{C_1}{C_1 + C_2}.$$

При $C_1 = C_2$ в момент t_2 конденсатор C_1 полностью разряжен, а C_2 заряжен до U_{2m} .

После t_2 питающее напряжение начинает уменьшаться, φ_2 становится ниже φ_3 . Вентиль VD_2 закрывается. Вентиль VD_1 откроется только после t_3 , когда напряжение питания становится отрицательным и φ_1 - ниже нуля. Конденсатор C_1 заряжается по контуру 0-2-1 и к моменту t_4 $U_{C1} = U_{2m}$.

После t_4 напряжение питания увеличивается, φ_2 становится положительным, но вентиль VD_2 открывается только в момент t_5 , когда $\varphi_2 = \varphi_3 = U_{2m}$. Конденсатор C_2 подзаряжается по контуру 1-2-3-0. Пользуясь уже рассмотренным методом, можно легко определить, что в момент t_6 : $U_{C1} = 0,5U_{2m}$, а $U_{C2} = 1,5 \cdot U_{2m}$.

После t_6 вентиль VD_2 закрывается, на конденсаторе C_2 остается напряжение $1,5 U_{2m}$. Когда φ_2 станет равным нулю, откроется вентиль VD_2 , и конденсатор C_1 подзарядится до U_{2m} . После того, как питающее напряжение пройдет через отрицательный максимум, φ_2 становится положительным и VD_1 закроется.

Затем откроется вентиль VD_2 , и конденсатор C_2 подзарядится за счет C_1 и питающего напряжения до $1,75 U_{2m}$. Нетрудно видеть, что в установившемся режиме напряжение на C_2 достигает $2 U_{2m}$.

Если между точками 3 и 0 включена нагрузка R_n , то в течение промежутка времени,

когда VD_2 открыт, конденсатор C_2 будет частично разряжаться через R_n . Выходное напря-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Пульсации напряжения δU зависят от величины

$C2$, R_n и времени, в течении которого закрыт клапан VD_2 . Из-за постоянного разряда амплитуда напряжения на $C2$ будет отличаться от $2 U_{2m}$ на некоторую величину ΔU , которую называют падением напряжения. При равенстве $C1$ и $C2$ $\Delta U = \delta U$.

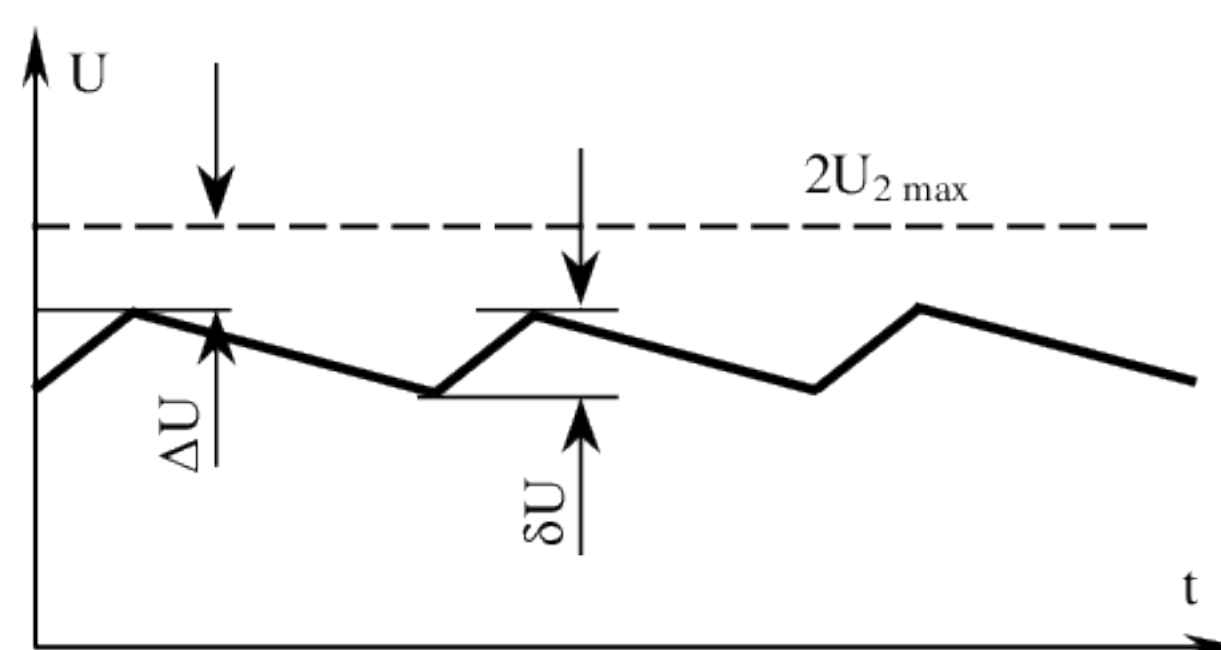


Рисунок 6.3 – Падение напряжение и напряжение пульсаций для схемы

Схема трехступенчатого каскадного выпрямителя приведена на рис. 6.4. Процесс зарядки конденсатора во времени протекает так же, как и в одноступенчатой схеме.

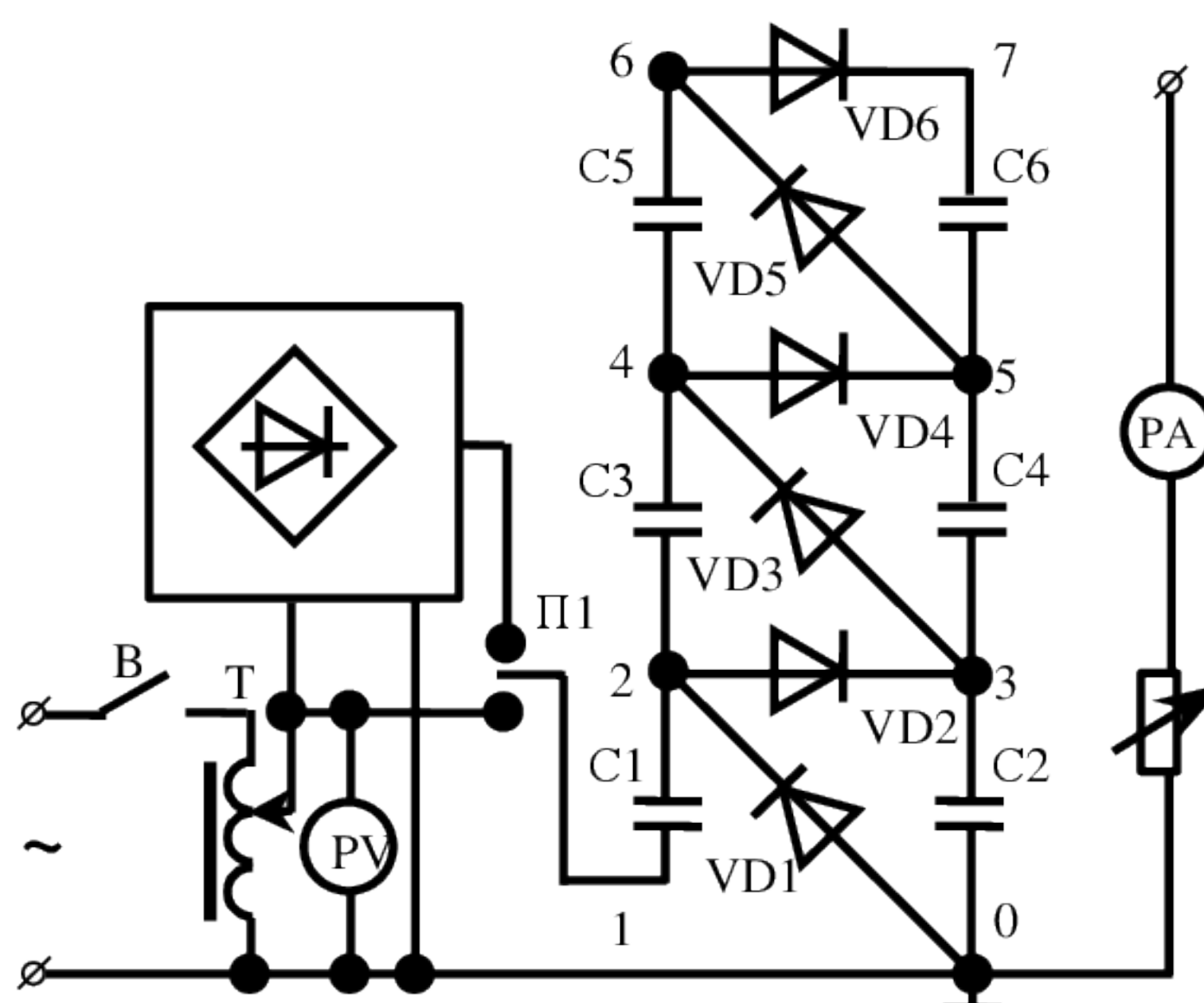


Рисунок 6.4 – Схема трехступенчатого каскадного выпрямителя

В установившемся режиме конденсатор $C1$ заряжен до напряжения U_{2m} , а $C2$ – до $2 U_{2m}$. Потенциал точки 2 изменяется от 0 до $2 U_{2m}$. Следовательно, конденсатор $C3$ может зарядиться до $2 U_{2m}$. Потенциал точки 4 тогда будет меняться от $2 U_{2m}$ до $4 U_{2m}$, и через клапан VD_5 конденсатор $C5$ зарядится до $2 U_{2m}$. Тогда потенциал точки 6 будет

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

через VD_6 конденсатор $C6$ зарядится до $2 U_{2m}$. Выходное

напряжение схемы складывается из напряжений на конденсаторах C2, C4, C6 и составит $6U_{2m}$. В общем случае при n ступенях

$$U_{\text{вых}} = 2U_{2m} \cdot n = 2\sqrt{2} \cdot n \cdot U_2$$

Поскольку заряд, поступающий на верхние ступени, отбирается от предыдущих, то многоступенчатые схемы оказываются очень чувствительными к нагрузке. Напряжение пульсации δU и падение напряжения ΔU быстро возрастают с увеличением числа ступеней. Для выпрямителя с n ступенями эти величины могут быть рассчитаны по следующим приближенным соотношениям:

$$\delta U = \frac{I_H}{f \cdot C} \cdot \frac{(n+1)n}{2};$$

$$\Delta U = \frac{I_H}{f \cdot C} \left(\frac{2}{3}n^3 + \frac{1}{2}n^2 - \frac{1}{6}n \right),$$

где I_H - среднее значение тока нагрузки;

n - число ступеней генератора;

f_c - частота питающего напряжения;

C - емкость конденсатора схемы (при $C_1=C_2=\dots C_n=C$).

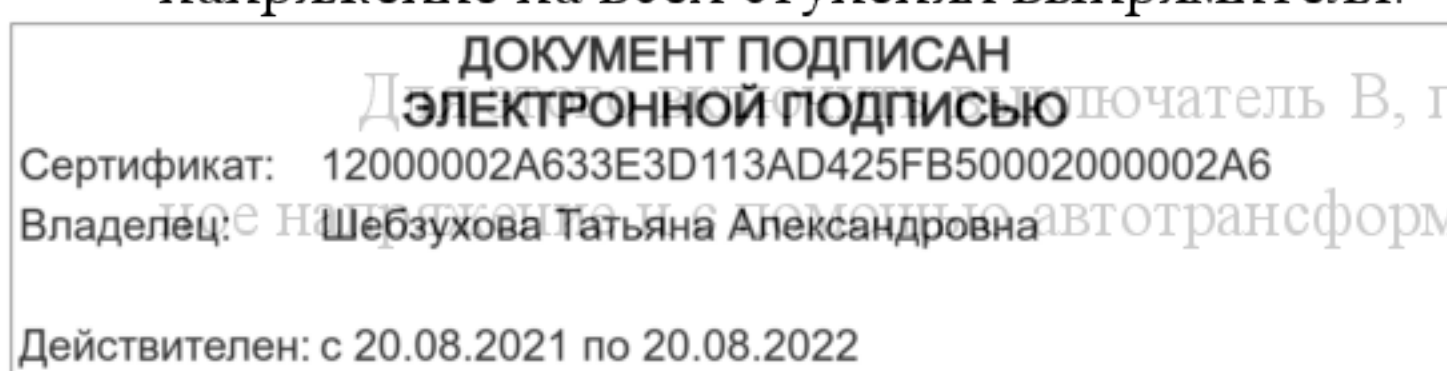
Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

В настоящей работе необходимо:

1. Ознакомиться со схемой и принципом работы каскадного выпрямителя, подготовить таблицу для записи результатов измерений. Ознакомиться с расположением ручек управления осциллографа.
2. С разрешения преподавателя подать на установку питание, включить освещение электростатического вольтметра и проверить положение нуля, включить электронный осциллограф и отрегулировать фокусировку и яркость луча.
3. Не включая нагрузки, перерисовать с экрана осциллографа на один общий график напряжение на всех ступенях выпрямителя.



Далее преподаватель В, переключателем П1 подать на схему переменное напряжение и с помощью автотрансформатора установить входное напряжение схемы

5В. Вход постоянного тока осциллографа включить между точками 0-1. Усиление осциллографа подобрать таким, чтобы размах синусоиды на экране составлял 1 см. Перечертить форму напряжения на график. Затем, не меняя усиления и не смещая положения луча, включить осциллограф между точками 0-2, 0-3, 0-4, 0-5, 0-6, 0-7 и перечертить форму напряжений. Полученный график сравнить с рис. 6.5, объяснить.

4. Проградуировать по напряжению осциллограф по входу переменного тока. Для этого переключатель входа осциллографа со схемы выпрямителя подать переменное напряжение 5В и установить усиление таким, чтобы размах синусоиды на экране осциллографа составлял 4 см. Тогда чувствительность осциллографа по напряжению составит:

$$K_U = \frac{2\sqrt{2}U_{ex}}{4}$$

При дальнейших измерениях положения осциллографа не менять.

5. Снять зависимость выходного напряжения и напряжения пульсации от тока нагрузки для одной, двух и трех ступеней каскадного выпрямителя.

Для этого установить напряжение питания выпрямителя 17В. По электростатическому вольтметру определить выходное напряжение выпрямителя, изменяя то нагрузки от 0 до 400 мкА.

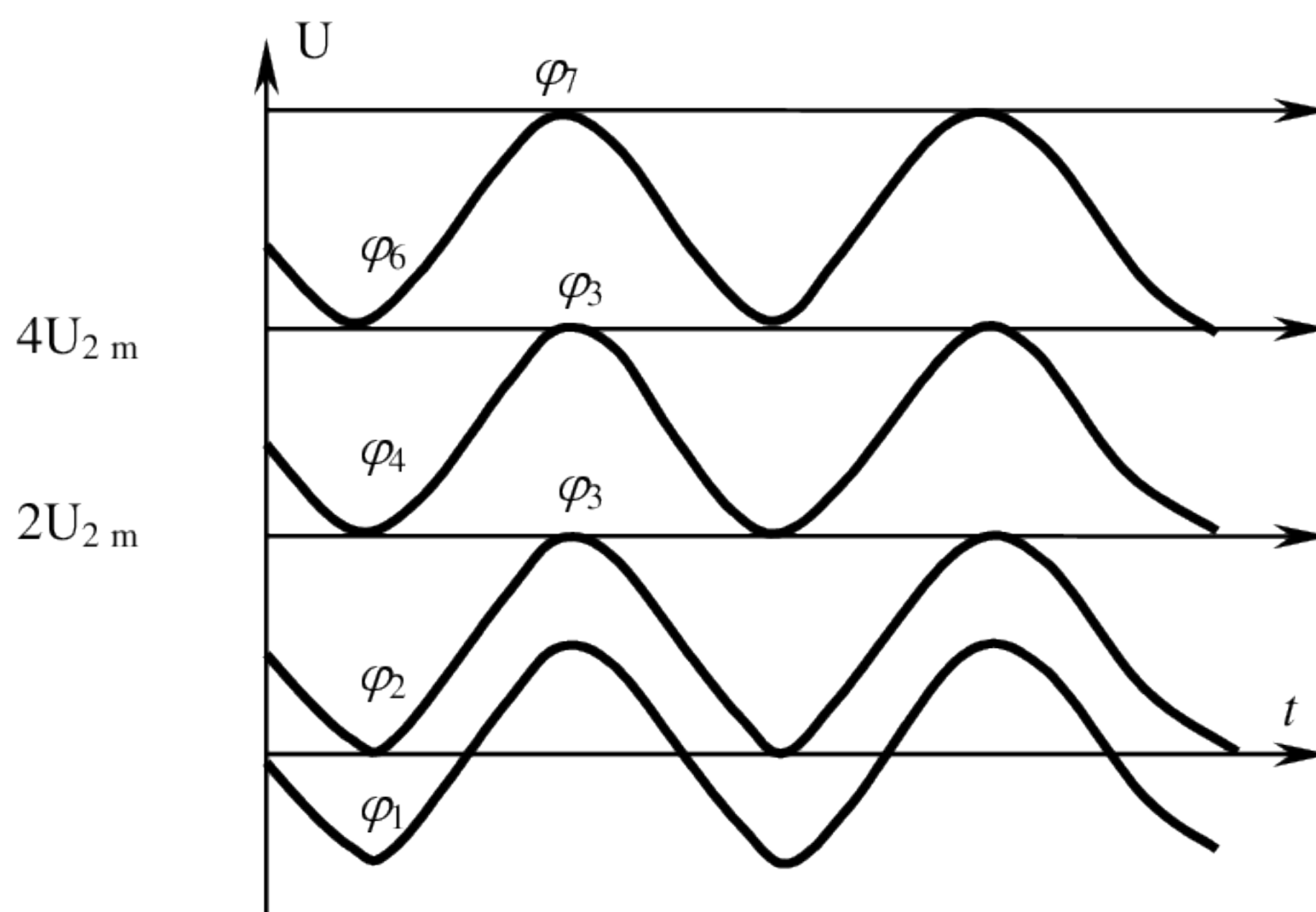


Рисунок 6.5 – Изменение потенциалов в различных точках схемы трехступенчатого выпрямителя в установившемся режиме

Таблица 6.1 – Выходное напряжение и напряжение пульсаций каскадного выпрямителя

№ п/п	Число ступеней выпрямителя	Ток нагрузки выпрямителя, мкА	0	100	200	300	400
1	1	U_m , В					
		δy , см					
		δU , В					
2	2	$U_{\text{вых}}$, В					
		δy , см					
		δU , В					
3	3	$U_{\text{вых}}$, В					
		δy , см					
		δU , В					

Здесь: $U_{\text{вых}}$ - выходное напряжение выпрямителя, определяемое по электростатическому вольтметру;

δy - напряжение пульсаций на экране осциллографа, см;

δU - напряжение пульсаций, В;

K_y - чувствительность осциллографа, определенная в 6.3.

