

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Омский государственный технический университет»

На правах рукописи



ПОЛЯКОВ ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ

**МОНИТОРИНГ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ИЗОЛЯЦИИ  
КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ 6 (10) КВ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА**

Специальность 05.14.02 –  
«Электрические станции и электроэнергетические системы»

Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель –  
доктор технических наук,  
доцент К. И. Никитин

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1    Состояние вопроса и постановка цели исследования .....	11
1.1    Основные методы диагностики и контроля состояния изоляции кабельных линий 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена.....	11
1.2    Испытания изоляции повышенным напряжением .....	12
1.3    Измерение частичных разрядов .....	15
1.3.1    Регистрация частичных разрядов .....	17
1.3.2    Способы фильтрации помех .....	21
1.3.3    Источники частичных разрядов .....	22
1.3.4    Оборудование для регистрации и анализа характеристик частичных разрядов в кабельных линиях 6-10 кВ .....	24
1.4    Измерение тангенса угла диэлектрических потерь.....	28
1.5    Оценка состояния изоляции по процессам поляризации/деполяризации .....	30
1.6Тепловизионная, ультрафиолетовая и рентген-диагностика состояния изоляции .....	32
1.7    Рефлектометрия .....	36
1.8    Выводы.....	37
2    Определение остаточного ресурса изоляции кабелей 6-10 кВ .....	39
2.1    Анализ воздействий, оказываемых внешними и внутренними факторами на изоляцию кабелей 6-10 кВ в процессе эксплуатации .....	39
2.2    Анализ известных результатов исследования процессов старения изоляции .....	42
2.3    Определение критерия возникновения пробоя изоляции кабеля ..	51
2.4    Разработка математической модели определения остаточного ресурса изоляции кабелей .....	60
2.5    Моделирование расчета остаточного срока службы изоляции кабелей в известном режиме эксплуатации .....	66
2.6    Выводы.....	72
3    Экспериментальные исследования процессов старения изоляции кабелей 6-10 кВ .....	73
3.1    Описание измерений частичных разрядов для оценки состояния изоляции кабелей.....	73
3.2    Экспериментальная установка для искусственного состаривания изоляции кабелей.....	86

3.3	Исследование характеристик частичных разрядов в изоляции кабеля в процессе ее старения .....	92
3.4	Анализ данных, полученных в ходе экспериментальных исследований .....	106
3.5	Выводы по главе .....	109
4	Программно-аппаратный комплекс для мониторинга остаточного ресурса изоляции кабелей 6 (10) кВ .....	110
4.1	Адаптация разработанной модели старения изоляции для использования в устройстве и формирование требований к нему .....	110
4.2	Устройство мониторинга остаточного ресурса кабельной линии	111
4.3	Оценка погрешности расчета остаточного ресурса изоляции кабелей .....	121
4.4	Выводы по главе .....	127
	<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>128</b>
	Библиографический список .....	130
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А .....</b>	<b>141</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б .....</b>	<b>142</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В .....</b>	<b>143</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Г .....</b>	<b>144</b>
	<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Д .....</b>	<b>148</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность работы.** Электроэнергетика представляет собой сложную постоянно развивающуюся систему, включающую в себя множество источников и потребителей электрической энергии. Исключение внезапных коротких замыканий (КЗ) позволит значительно повысить статическую, динамическую и результирующую устойчивости электроэнергетических систем. К тому же исключение КЗ повысит длительность безотказной работы электроустановок, на которые этот ток мог воздействовать бы своими негативными факторами и за счет этого повысится надежность функционирования электроэнергетических систем. Поэтому повышение устойчивости и надежности систем передачи и распределения электрической энергии является одной из приоритетных задач развития электроэнергетики.

Анализ статистики коротких замыканий с 2010 года показал, что доля технологических нарушений, вызванных пробоем изоляции, в кабельных линиях 6-10 кВ составляет не менее 71 %. При этом, наиболее проблемными элементами кабельных линий являются изоляция кабелей и кабельные муфты. Вероятность пробоя изоляции зависит от степени ее износа и остаточного ресурса. В случае с кабельными муфтами вероятность их повреждения обусловлена качеством изготовления материалов муфты и качеством ее монтажа. В местах нахождения дефектов (газовых и твердотельных включений) как в изоляции, так и в кабельных муфтах образуются частичные разряды (ЧР), развитие которых приводит к пробою изоляции.

Следовательно, надежность систем электроснабжения напрямую зависит от состояния изоляции кабельных линий электропередачи (КЛЭП), которое контролируется на протяжении всего срока эксплуатации ЛЭП. Однако традиционные методы контроля состояния изоляции не позволяют полностью исключить возможность пробоя изоляции. В связи с этим, в настоящее время актуальным является исследование по разработке способов и устройств мониторинга состояния изоляции в режиме онлайн, которые могли бы

рассчитывать остаточный ресурс изоляции КЛЭП в процессе эксплуатации для корректировки планово-профилактических мероприятий с целью своевременного ремонта кабельных линий. Этого можно достичь путем мониторинга факторов, оказывающих разрушающее воздействие на изоляцию линий электропередачи. Анализ данных о степени износа и остаточном ресурсе изоляции позволяет производить превентивные мероприятия по ремонту мест повреждения изоляции до ее пробоя, а также корректировать план профилактических ремонтных работ в зависимости от степени необходимости обслуживания изоляции. Работы многих отечественных и иностранных специалистов были посвящены решению задач расчета срока службы изоляционных материалов, повышения надежности электроснабжения, исследованию частичных разрядов в изоляции, разработке прогнозирующей защиты электрооборудования. В разное время эти вопросы рассматривались в трудах Г. С. Кучинского, П. М. Сви, В. П. Вдовико, Г. М. Михеева, Ф. Р. Исмагилова, Д. В. Максудова, И. Н. Кучерявой, М. М. Резинкиной, О. Л. Резинкина, М. И. Носенко, В. В. Базуткина, В. П. Ларионова, Ю. С. Пинталь, О. С. Гефле, Е. И. Черкашиной, М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, М. Я. Клецеля, Дж. Маззанти, С. Б. Далала, Р. С. Горура, М. Л. Дайера, С. Н. Журкова, Ж.-П. Крайна.

Кроме того, актуальность работы обусловлена требованиями ФЗ №187 от 26.07.2010 по обеспечению системной надежности электроснабжения потребителей, а также созданной рабочей группой подкомитета В1 СИГРЭ, целью работы которой является оценка срока службы изоляции кабелей.

**Цель диссертационной работы** – разработка способа и устройства для определения остаточного ресурса изоляции кабельных линий электропередачи 6 (10) кВ из сшитого полиэтилена (СПЭ).

Для достижения поставленной цели были поставлены и решены следующие **научные задачи**:

- 1) Разработка формулы расчета остаточного ресурса СПЭ-изоляции кабельных линий на основании мониторинга разрушающих изоляцию