При измерении выходного напряжения выпрямителя на холостом ходу отключить от схемы выпрямителя нагрузку и вход осциллографа.

6. По полученным данным построить для одной, двух, трех ступеней выпрямителя зависимости выходного напряжения и напряжения пульсации от тока нагрузки $U_{\text{вых}} = f(I_H)$ и $\delta U = f(I_H)$.

7. Рассчитать выходное напряжение и напряжение пульсации для одной, двух, трех ступеней выпрямителя и построить зависимости $U_{\text{вых}} = f(I_H)$ и $\delta U = f(I_H)$ - на предыдущем графике.

Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

2. Краткие теоретические сведения;

3. Описание используемого оборудования и материалов;

5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Принцип работы однофазного выпрямителя на емкостную нагрузку. Соотношение напряжений на элементах схемы.
2. Схема и принцип работы одной ступени каскадного выпрямителя в процессе зарядки.
3. Принцип умножения напряжения с помощью многоступенчатой схемы выпрямителя.
4. Достоинства и недостатки многоступенчатых каскадных выпрямителей.
5. Проанализировать работу одной ступени выпрямителя при питании прямоугольными импульсами чередующейся полярности.

Лабораторная работа №7. Генератор импульсных напряжений 750 кВ

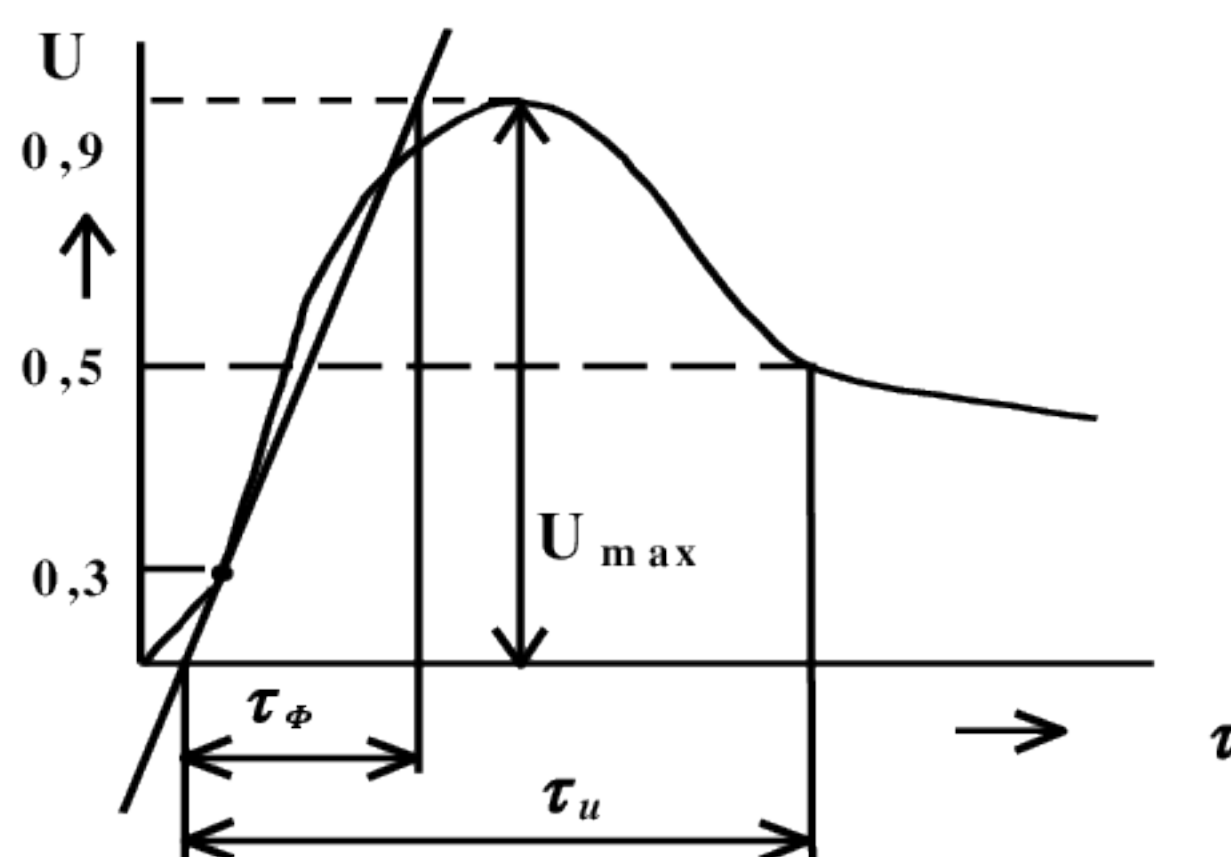
Цель работы: Ознакомиться со способами получения грозовых импульсов, устройством и работой ГИН 750 кВ; Изучить методы регулирования параметров грозового импульса и методы их измерения; Произвести измерение амплитуды грозового импульса с помощью измерительных шаров диаметром 50 см. Ознакомиться с методами регистрации формы грозового импульса с помощью электронного осциллографа.

Основы теории:

В процессе эксплуатации на электрическую изоляцию линий и аппаратов воздействуют грозовые и внутренние перенапряжения. Грозовые перенапряжения возникают при ударах молнии и имеют форму кратковременного апериодического импульса. Внутренние перенапряжения связаны прежде всего с различного рода коммутациями и переходными режимами. Форма внутренних перенапряжений зависит от их вида, но чаще всего – это затухающие колебания с некоторой максимальной амплитудой. При лабораторных исследованиях импульсных процессов используются генераторы грозовых и коммутационных импульсов и измерительные системы, позволяющие определить амплитуду и зарегистрировать форму однократного или многократного импульса напряжения.

Амплитуда может быть измерена с помощью шарового разрядника, а для регистрации формы импульса используются высоковольтные осциллографы с емкостными или смешанными делителями напряжения.

Импульсные установки должны обеспечить генерацию апериодических импульсов напряжения (тока). Основными параметрами импульса (рис. 7.1) являются: амплитуда U_{max} , длительность фронта импульса τ_ϕ , длительность импульса τ_u .



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

7.1 – Основные параметры импульса ГИН

Стандартные импульсы, имитирующие атмосферные перенапряжения, имеют $\tau_{\phi}=1,2$ мкс, $\tau_u=50$ мкс. Импульсы, имитирующие внутренние перенапряжения, имеют $\tau_{\phi}=250$ мкс, $\tau_u=2500$ мкс.

Схема ГИН, представленная на рис. 7.2, состоит из двух блоков – зарядного устройства 1 (ЗУ) и умножителя напряжения 2 (УН).

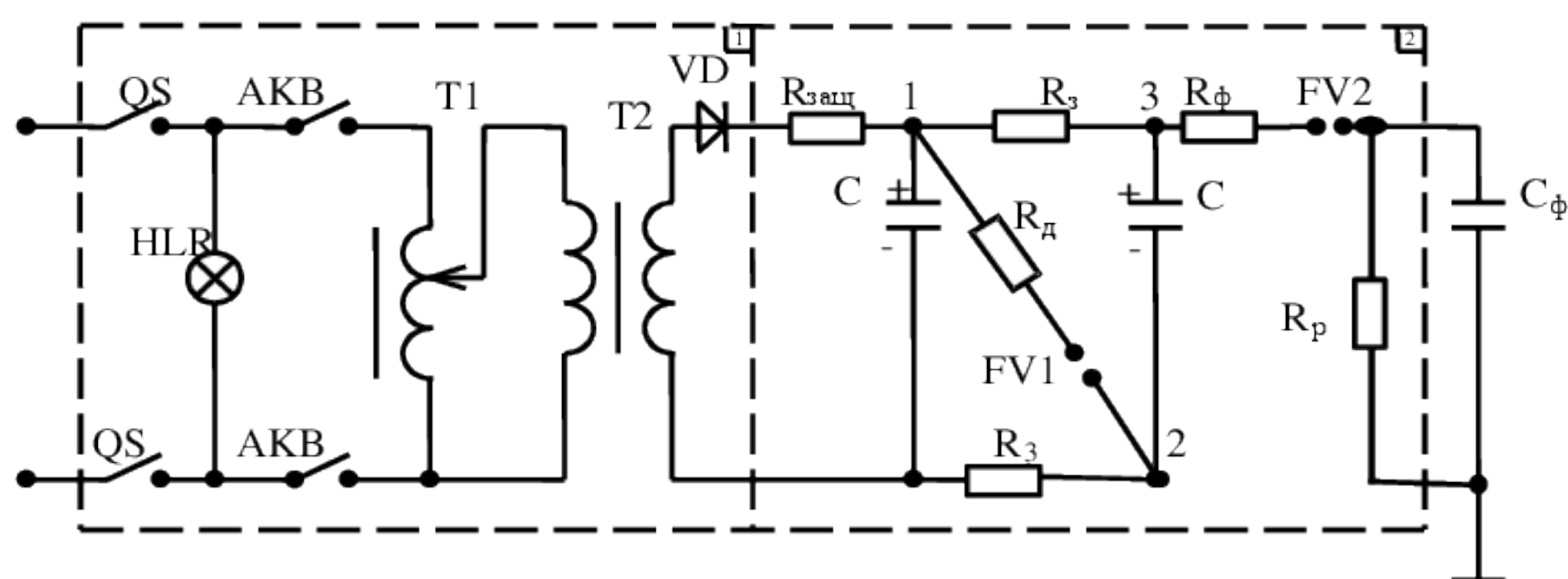


Рисунок 7.2 – Схема ГИН

Зарядное устройство 1 включает регулировочный автотрансформатор Т1, повышающий трансформатор Т2 и высоковольтный выпрямитель VD, то есть ЗУ представляет однополупериодный, высоковольтный, регулируемый выпрямитель. В качестве вентиль VD на напряжение 100 кВ используют выпрямительные столбики на полупроводниковых диодах.

Умножитель напряжения 2 включает конденсаторы С, резисторы $R_{заш}$, R_3 , R_d , R_{ϕ} и разрядные промежутки FV1, FV2. На рис. 7.2 приведена схема удвоения напряжения.

Принцип работы ГИНа заключается в следующем: на первой стадии, в режиме заряда конденсаторы С соединены параллельно и заряжаются от ЗУ через резисторы $R_{заш}$, R_3 с полярностью, указанной на схеме (рис. 7.2). Защитный резистор $R_{заш} = 3 \cdot 10^6$ Ом предназначен для ограничения тока заряда в момент включения, т.е. защищает вентиль VD и трансформатор Т2 от перегрузки.

Величина напряжения, до которого заряжаются конденсаторы С определяется электрической прочностью искрового промежутка FV1 но не должна превышать амплитуду выпрямленного напряжения U_{2m} .

Когда напряжение в точке 1 превысит электрическую прочность промежутка FV1, происходит пробой этого промежутка и конденсаторы С соединяются последовательно, - точка 2 будет соединена с точкой 1 через демпфирующий резистор R_d и сопротивление искрового промежутка FV1.

Благодаря тому, что сопротивление резистора R_3 велико ($R_3=5 \cdot 10^4$ Ом), а сопротивление резистора R_ϕ мало ($R_\phi=10-20$ Ом), конденсаторы не успевают разрядиться, потенциал точки 2 повышается до потенциала точки 1, а потенциал точки 3 увеличивается, примерно, в два раза.

При переключении конденсаторов C с параллельной схемы на последовательную происходит пробой разрядного промежутка $FV2$, так как его электрическая прочность ниже величины удвоенного напряжения умножителя, выходное напряжение умножителя будет приложено к объекту испытания C_ϕ и разрядному резистору R_p .

Скорость нарастания напряжения на объекте (длина фронта импульса) будет определяться постоянной времени заряда конденсатора C_ϕ , т.е.

$$\tau_\phi = (2 \div 3) \cdot (R_3 + R_\phi) \cdot C_\phi$$

Когда напряжение на объекте (C_ϕ) достигнет предельного значения, конденсаторы C и C_ϕ начнут разряжаться через главный разрядный резистор R_p (спад импульса). При этом длительность волны импульса приблизительно в данной схеме будет равна

$$\tau_u = 0,67 \left(\frac{C}{2} + C_\phi \right) \cdot (R_\phi + R_p)$$

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности для данной установки.
2. Ознакомиться со схемами ГИН-750, схемой зарядного устройства ЗУ-150 и схемой управления шарами.
3. Ознакомиться с перечисленными устройствами и установками в натуре, записать паспортные данные основного оборудования и определить полярность получаемого импульса.
4. Рассчитать основные параметры ГИН: емкость в ударе C_y , энергию в ударе и коэффициент использования ГИН.
5. Руководствуясь инструкцией к ЗУ-150 включить ГИН-750 в работу и добиться устойчивого рабочего хода с периодичностью импульса 3-5 с.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН	
6. ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

измерительными шарами.

7. Используя импульсный электронный осциллограф, определить основные параметры полученных импульсов.

8. Провести исследование влияния различных параметров схемы ГИН на величину амплитуды грозового импульса и времени ее достижения, используя компьютерную программу GIN (Инструкция по пользованию программой приводится в Приложении 1 практикума).

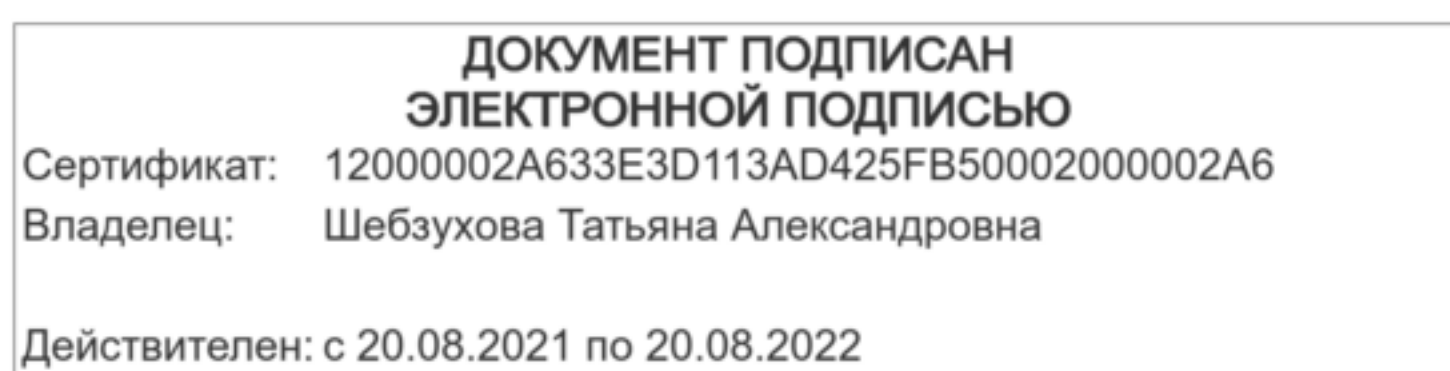
Содержание отчета:

Отчет должен содержать:

1. Название работы;
2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Назначение и принцип работы ГИН.
2. Основные элементы ГИН и их влияние на форму и параметры импульса.
3. Способы регулирования режима работы ГИН для измерения амплитуды импульсов и частоты их следования.
4. Методы измерения импульсных напряжений: амплитуды апериодического импульса, длины фронта и длины импульса.
5. Блок-схема осциллографа для регистрации однократных кратковременных импульсов высокого напряжения.



Лабораторная работа №8. Определение зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов

Цель работы: Изучить расчетные методы определения зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Ознакомиться с экспериментальными методами исследования защитных зон молниеотводов с использованием ГИН. Определить экспериментально и сравнить с расчетными зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов. Провести визуальное исследование зон защиты стержневых и тросовых молниеотводов по компьютерной программе.

Основы теории:

Стержневые и тросовые молниеотводы являются основным средством защиты энергетических и промышленных сооружений и установок от прямых ударов молнии (ПУМ). Реальный молниеотвод состоит из молниеприемника в виде стержня или троса, возвышающегося над объектом защиты, токоведущих спусков и заземлителя.

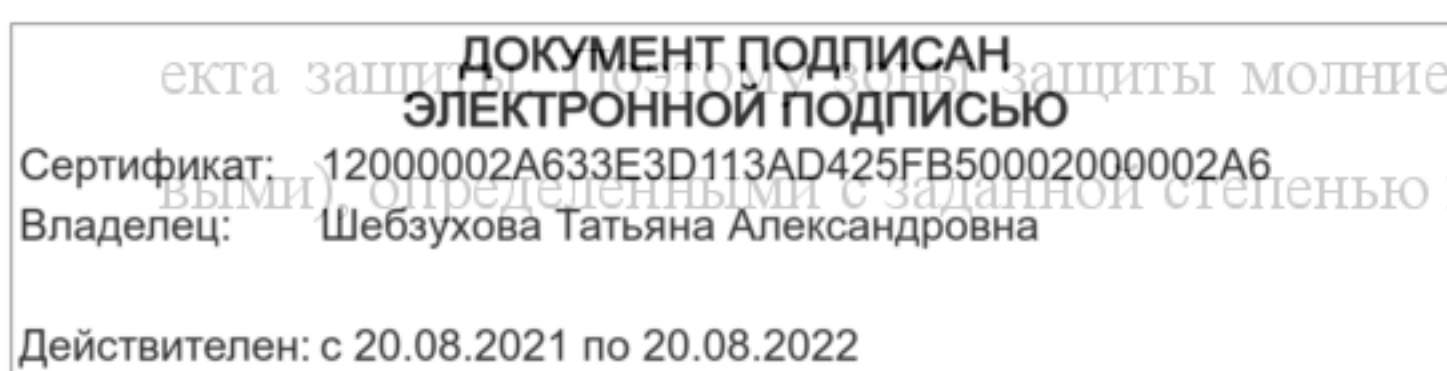
Молниеотводы воспринимают на себя удары молнии и образуют вокруг себя пространство, защищенное от ПУМ с большой степенью вероятности. Это пространство называется зоной защиты молниеотвода.

Защитное действие молниеотвода связано с тем, что развивающийся от облака лидерный разряд ориентируется в направлении максимального градиента (напряженности) электрического поля. Начиная с некоторой высоты $H = 10 - 20h$, где h является высотой защищаемого объекта на ориентацию лидерного разряда начинает влиять наиболее возвышающийся проводящий заземленный предмет (молниеотвод высотой h), в направлении которого поле резко усиливается.

При формировании лидерного канала над молниеотводом или с некоторым смещением (не более $3,5h$) молния или поразит молниеотвод, или ударит на значительном расстоянии в землю.

Если вблизи молниеотвода или под ним располагаются сооружения или оборудование, то при определенном возвышении молниеотвода над объектами защиты вероятность их поражения ПУМ может быть доведена до очень малых значений. Однако следует помнить, что статистический характер процесса пробоя длинных воздушных промежутков (молнии) при любых условиях оставляет некоторую вероятность поражения молнией объ-

екта защиты. Зоны защиты стержневых и тросовых молниеотводов ограничиваются расстояниями (критериями), определенными с заданной степенью вероятности защиты, например с $P_z = 0,999$.



Принятые нормы и рекомендации по расчету зон защиты молниеотводов получены на основании лабораторных исследований и подтверждаются полевыми наблюдениями за поражаемостью ПУМ реальных объектов и молниеотводов.

Зона защиты одиночного стержневого молниеотвода (рис. 8.1) вследствие осевой симметрии имеет вид тела вращения с образующей, удовлетворяющей уравнению:

$$r_x = 1,6h \frac{h - h_x}{h + h_x} p$$

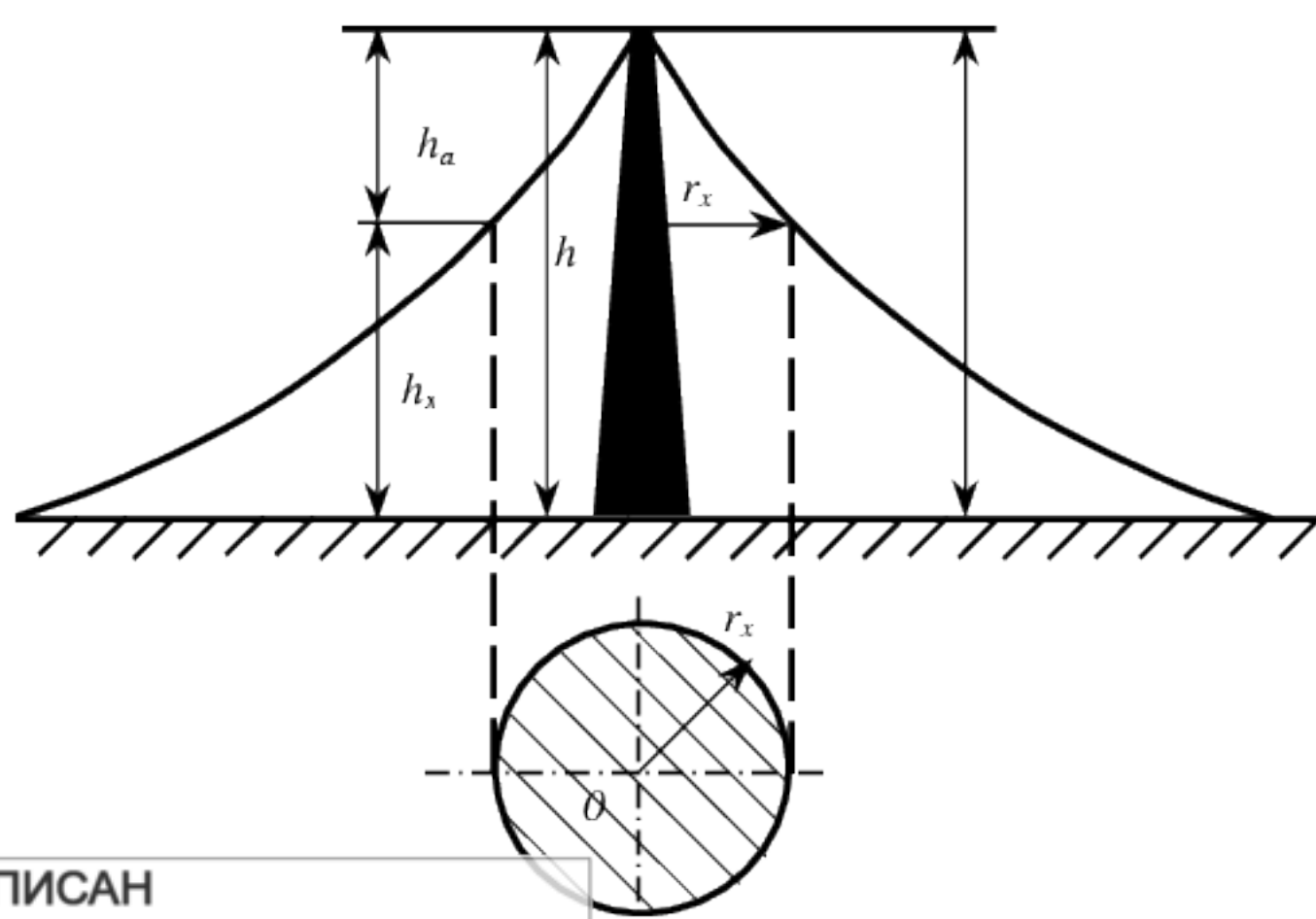
где $p = 1$ при $h \leq 30$ и $p = 5,5/\sqrt{h}$ при $h > 30$.

Для двух, трех и более стержневых молниеотводов при оптимальном их расположении общая зона защиты заметно превышает сумму зон отдельно стоящих двух, трех и более молниеотводов, так как общая вероятность прорыва молнии к объекту в сфере действия нескольких молниеотводов уменьшается.

На рис. 8.2 представлены зоны защиты двух, трех и четырех молниеотводов. Для двух молниеотводов внешняя огибающая в разрезе проводится также, как и для одиночного молниеотвода. Прогиб огибающей между вершинами определяется по окружности, проведенной через точки 1, 2 (рис. 8.2, а). Наименьшая ширина $2b_x$ на уровне h_x в плане находится по кривым или по выражению

$$b_x = 4r_x(7h_a - a)/(14h_a + a)$$

Построение внешней границы зоны защиты трех или четырех стержневых молниеотводов производится попарно по расчетным соотношениям для каждой двух соседних молниеотводов. Условие защиты всей площади между молниеотводами на уровне h_x определяется соотношением $D \leq 8h_a$, где D является диаметром окружности, проведенным через точки 1, 2, 3 или большая диагональ четырехугольника 1, 2, 3, 4 (рис. 8.2 б, в).



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Зона одиночного стержневого молниеотвода

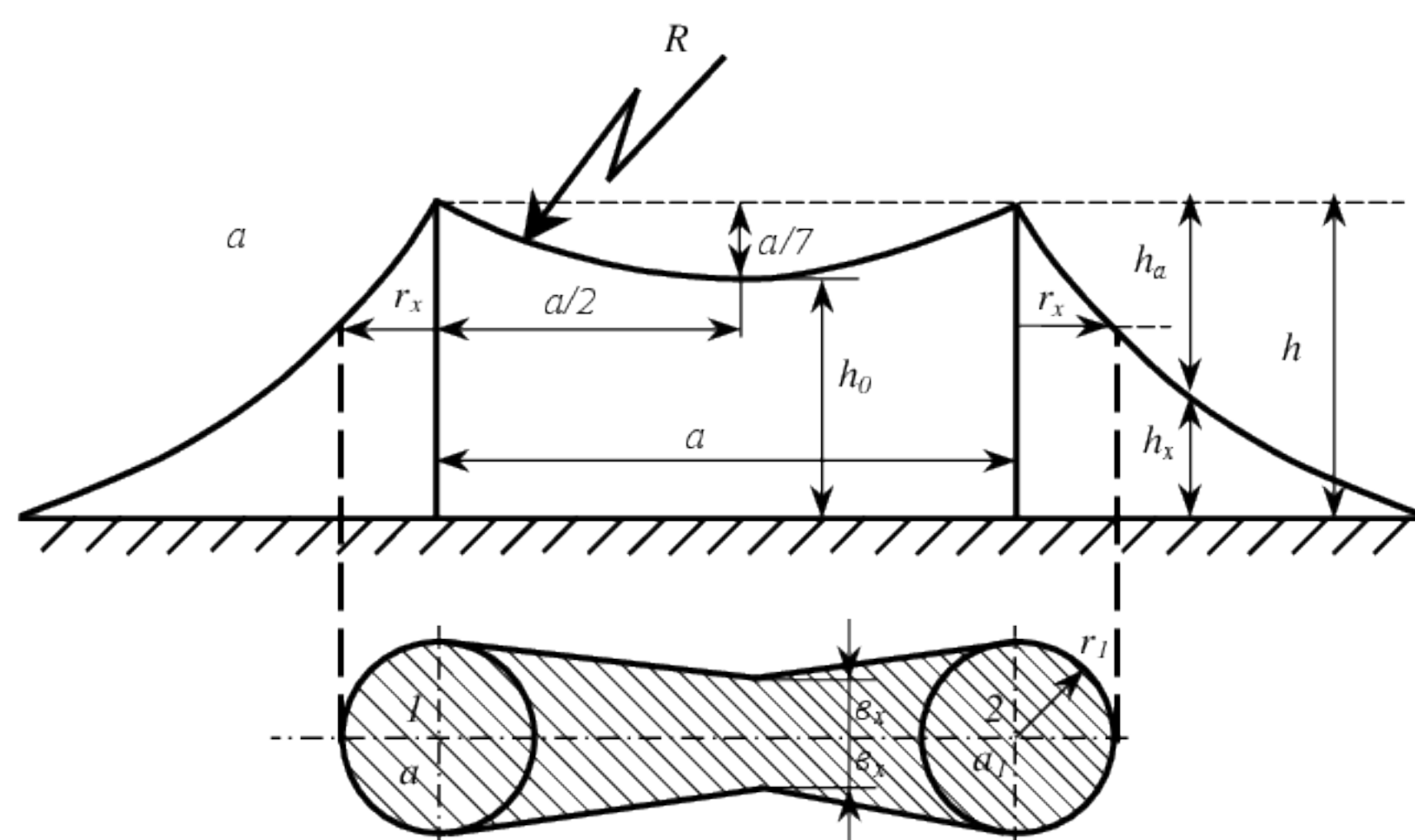


Рисунок 8.2 – Зона защиты двухстержневого молниеотвода

Для оценки эффективности тросовой защиты проводов ВЛ чаще всего используется понятие угла защиты α (рис. 8.3).

Лабораторные исследования и полевые наблюдения показывают, что эффективность тросовой защиты может быть определена по выражению

$$\lg P_{\alpha} = \frac{\alpha \sqrt{h_{on}}}{90} - 4,$$

где P_{α} - вероятность прорыва молнии через тросовую защиту;

h_{on} - высота опоры в метрах;

α - угол защиты, градусы.

При лабораторных исследованиях канал молнии моделируется обычно металлическим стержнем, на который подаются импульсы напряжения от ГИН. Стержень располагается на «высоте ориентации» молнии $H_M \approx (10 - 20)h_M$,

где h_M - высота модели молниеотвода.

Стержень перемещается в горизонтальной плоскости на расстоянии до $4h_M$ и более от оси молниеотвода (или наоборот молниеотвод перемещается относительно неподвижного стержня). Максимальная высота H_M при этом ограничена расстоянием, которое может быть перекрыто с помощью ГИН при положительном импульсе. По величине H_M можно найти размеры моделей молниеотводов и объектов защиты.

Испытательная установка (рис. 8.4) состоит из ГИН-750 кВ (см. лаб. работу № 7); стержня, имитирующего канал разряда молнии; заземленной плоскости; моделей стержневых молниеотводов; моделей объектов защиты и модели воздушной линии с защитными тросами.

Модели можно произвольно располагать на плоскости, а стержень перемещать по вертикали. Амплитудное значение импульса ГИН-750 $U_{\text{имп. max}} = 600 - 700$ кВ. Это напряжение при положительной полярности стержня позволяет перекрыть расстояние 1-1,2 метра. Поэтому для моделей стержневых молниеотводов приняты $h_{\text{м}} = 10$ и 15 см, объектов защиты $h_{\text{м.об}} = 5$ и 7 см.

Кроме строгого соблюдения правил ТБ при работе на испытательных установках высокого напряжения при выполнении данной работы необходимо иметь в виду следующее:

1. Подготовка моделей к испытанию и их перемещение по ходу работы при снятом напряжении и заземленной установке, а также включение ГИН-750 в работу и его отключение выполняется только преподавателем или лаборантом.

2. При работе ГИН-750 кВ студенты должны находиться на расстоянии не менее 0,5 метра от сетчатого ограждения.

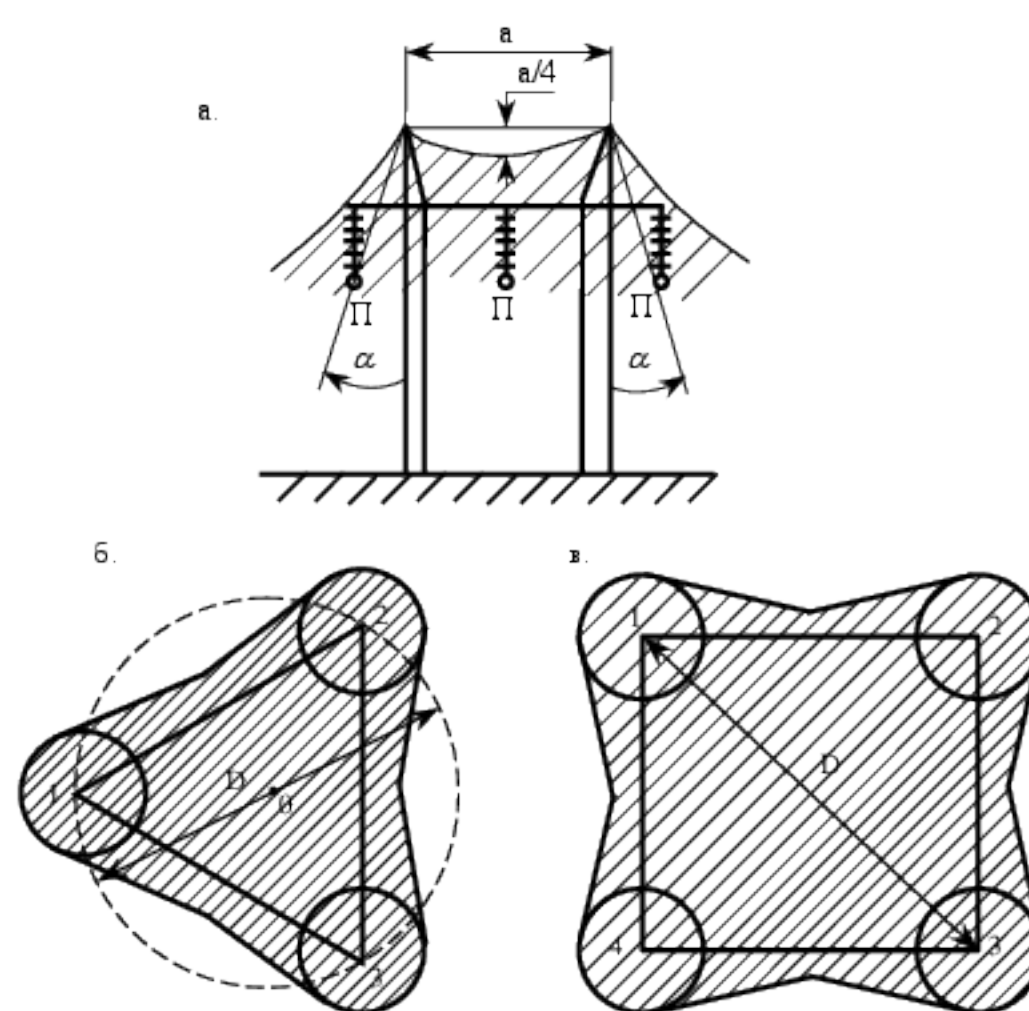
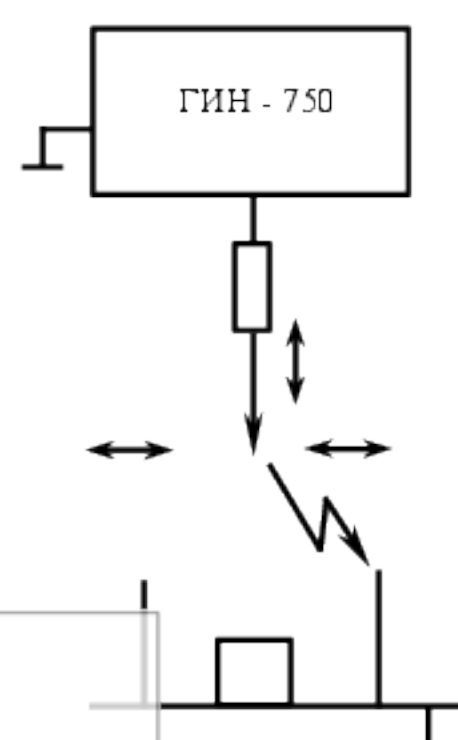


Рисунок 8.3 – Зоны защиты



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 8.4 – принципиальная схема испытательной установки

Указание по технике безопасности:

Указания по технике безопасности при выполнении лабораторных работ приведены в приложение А.

Указания по выполнению лабораторной работы:

1. По заданным размерам молниеотводов (h) и объектов защиты (например, $h_{об} = 0,5h$):

а) рассчитать радиус защиты отдельно стоящего стержневого молниеотвода на уровне земли и на уровне $h_{об}$;

б) рассчитать максимальное расстояние (а) между двумя молниеотводами одинаковой высоты (h) при расположении посередине между ними объекта защиты ($h_{об} = 0,5h$);

в) вычертить полученные зоны защиты в разрезе и в плане (на уровнях $h_x = 0$ и $h_x = h_{об}$).

2. Выполнить опытную проверку расчетных зон защиты на модели:

а) определить масштаб линейного моделирования $K_M = \frac{H_M}{H}$ при $H_M = 1\text{ м}$ для случая $H = 10h$ при $h \leq 30\text{ м}$ и вычислить размеры модели ($h_M = K_M h$);

б) установить модель молниеотвода на расстоянии $3,5h_M$ от оси стержня, а модель объекта защиты $h_{М,об} = h_{Мх} = 0,5h_M$ на расстоянии $r_{хМ}$ от оси молниеотвода;

в) включить ГИН-750 и определить вероятность поражения объекта для заданного числа разрядов (10-20).

Внимание! Операции включения и отключения ГИН-750 выполняются только преподавателем или лаборантом;

г) установить модели двух стержневых молниеотводов одинаковой высоты на расстоянии $\alpha_M = \alpha K_M$ друг от друга и модель объекта защиты $h_{М,об}$ посередине между молниеотводами. Включить ГИН и убедиться, что при принятых условиях вероятность поражения объекта практически равна нулю.

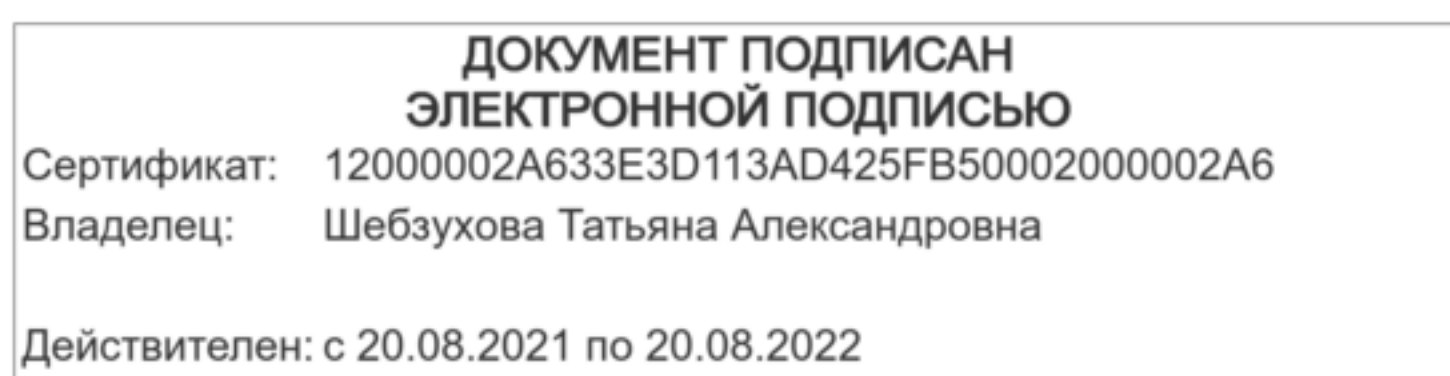
3. Рассчитать вероятность прорыва молнии мимо троса к проводу для опор высотой $h=16\text{ м}$ и 20 м при углах защиты $\alpha=20^\circ$, 25° и 30° . Выполнить качественную проверку эффективности тросовой защиты на модели воздушной линии.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
1. Название работы,	
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

2. Цель работы;
3. Краткие теоретические сведения;
4. Описание используемого оборудования и материалов;
5. Порядок выполнения работы;
6. Вычисления и обработка результатов;
7. Выводы.

Контрольные вопросы:

1. Объясните, с чем связано защитное действие стержневых и тросовых молниеотводов.
2. С какой высоты молния начинает ориентироваться на молниеотвод?
3. Что такое защитная зона молниеотвода?
4. Почему защитная зона ограничивается поверхностью, которая определяется с некоторой вероятностью?
5. Как определяются границы защитных зон стержневых и тросовых молниеотводов?
6. В чем заключается линейное моделирование молниеотводов и объектов защиты от ПУМ?
7. Как проверить соответствие результатов, полученных на моделях, защитному действию реальных молниеотводов?
8. Покажите защитный угол тросовой защиты ВЛ. Как зависит вероятность прорыва молнии мимо троса к проводу от величины защитного угла?



5. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

5.1 Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

5.1.2 Перечень основной литературы:

1. Бочаров Ю.Н. Техника высоких напряжений [Электронный ресурс] : учебное пособие / Ю.Н. Бочаров, С.М. Дудкин, В.В. Титков. — Электрон. текстовые данные. — СПб. : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2013. — 265 с. — 978-5-7422-3998-7. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/43976.html>

5.1.3 Перечень дополнительной литературы:

1. .Щеглов, Н. В. Современные виды изоляции. Часть 2. Изоляция высоковольтных вводов [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Щеглов. — Электрон. текстовые данные. — Новосибирск : Новосибирский государственный технический университет, 2010. — 72 с. — 978-5-7782-1317-3. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/45161.html>

5.2 Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям по дисциплине «Техника высоких напряжений».

2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным работам по дисциплине «Техника высоких напряжений».

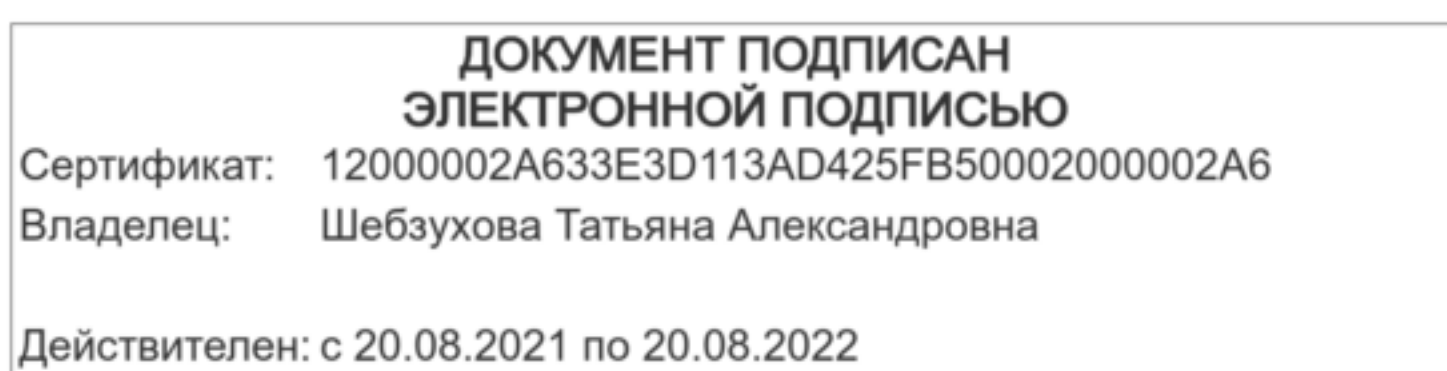
3. Методические рекомендации по выполнению контрольной работы по дисциплине «Техника высоких напряжений».

4. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов по дисциплине «Техника высоких напряжений».

5.3 Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"

2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks



Указание по технике безопасности

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

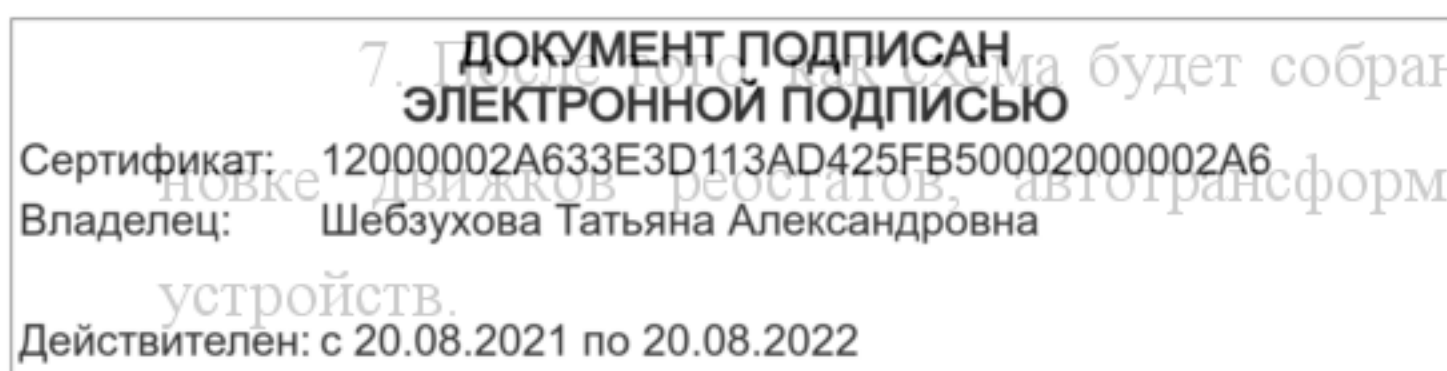
3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, чтобы схема соединений получилась наиболее простой, наглядной и работа с аппаратурой была удобной.

5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.



8. Собранный схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан, не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

13. Категорически запрещается:

- трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под напряжением, даже если оно невелико;
- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование, или приборы с других рабочих мест
- без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

Проверку наличия, подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

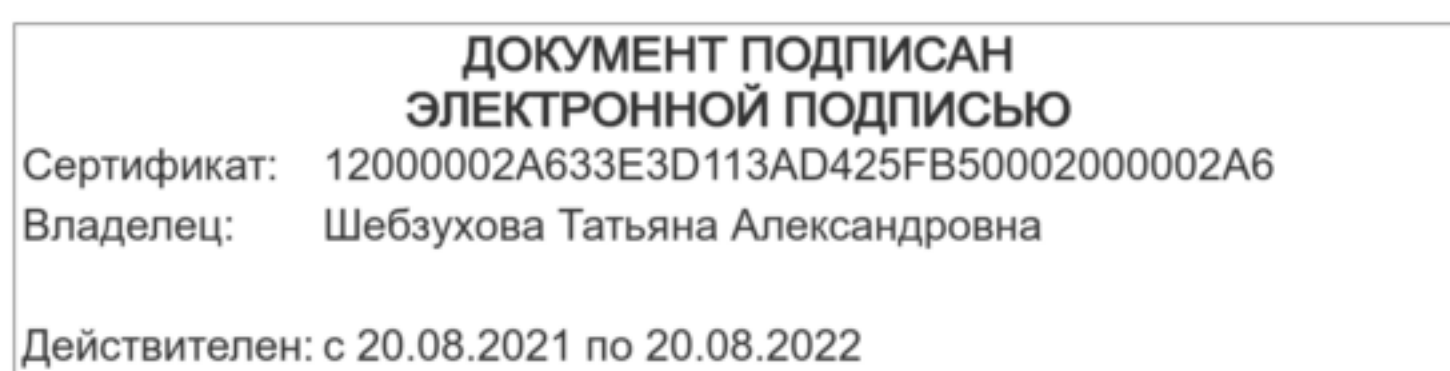
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Содержание

№ п/п		Стр.
	Введение	
1.	Цель и задачи изучения дисциплины	
2.	Оборудование и материалы	
3.	Наименование практических работ	
4.	Содержание практических работ	
4.1	Практическая работа №1 Характеристики электрического поля и общий метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов.	
4.2	Практическая работа №2 Расчет плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.	
4.3.	Практическая работа №3 Частные методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей.	
4.4	Практическая работа №4 Общая характеристика и закономерность разрядов в газовой среде.	
4.5	Практическая работа №5 Основные формы разрядов в газах и их использование.	
4.6	Практическая работа №6 Перекрытие твердой изоляции и скользящие разряды на поверхности.	
4.7	Практическая работа №7 Тепловой и электрический пробой.	
4.8	Практическая работа №8 Расчет заземляющих устройств.	
4.9	Практическая работа №9 Расчет сопротивления растеканию тока промышленной частоты.	
5	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины	
5.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины	
5.2	Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине	
5.3	Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины	



Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины. Практические занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Основными целями дисциплины являются: формирование у студентов стройной и устойчивой системы знаний о фундаментальных закономерностях зажигания и развития электрических разрядов в диэлектрических средах, механизмах пробоя диэлектриков при воздействии сильных электрических полей, видах изоляции высоковольтного оборудования и методах контроля ее состояния, способах получения и измерения высоких напряжений, природе возникновения перенапряжений и способов защиты от них.

В результате освоения данной дисциплины обеспечивается достижение целей основной образовательной программы «Электроэнергетика и электротехника»; приобретенные знания, умения и навыки позволят подготовить выпускника:

- способного к расчету, анализу и проектированию электроэнергетических элементов, объектов и систем с использованием современных средств автоматизации проектных разработок;
- научно-исследовательской деятельности, в том числе в междисциплинарных областях, связанной с математическим моделированием процессов в электроэнергетических системах и объектах, проведением экспериментальных исследований и анализом их результатов;
- к самостоятельному обучению и освоению новых знаний и умений для реализации своей профессиональной карьеры.

2. Оборудование и материалы

Аппаратные средства: переносной ноутбук, проектор, доска магнитно-маркерная.

Учебная аудитория для проведения учебных занятий, оснащена оборудованием и техническими средствами обучения.

3. Наименование практических работ

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
5 семестр			
1	Практическая работа № 1. Характеристики электрического поля и общий метод расчета напряженности электрического поля датчиков-сенсаторов.	1,5	

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	Изучить метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов.		
2	Практическая работа № 2. Расчет плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов. Изучить основные методы расчета плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.		
3	Практическая работа №3. Частные методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей. Изучить методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей.		
4	Практическая работа №4. Общая характеристика и закономерность разрядов в газовой среде. Изучить характеристику и закономерность электрических разрядов.		
5	Практическая работа №5. Основные формы разрядов в газах и их использование. Изучить основные формы разрядов в газах и их применение на производстве.	1,5	
6	Практическая работа №6. Перекрытие твердой изоляции и скользящие разряды на поверхности. Изучить понятия перекрытия изоляции, скользящие разряды и перенапряжения на воздушных линиях.		
7	Практическая работа №7. Тепловой и электрический пробой. Изучить условия возникновения тепловых и электрических пробоев.		
8	Практическая работа №8. Расчет заземляющих устройств. Приобретение навыков расчета ЗУ.		
9	Практическая работа №9. Расчет сопротивления растеканию тока промышленной частоты. Получение навыков расчета сопротивления растекания тока промышленной частоты.		
	Итого за 5 семестр:	3	
	Итого:	3	

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

4. Содержание практических работ

Практическая работа №1. Характеристики электрического поля и общий метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов.

Цель: Изучить метод расчета емкости и напряженности электрического поля простейших систем конденсаторов.

Основы теории:

Напряжённость электрического поля (E В/м) есть векторная величина, определяемая отношением силы, действующей в поле на электрический заряд, к величине заряда. Под действием напряжённости может происходить пробой или перекрытие изолирующей среды.

Вектор напряжённости электрического поля на границе раздела двух изолирующих сред при переходе в смежную среду преломляется, раскладываясь на нормальную (E_n) и тангенциальную (E_t) составляющие.

Потенциал электрического поля (ϕ в) является скалярной величиной. Точки электрического поля имеют положительный, отрицательный или нулевой потенциалы.

Положительный потенциал данной точки электрического поля равен энергии, которую приобретает единичный положительный заряд при его перемещении внешними силами из точки с нулевым потенциалом в данную точку против действия сил электрического поля.

Нулевым потенциалом условно обладают точки, удалённые в бесконечность от заряда или заземлённые.

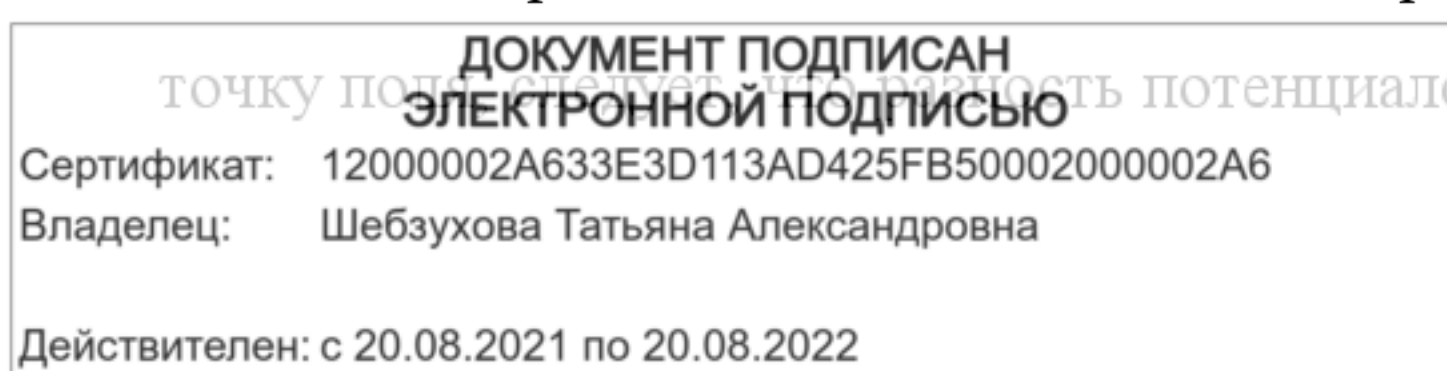
Отрицательный потенциал характеризует расход энергии поля на перемещение единичного положительного заряда из точки с нулевым потенциалом в данную точку по направлению действия сил электрического поля.

Точки электрического поля, имеющие одинаковый потенциал, образуют эквипотенциальные поверхности.

Разность потенциалов двух точек электрического поля называется напряжением U между этими точками и измеряется в вольтах:

$$U = \phi_1 - \phi_2 = \Delta\phi$$

Из определения потенциала как энергии единичного заряда, внесённого в данную точку поля, разность потенциалов между двумя точками поля $\Delta\phi$ есть приращение энергии.



щение или убыль этой энергии. Для заряда, по величине отличного от единицы, это приращение энергии можно рассматривать как работу ΔA , произведенную силой qE на отрезке пути Δa .

При совпадении направления действия силы qE с направлением перемещения заряда работа отрицательна, т. е. производится за счёт сил поля, а при несовпадении — работа положительна, так как производится за счёт внешних сил:

$$-A = qE\Delta a$$

Отсюда может быть получена математическая связь между потенциалом и напряжённостью:

$$-d\varphi = -\frac{dA}{a} = E da$$

Или

$$E = -\frac{d\varphi}{da} [\text{В/м}]$$

Используя зависимость (1), дадим новое определение напряжённости: напряжённость электрического поля есть скорость убывания (знак минус) потенциала по направлению силовых линий поля.

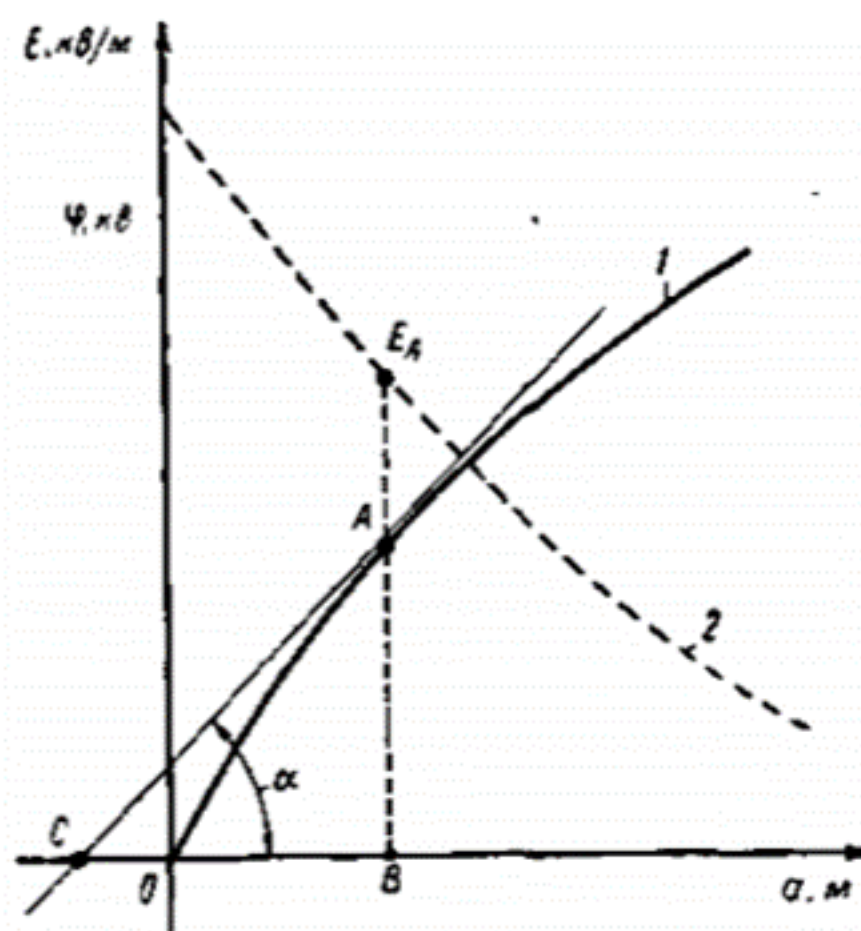
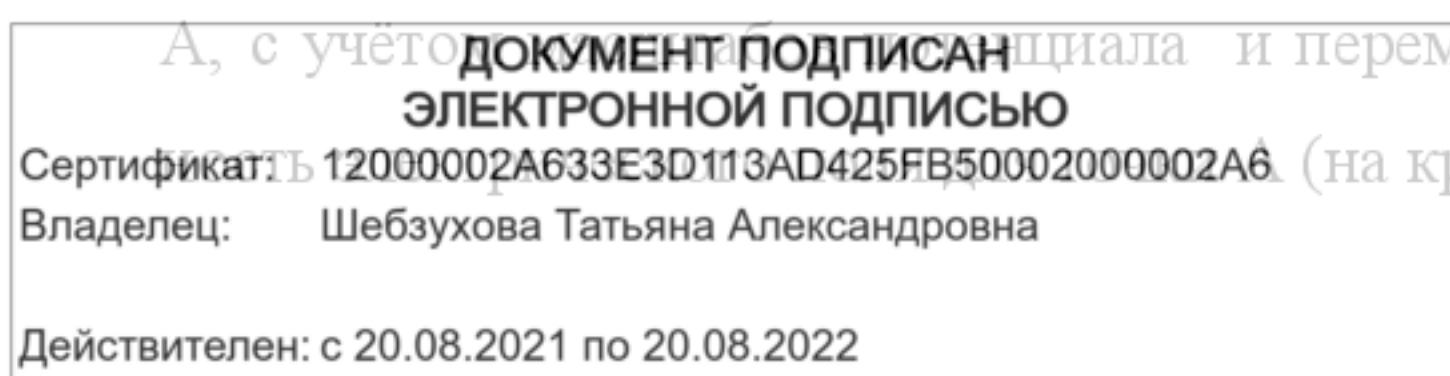


Рисунок 1.1 – Графическая связь между потенциальной кривой и кривой напряжённости

Пусть изменение потенциала между какими-либо точками электрического поля изображено графически (рис. 1.1), В этом случае величина напряжённости электрического поля, выраженная зависимостью 1), приобретает геометрический смысл и может быть определена, как тангенс угла наклона $\text{tg } \alpha$ касательной к потенциальной кривой 1 в точке касания

А, с учётом зависимости 2) (на кривой 2) выразится



$$E = \left| \frac{d\varphi}{da} \right| = \lim \left| \frac{\Delta\varphi}{\Delta a} \right| = \lim \frac{m_\varphi AB}{m_a BC} = \frac{m_\varphi}{m_a} \operatorname{tg} a$$

$$\operatorname{tg} a = \frac{AB}{BC}, \quad AB = \frac{\Delta\varphi}{m_\varphi}, \quad BC = \frac{\Delta a}{m_a}$$

Допустим, что характер изменения потенциала в изолирующей среде задан графически. Тогда, используя формулу, по точкам строим кривую изменения напряжённости электрического поля.

С другой стороны, из соотношения имеем $d\varphi = -E da_1$, откуда по заданной аналитической зависимости изменения напряжённости электрического поля $E = f(a)$ получим потенциал в

любой точке электрического поля, суммируя произведения напряжённости электрического поля на бесконечно малые приращения координаты движущейся точки на участке от бесконечности до заданной:

$$\varphi_a = - \int_{\infty}^a E da = \int_a^{\infty} E da [\text{В}]$$

В соответствии с зависимостью (3) дадим потенциалу новое определение.

Потенциал в заданной точке электрического поля есть линейный интеграл напряжённости в пределах от бесконечности до заданной точки поля.

Градиент потенциала (Г в/м) — характеристика электрического поля, численно равная напряжённости электрического поля, отличающаяся от нее только противоположным знаком.

Градиент есть вектор, определяющий скорость нарастания потенциала в направлении против сил поля:

$$G = \operatorname{grad} \varphi = -\bar{E} = \frac{d\varphi}{da} [\text{В/м}]$$

Диэлектрическая проницаемость (в ф/м) — основная характеристика электрических свойств изолирующего материала, физически характеризующая интенсивность процессов поляризации в среде диэлектрика, происходящих под действием внешнего электрического поля. Математически она может быть представлена произведением двух величин:

$$\epsilon = \epsilon_0 \epsilon' [\text{В/м}]$$

где ϵ_0 — электрическая постоянная, установленная опытным путем;

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Щербухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

проницаемость материала (величина безраз-

Значения относительных диэлектрических проницаемостей для различных материалов даны в П-1 *.

Электрическое смещение (D к/м²)—характеристика, определяющая действие электрического поля на диэлектрик — есть векторная величина, равная произведению вектора напряженности электрического поля в рассматриваемой точке на диэлектрическую проницаемость среды:

$$D = E\varepsilon \text{ [к/м}^2\text{]}$$

Электрическое смещение представляет собой плотность электрических зарядов на поверхности заряженного тела либо заряд, индуцируемый на каждом квадратном метре проводящей поверхности, внесенной в электрическое поле нормально к его силовым линиям.

Электрическая емкость (С ф) — понятие, применяемое к конструкциям, представляющим собой проводящие тела (электроды), разделенные слоем диэлектрика. Конструкции, использованные для накопления или сохранения зарядов, называются конденсаторами.

Если электроды конденсатора соединить с источником напряжения, то они приобретут соответствующие равные по величине и противоположные по знаку потенциалы:

$$U = \varphi_1 - (-\varphi_2) = 2\varphi$$

По мере протекания процесса поляризации в диэлектрике на поверхности электродов накапливаются заряды. Опыт показывает, что между величиной накопившегося заряда Q и величиной напряжения U между электродами существует связь, зависящая от геометрических размеров конденсатора и рода диэлектрика. Эту связь с количественной стороны характеризует емкость C .

Емкость есть отношение заряда к напряжению:

$$C = \frac{Q}{U}$$

Единицей емкости в системе СИ является фарада (ф). Так как эта величина практически очень велика, то в расчетах используют ее дольные единицы (см. П-2).

Расчетам емкости и напряженности электрического поля в ТВН придается исключительно важное значение, так как большинство высоковольтных конструкций состоит из проводящих поверхностей, разделенных слоем диэлектрика.

$$C = \frac{I * 10^6}{U2\pi f} \text{ [мкф]}$$

Для измерения емкости используются мостовые схемы различной конструкции. Расчет емкости может быть произведен по результатам измерения тока и напряжения при заданной частоте

Документ подписан
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Если расчет емкости производится в процессе конструирования изделия, то сложная форма проводящих поверхностей приводится к геометрически правильной системе: плоскость—плоскость, цилиндр — цилиндр, сфера — сфера, для которых можно установить единую математическую последовательность расчета емкости и напряженности. Исходным соотношением такого расчета является теорема Гаусса*.

Теорема Гаусса: поток вектора напряженности электрического поля сквозь замкнутую поверхность равен заряду, заключенному в части пространства, ограниченного этой поверхностью, деленному на величину диэлектрической проницаемости исследуемой среды.

Математически теорема Гаусса выражается зависимостью

$$\oint E dS = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon'}$$

где Q — заряд, к;

E — напряженность электрического поля, в/м;

$\epsilon_0 \epsilon'$ — диэлектрическая проницаемость среды, ф/м.

При расчетах целесообразно использовать эквипотенциальные поверхности S_a , которые с одной стороны геометрически правильны, а с другой выбраны так, что напряженность электрического поля во (Всех точках неизменна. Это позволяет вынести величину напряженности за знак интеграла. Части поверхности, не пересекаемые потоком вектора напряженности электрического поля, например торцевые части цилиндрической поверхности, следует исключить из рассмотрения.

Электрического поля и величиной заряда, называемое теоремой Гаусса.

1. Применяя теорему Гаусса, мысленно ограничим один из электродов заданной системы замкнутой эквипотенциальной поверхностью, для которой выразим математическую связь между напряженностью электрического поля, зарядом и диэлектрической проницаемостью среды:

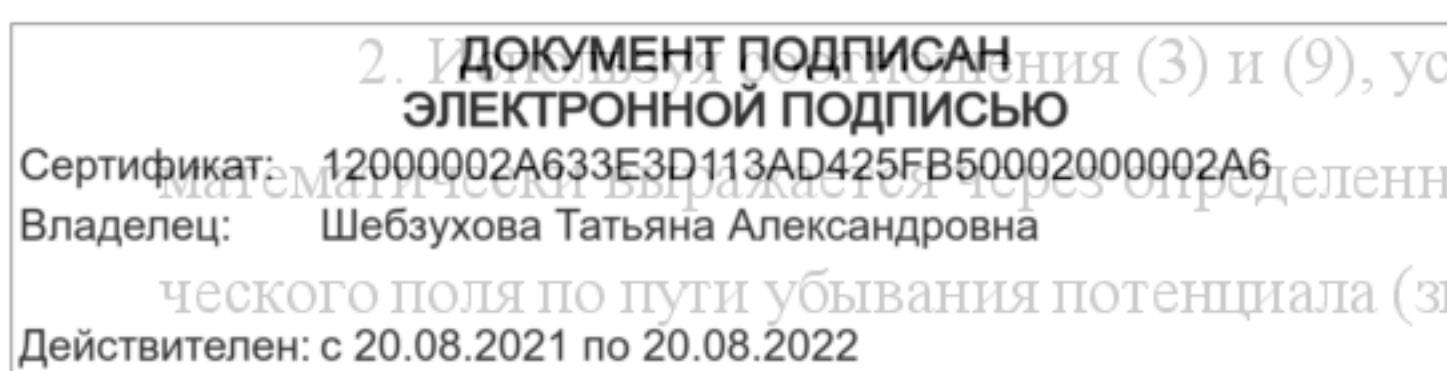
$$E \oint dS = \frac{Q}{\epsilon}$$

так как

$$\oint dS = S_a$$

То

$$E = \frac{Q}{\epsilon S_a}$$



установим, что напряжение между электродами вычисляется через определенный интеграл вектора напряженности электрического поля по пути убывания потенциала (знак минус) вдоль направления силовых линий:

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = - \int_l^2 E da = - \frac{Q}{\varepsilon} \int_l^2 \frac{da}{S_a} [\text{В}]$$

Здесь положительно заряженному электроду присвоен индекс 1. Пользуясь формулой (6), согласно которой емкость есть отношение заряда к напряжению, и зависимостью (10), получим после перемены пределов интегрирования соотношение, определяющее в общем виде емкость рассматриваемой конструкции:

$$C = \frac{\varepsilon}{\int_1^2 \frac{da}{S_a}}$$

В соответствии с изложенной последовательностью расчета емкости одним из промежуточных действий было определение напряженности (9), однако полученная зависимость не может быть практически использована, так как величина заряда Q обычно не задается.

Для получения практически пригодной формулы расчета напряженности электрического поля любой точки между электродами, следует, рассчитав емкость конденсатора по формуле (11) и зная напряжение, приложенное к электродам, выразить в зависимости (9) заряд как произведение емкости на напряжение:

$$E_x = \frac{CU}{\varepsilon S_x} [\text{В/м}]$$

где C — емкость конденсатора;

$S_x = S_a$ — эквипотенциальная поверхность, проведенная через точку с искомой напряженностью электрического поля, м^2 ;

U — напряжение, действующее между электродами, в;

ε — диэлектрическая проницаемость среды, ф/м.

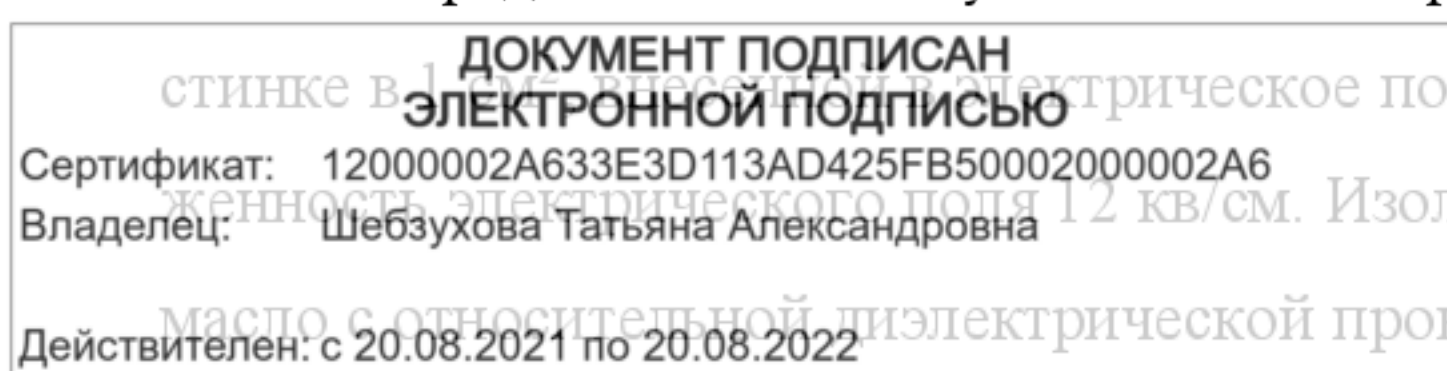
Задания:

Задание №1

Определить электрическое смещение в точке электрического поля напряженностью 10 кВ/см, если изолирующей средой является воздух.

Задание №2

Определить величину связанного заряда, индуцированного на проводящей пластинке в электрическом поле перпендикулярно силовым линиям. Напря-



женность электрического поля 12 кВ/см. Изолирующей средой является трансформаторное масло с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 2,5.

Задание №3

Определить среднюю напряженность электрического поля на участке протяженностью 0,4 мм, если разность потенциалов между точками, ограничивающими участок, 600 В.

Задание №4

Потенциалы электродов изолированного от земли конденсатора равны ± 2000 В. Определить напряжение, действующее между его выводами.

Задание №5

Определить величину заряда конденсатора емкостью 2 мкф, если напряжение между его выводами 100 В.

Задание №6

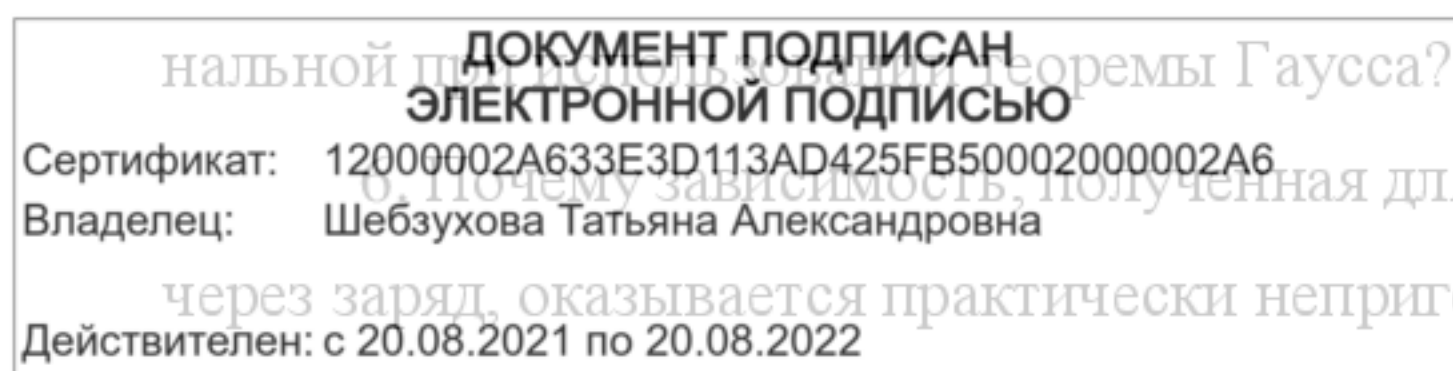
Плоский конденсатор с воздушной изоляцией имеет емкость 100 пф и заряжен до напряжения 2 кВ. Определить напряженность электрического поля между его электродами, имеющими площадь 625 см².

Задание №7

Одиночная сфера в воздухе имеет емкость 20 пф и заряжена до напряжения 30 кВ. Определить напряженность электрического поля у поверхности сферы, если ее радиус 20 см.

Контрольные вопросы:

1. Почему проводящие тела имеют эквипотенциальные поверхности?
2. Перечислить известные способы графического и аналитического выражения напряженности электрического поля.
3. Как по заданному графику потенциала построить график напряженности электрического поля?
4. Как определить пределы линейного интеграла для расчета напряжения по напряженности электрического поля?
5. Какая форма условной поверхности, охватывающей заряд, будет наиболее рациональной при расчете напряженности электрического поля?



7. Как пересчитать емкость, выраженную в фарадах, в пикофарады?
8. Что такое электрическое смещение?
9. Какова величина относительной диэлектрической проницаемости воды и проводников?
10. Что показывает и что характеризует величина относительной диэлектрической проницаемости?
11. В какой из двух сред при той же напряженности электрического поля будет больше электрическое смещение — в фарфоре или слюде?
12. В чем заключается закон преломления вектора напряженности электрического поля на границе раздела двух изолирующих сред и как практически он используется?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Практическая работа №2. Расчет плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов

Цель: Изучить основные методы расчета плоского, цилиндрического и сферического конденсаторов.

Основы теории:

Для расчета емкости и напряженности электрического поля между электродами конденсатора воспользуемся схемой рис. 3 и вышеизложенной последовательностью расчета.

Емкость конденсатора определится из зависимости

$$C = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon S_a}{a}$$

В том случае, если напряжение, приложенное к конденсатору, задано, можно получить формулу для расчета напряженности электрического поля в изоляции

$$E = \frac{Q}{\varepsilon S_a} = \frac{UC}{\varepsilon S_a} = \frac{U \varepsilon S_a}{\varepsilon S_a a} = \frac{U}{a} \text{ [кВ/см]}$$

Изменение потенциала и напряженности в слое диэлектрика можно изобразить графически.

Расчет емкости и напряженности электрического поля в изоляции слоистого конденсатора производится согласно двум основным положениям:

а) -напряжение, приложенное к внешним обкладкам конденсатора, равно сумме напряжений, приходящихся -на каждый слой:

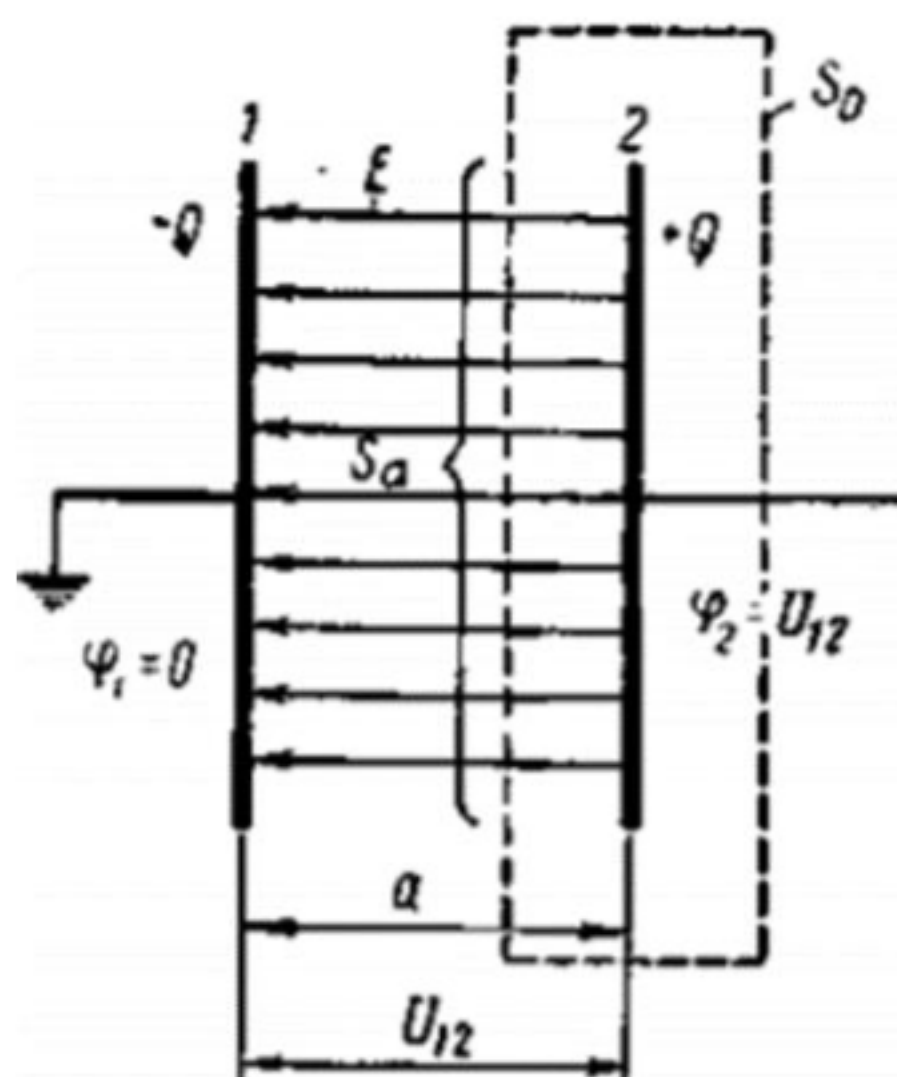


Рисунок 3-1--Расчетная схема плоского конденсатора:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

S_0 - условная замкнутая поверхность;
 S_a - активная часть замкнутой поверхности

б) электрическое смещение и заряд в плоскости любого слоя постоянны

$$D = E_1 \varepsilon_1 = E_2 \varepsilon_2 = E_n \varepsilon_n$$

$$Q = CU = C_1 U_1 = C_2 U_2 = C_n U_n$$

Расчетные формулы емкости двух и трехслойного конденсатора имеют вид:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$C = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 C_2 + C_1 C_3 + C_2 C_3}$$

Кроме того, из равенства зарядов следует:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{C_2}{C_1}$$

Напряжения между смежными слоями плоского и любого другого конденсатора распределяются обратно пропорционально емкостям этих слоев.

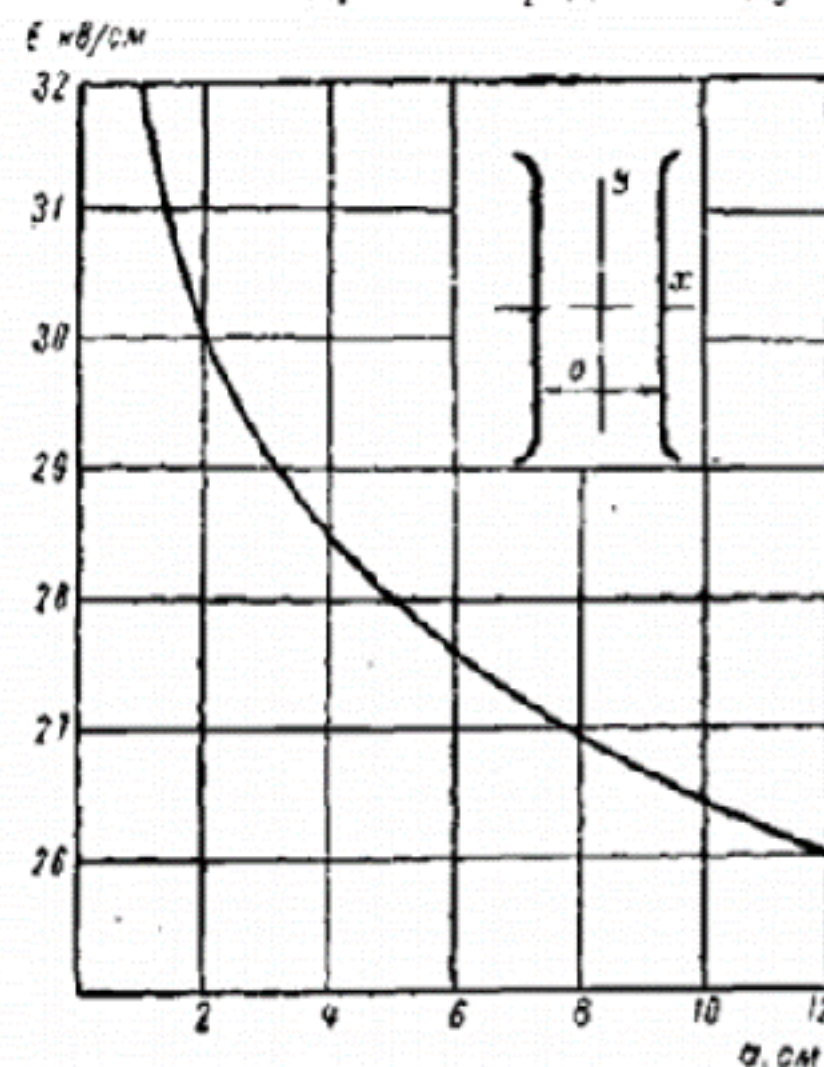
Для вывода расчетной формулы напряженности электрического поля в диэлектрике плоского конденсатора используем зависимости, откуда для двухслойного конденсатора получим:

$$U = E_1 a_1 + E_2 a_2 = E_1 a_1 + E_1 \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} a_2 = E_1 \left(\frac{a_1 \varepsilon_2 + a_2 \varepsilon_1}{\varepsilon_2} \right)$$

$$E_1 = \frac{U \varepsilon_2}{a_1 \varepsilon_2 + a_2 \varepsilon_1}$$

Зависимость можно видоизменить

$$E_1 = \frac{U}{a_1} \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_2 + \frac{a_2 \varepsilon_1}{a_1}} \right) = \frac{U}{a_1 \left(1 + \frac{\varepsilon_1 S a_2}{a_1 \varepsilon_2 S} \right)} = \frac{U}{a_1 \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right)}$$



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Опытная характеристика зависимости пробивной

прочности воздуха от расстояния между плоскими электродами при нормальных атмосферных условиях

Регулирование напряжения «а слое конденсатора можно осуществлять подбором его толщины и величины относительной диэлектрической проницаемости-материала.

Опыт показывает, что величина средней пробивной напряженности воздушной среды между электродами плоского конденсатора зависит при прочих равных условиях от расстояния между электродами (рис.2.2). Это объясняется нарушением однородности поля у краев электродов.

Поле цилиндрического конденсатора плоскопараллельное и характеризуется осевой симметрией, причем эквипотенциальные поверхности представляют собой коаксиальные цилиндры.

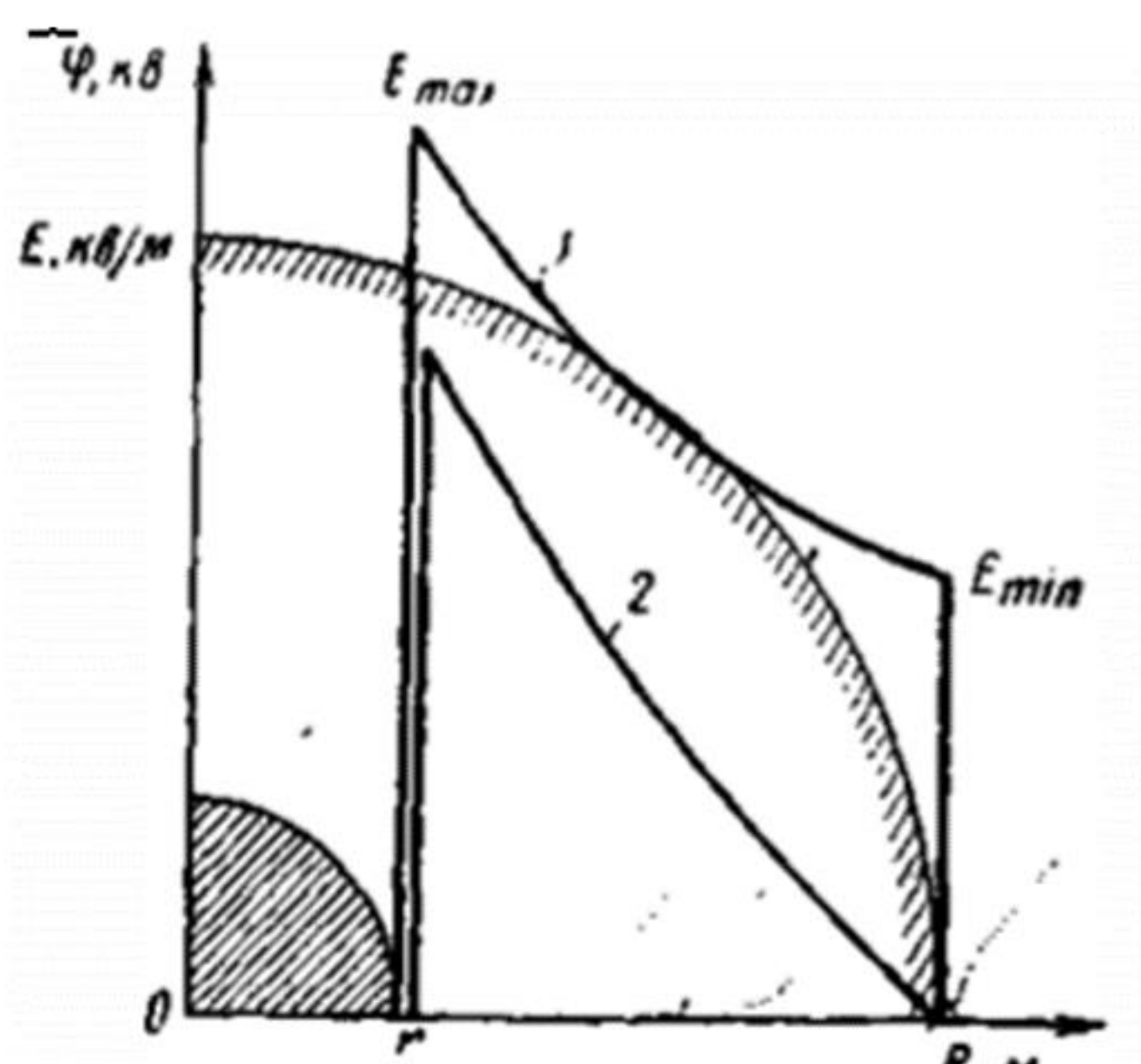


Рисунок 2.3 – Изменение напряженности (1) и потенциала (2) в слое изоляции цилиндрического конденсатора

Поле цилиндрического конденсатора плоскопараллельное и характеризуется осевой симметрией, причем эквипотенциальные поверхности представляют собой коаксиальные цилиндры.

Последовательность расчета:

1. В соответствии с теоремой Гаусса:

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon 2\pi r_x l} \text{ [В/см]}$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Поле зависимости определяет гиперболический закон изменения напряженности электрического поля.

2. Используя зависимость, выразим напряжение, приложенное к конденсатору, через напряженность электрического поле E_x :

$$U = - \int_R^r E_x dx = - \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon 2 \pi r_x l} \int_R^r \frac{dx}{r_x}$$

откуда

$$U = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon 2 \pi l} \ln \frac{R}{r} \text{ [В]}$$

3. В соответствии с определением емкости как отношения заряда к напряжению имеем

$$C = \frac{2 \pi \varepsilon_0 \varepsilon l}{\ln \frac{R}{r}} \text{ [Ф]}$$

При замене выражении заряда через, произведение емкости и напряжения после соответствующих преобразований получим уравнение для напряженности электрического поля, пригодное для практических расчетов:

$$E_x = \frac{U}{2.3 x \lg \frac{R}{r}} \text{ [В/см]}$$

В большинстве случаев важны максимальная и минимальная величины напряженности электрического поля, получаемые из общей зависимости:

$$E_{max} = \frac{U}{2.3 x \lg \frac{R}{r}} \text{ [В/см]}$$

$$E_{min} = \frac{U}{2.3 R \lg \frac{R}{r}} \text{ [В/см]}$$

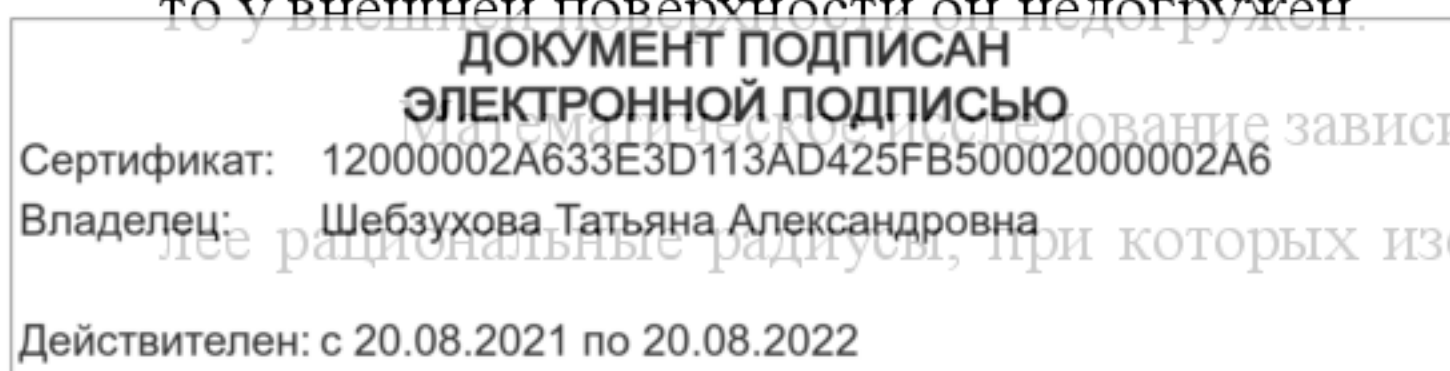
Для расчета характеристики изменения потенциала в слое изоляции воспользуемся формулами, предположив, что потенциал уменьшается при изменении координаты точки от x до R , получим

$$\varphi_x = - \int_r^x E_x dx = - \frac{U}{2.3 \lg \frac{R}{r}} \int_r^x \frac{dx}{x} = \frac{U}{\lg \frac{R}{r}} \lg \frac{R}{x}$$

Характеристики изменения потенциала и напряженности электрического поля вдоль радиуса цилиндрического конденсатора приведены на рис. 2.4, Напряженность электрического поля у поверхности с меньшим радиусом имеет максимальное значение.

Таким образом, если вблизи внутреннего электрода материал напряжен до предела, то у внешней поверхности он недогружен.

Уменьшение напряженности на минимум позволяет выбрать наиболее рациональные радиусы, при которых изоляция загружена более равномерно и имеет



минимальную толщину. Для анализа берут первую производную от знаменателя в выражении и приравнивают ее нулю

$$\frac{d}{dr} \left(r \ln \frac{R}{r} \right) = \frac{d}{dr} (r \ln R - r \ln r) = \ln R - \ln r - 1 = 0$$

Откуда

$$\ln \frac{R}{r} = 1$$

Т.е

$$\frac{R}{r} = e = 2.718$$

Максимальная напряженность электрического поля вблизи поверхности внутреннего цилиндра минимальна, если отношение радиусов внешнего и внутреннего цилиндров равно основанию натурального логарифма ($e=2,718$).

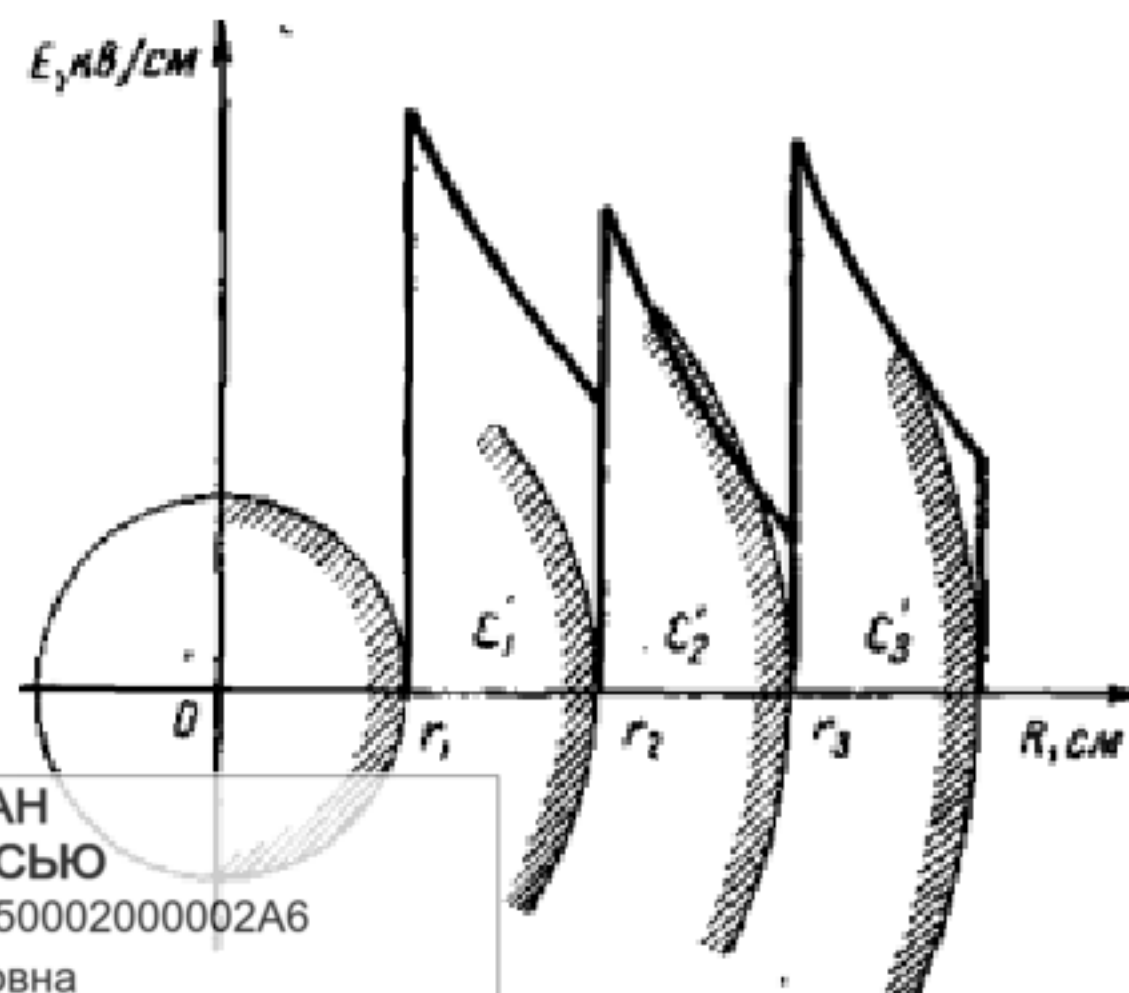
$$E_{max} = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} = \frac{U}{r \ln e} = \frac{U_0}{r} [\text{кВ/см}]$$

Пусть цилиндрический конденсатор состоит из трех различных слоев изоляции, внутренние радиусы которых r_1, r_2, r_3 , а наружный r_4 . Такую конструкцию можно представить как три последовательно соединенных конденсатора C_1, C_2 и C_3 , емкость каждого из которых определяется формулой

$$C_n = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon 2\pi l}{\ln \frac{r_{n+1}}{r_n}}$$

Напряженность электрического поля цилиндрического конденсатора со слоистой изоляцией на границе раздела двух смежных сред меняет свою величину скачкообразно.

Напряженность электрического поля в пределах слоя изменяется по гиперболической кривой, а в целом образует пилообразную кривую (рис. 7) с разной величиной «пигов» напряженности электрического поля.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 2.4 – Изменение напряженности электрического поля
в изоляции многослойного цилиндрического конденсатора

Для расчета напряженности электрического поля в слоях многослойного конденсатора пользуются формулой:

$$E_x = \frac{U}{x \ln \frac{r_{x+1}}{r_x} \left(\frac{C_x}{C_1} + \frac{C_x}{C_2} + \frac{C_x}{C_3} + \dots + \frac{C_x}{C_n} \right)},$$

где C_x – емкость слоя, в котором определяется напряженность электрического поля;

r_x – внутренний радиус исследуемого слоя;

r_{x+1} – внешний радиус исследуемого слоя.

Например, для первого слоя трехслойного цилиндрического конденсатора напряженность электрического поля в любой точке с радиусом x определяется из выражения

$$E_1 = \frac{U}{x \ln \frac{r_2}{r_1} \left(\frac{C_1}{C_1} + \frac{C_1}{C_2} + \frac{C_1}{C_3} \right)}.$$

Сферический конденсатор в высоковольтных конструкциях встречается сравнительно редко. В большинстве случаев его форма только приближается к сферической или является ее частью. Примером служит конструкция подвесного изолятора в части между полусферической шапкой и пестиком. Иногда в ТВН используются одиночные сферы, для которых вторым электродом бесконечно большого радиуса служит земля или стены помещения.

Электрическое поле между обкладками сферического конденсатора обладает сферической симметрией.

Последовательность расчета:

1. В соответствии с теоремой Гаусса

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon 4\pi r_x^2}.$$

2. Используя зависимость (10), выразим напряжение, приложенное к электродам, через напряженность электрического поля:

$$U = - \int_R^{r_1} E_x dr = - \frac{Q}{\varepsilon 4\pi} \int_R^{r_1} r_x^{-2} dr = \frac{-Q}{\varepsilon 4\pi} \left[-\frac{1}{r_1} - \left(-\frac{1}{R} \right) \right] = \frac{Q(R - r_1)}{\varepsilon 4\pi R r_1}.$$

3. В соответствии с определением емкости как отношения заряда к напряжению имеем

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ		$C = \frac{4\pi\varepsilon R r_1}{R - r_1} [\Phi].$
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6	
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна	
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022		

Используя выражения (38), (6) и (40), получим расчетную формулу напряженности электрического поля в произвольной точке

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon 4\pi r_x^2} = \frac{U 4\pi \varepsilon R r_1}{(R - r_1) \varepsilon 4\pi r_x^2} = U \frac{R r_1}{r_x^2 (R - r_1)} [\text{кВ/см}].$$

При расчете точек потенциальной кривой в пространстве между сферами условимся, что наружная сфера заземлена, тогда потенциал в любой точке среды радиуса r_x получим из соотношения

$$\varphi_x = \int_{r_1}^R E_x dr = U \frac{R r_1}{R - r_1} \int_{r_1}^R \frac{dr}{r_x^2} = U \frac{r_1 (R - r_x)}{r_x (R - r_1)}.$$

Зависимости (41) и (42) графически изображены на рис. 2.5.

В практических расчетах используются значения максимальной и минимальной напряженностей электрического поля, получаемые из зависимости (41) с текущими радиусами внутренней и наружной сфер:

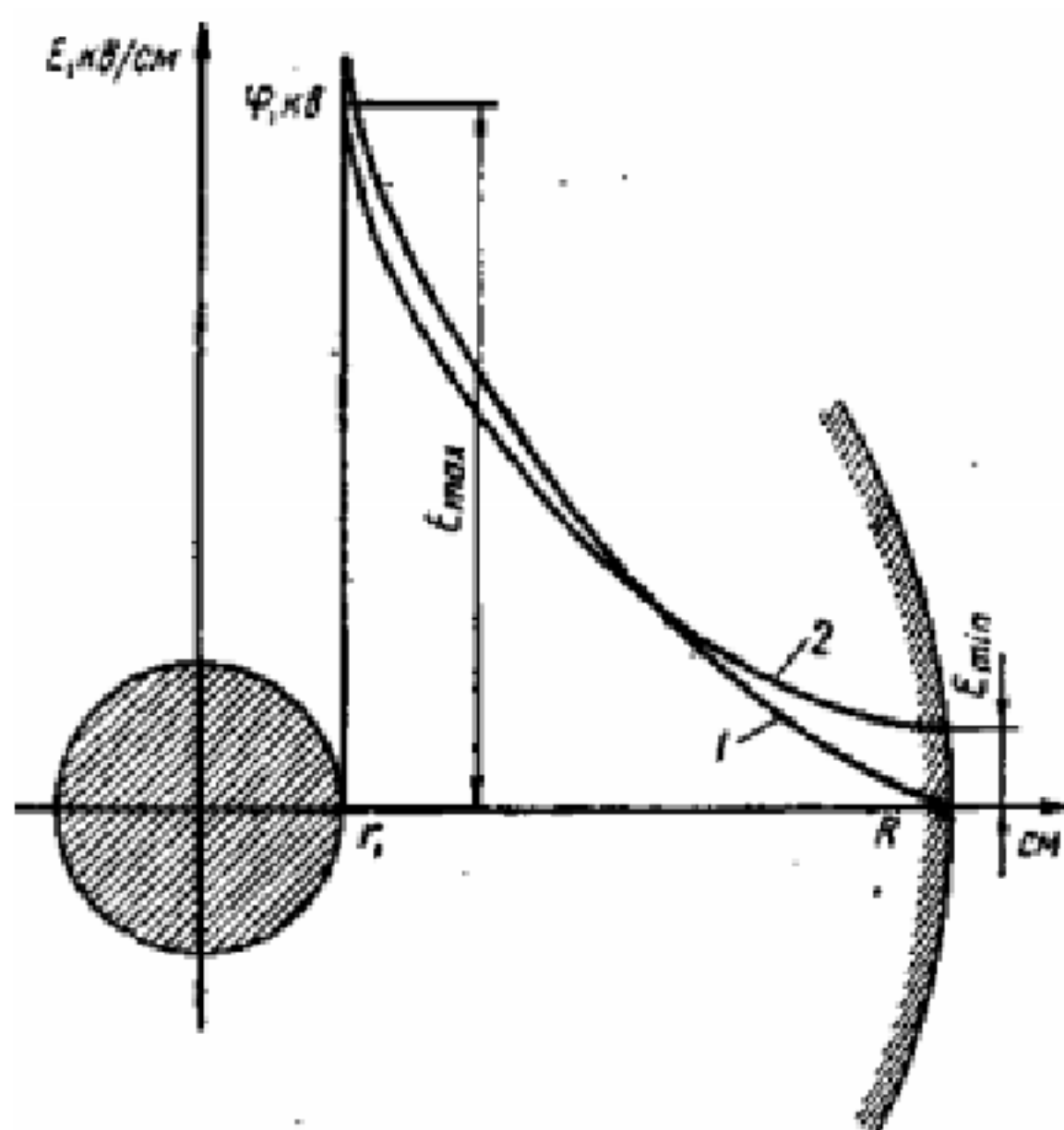


Рисунок 2.5 – Потенциальная кривая (1) и характеристика изменения напряженности электрического поля (2) в среде сферического конденсатора

Предположим, что радиус внешней сферы конденсатора останется неизменным, а внутренний радиус плавно увеличится от r_1 до R , тогда значение максимальной напряженности электрического поля изменится по гиперболической кривой, имеющей точку минимума. Эта закономерность имеет практический интерес, так как при соотношении радиусов,

соответствует минимальному значению напряженности электрического поля, обеспечивается наиболее полное использование изоля-

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Математически координату точки перегиба кривой максимальной напряженности электрического поля получают, по формуле (43), приравняв нулю первую производную от знаменателя дроби, откуда

$$r_1 = \frac{R}{2},$$

или

$$E_{max} = \frac{4U}{R}.$$

Как уже говорилось, одиночную сферу, достаточно удаленную от заземленных частей, представляют как сферический конденсатор с радиусом $R = \infty$. В этом случае расчетные формулы (40) и (43) примут вид:

$$C = 4\pi\epsilon'\epsilon_0 r_1 [\phi],$$

$$E_{max} = \frac{U}{r_1} [\text{кВ/см}].$$

Задания:

Задание №1

Для измерения напряжения 110 кВ применена схема емкостного делителя, состоящая из двух последовательно соединенных конденсаторов C_1 и электростатического вольтметра на напряжение 10 кВ, шунтированного конденсатором емкостью $C_2 = 100$ пф. Определить емкость каждого из конденсаторов C_1 если емкость вольтметра $C_v = 20$ пф

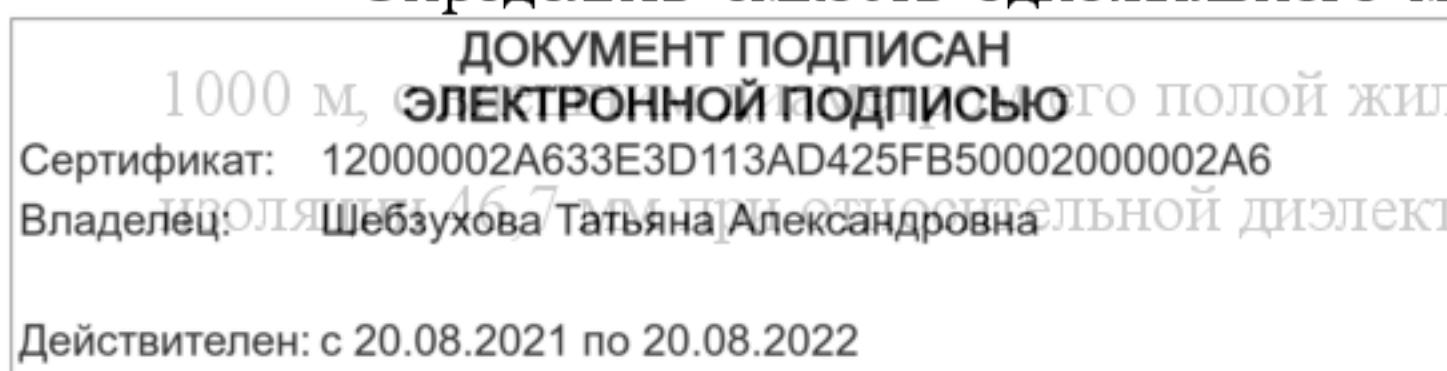
Задание №2

Плоский конденсатор с воздушной изоляцией и дисковыми электродами с закругленными краями имеет расстояние между электродами 2 см. Определить напряженность электрического поля в изоляции, если приложенное напряжение равно 40 кВ. Расчет повторить для случая, когда между электродами том же расстоянии введена стеклянная пластинка толщиной 1 см с относительной диэлектрической проницаемостью, равной 6.

Одиночная сфера с радиусом r_x см расположена в воздушной среде. Выразить емкость одиночной сферы в пикофарадах.

Задание №3

Определить емкость одножильного маслонаполненного кабеля на 110 кВ, длиной



1000 м, с радиусом внутреннего полой жилы 22,7 мм и наружным диаметром бумажной изоляции 46,7 мм при относительной диэлектрической проницаемости 3,5.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Задание №4

Плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами $a = 0,5$ см заряжен до напряжения $U_0 = 10$ кВ. Определить изменение напряжения между электродами, если развести пластины на $a_1 = 5$ см, предположив, что заряд при этом не изменит своей величины.

Проходной цилиндрический изолятор имеет сечение токоведущего стержня 4 см^2 . Изоляция — текстолит ($E_{\text{пр}} = 80$ КВ/см). Напряжение между стержнем и фланцем 140 кВ. Коэффициент запаса прочности $K=1,4$. 3

1. Определить внутренний радиус крепящего фланца.
2. Произвести расчет радиусов стержня и фланца, исходя из минимальной толщины слоя изоляции, при сохранении прочих заданных условий.

Задание №5

Определить напряжение на выводах трехслойного плоского конденсатора, если напряженности электрического поля в его слоях 20 кВ/см; 10 кВ/см; 5 кВ/см при толщинах слоев, соответственно равных 2 , 4 и 6 мм.

Задача № 6

Определить напряженности электрического поля в слоях плоского трехслойного конденсатора, заряженного до напряжения 10 кВ, если емкости его слоев соответственно равны 6 ; 3 ; $1,5$ мкФ при толщинах слоев $1,2$ и 4 мм

Задание №7

Одножильный кабель имеет радиус свинцовой защитной оболочки, равный 10 см, радиус токоведущей жилы — 1 см. Определить потенциалы в толще его изоляции для точек с радиусами 1 , 2 , 4 , 6 и 10 см, если напряжение, приложенное между жилой и оболочкой, равно 100 кВ, а защитная оболочка заземлена.

Задание №8

При конструировании кабеля задан радиус его токоведущей жилы 5 мм. Определить радиус его наружной защитной оболочки и запас прочности для изоляции, если напряжение, приложенное к кабелю, -30 кВ, а пробивная прочность материала 30 кВ/мм.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Задание №9

Одиноклая сфера радиусом 10 см опущена в бак с трансформаторным маслом, имеющим относительную диэлектрическую проницаемость 2,5 и заряжена в таком состоянии до 30 кВ. Определить напряженность электрического поля у поверхности сферы и ее потенциал при извлечении ее из масла.

Задание №10

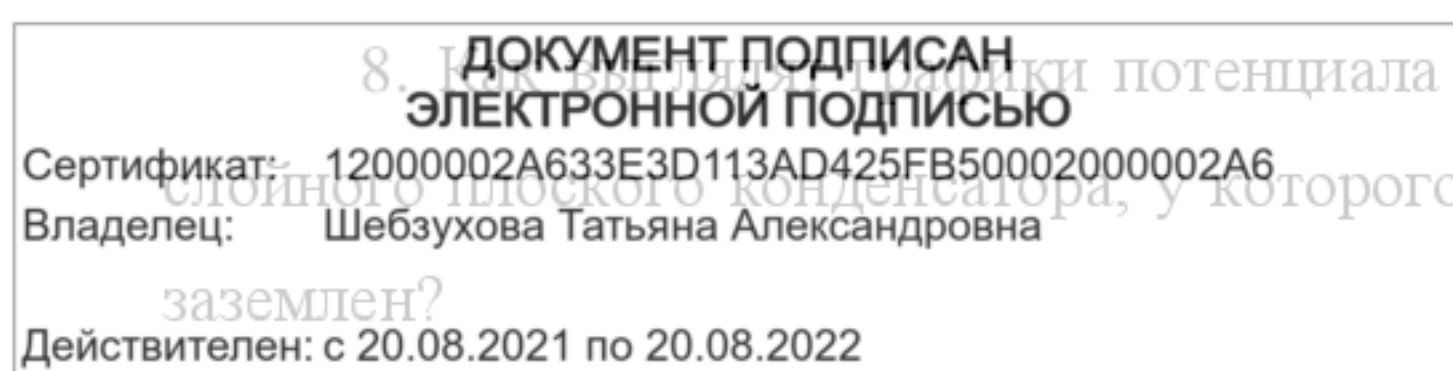
Построить по точкам с радиусами 3, 6, 12, 20 и 30 см потенциальную и градиентную характеристики в поле сферического конденсатора, заряженного до напряжения 20 кВ, если радиус внешнего электрода 30 см, внутреннего 3 см.

Задание №11

К обкладкам сферического конденсатора приложено напряжение 100 кВ. Определить радиусы внешнего и внутреннего электродов при условии наименьшей толщины изоляции между сферами и наименьшей величиной, равной 20 кВ/см у поверхности внутреннего электрода.

Контрольные вопросы:

1. От каких геометрических параметров и как зависит емкость плоского конденсатора?
2. В чем опасность воздушных включений между слоями многослойного конденсатора?
3. Какими параметрами следует задаться при расчете емкости плоского конденсатора?
4. Почему средняя пробивная напряженность электрического поля воздуха уменьшается при увеличении расстояния между электродами?
5. Как устраняется влияние краевого эффекта у плоских и цилиндрических электродов?
6. Как изменяется емкость плоского конденсатора при постепенном заполнении трансформаторным маслом воздушного промежутка между электродами?
7. Как регулировать напряженность электрического поля в слоях многослойного плоского конденсатора?



и напряженности электрического поля трех-
средний слой пробит, а один из электродов

9. Опишите устройство цилиндрического конденсаторного ввода.
10. Какое соотношение соблюдается между напряженностями электрического поля на границе раздела двух смежных слоев?
11. По какому математическому закону изменяется напряженность электрического поля в однородном слое цилиндрического конденсатора?
12. Как располагают материалы с различными величинами диэлектрической проницаемости при выравнивании значения максимальной напряженности электрического поля в слоях цилиндрического конденсатора?
13. Как располагают материалы с различными величинами диэлектрической проницаемости при выравнивании значения максимальной напряженности электрического поля в слоях цилиндрического конденсатора?
14. Как изменяется емкость цилиндрического воздушного конденсатора при возникновении короны у центрального электрода?
15. Почему при расчете изоляции цилиндрического конденсатора по условиям ее оптимального использования иногда приходится центральный электрод изготавливать полым?
16. При каких соотношениях между радиусами цилиндрических электродов максимальная напряженность электрического поля минимальна?
17. Как определяется емкость одиночной сферы?

Практическая работа №3. Частные методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей.

Цель: Изучить методы расчетов емкости и напряженности сложных электрических полей.

Основы теории:

Пусть два цилиндра с равными и разноименными зарядами расположены параллельно друг другу на расстоянии, по сравнению с которым их радиусы пренебрежительно малы (например, два провода линии электропередачи). Так как радиусы малы, можно считать, что заряды сосредоточены не на поверхности, а вдоль геометрических или так называемых электрических осей проводов.

Рассмотрим электрическое поле в контрольной точке 1 рис. 10, расположенной на расстояниях a и b от соответствующих осей A и B .

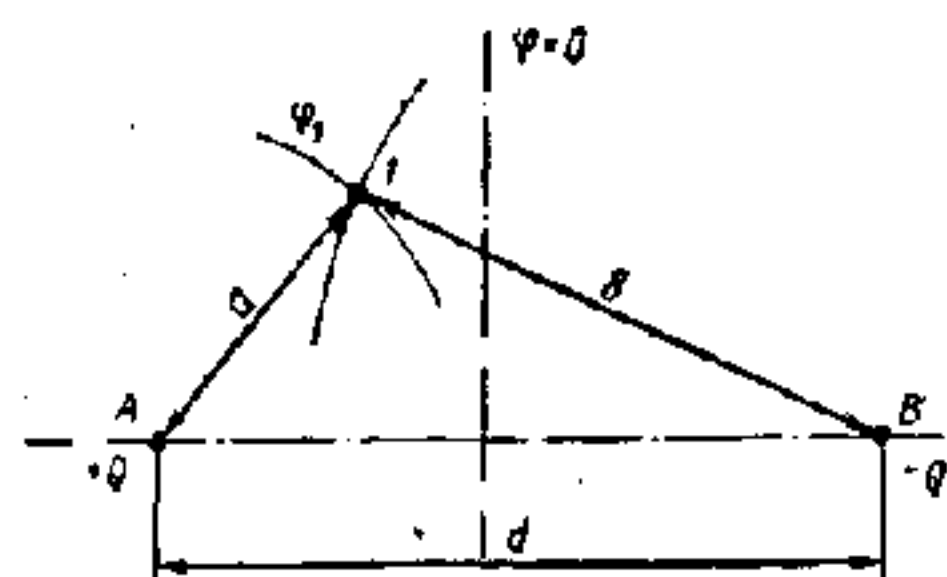


Рис. 10. Схема расположения электрических осей

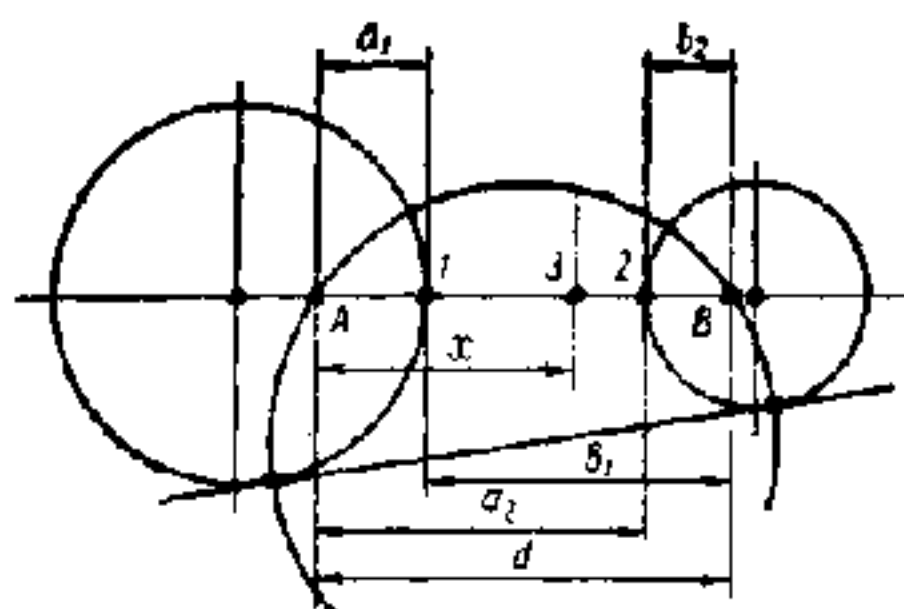


Рисунок 3.1 – Графическое определение положения электрических осей двух заряженных цилиндров

Применив к электрическому полю точки 1 положение 1 для расчета сложных систем, получим

$$\varphi_1 = \varphi_1' + \varphi_1'',$$

где φ_1' – потенциал условной цилиндрической поверхности в точке 1 от действия

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022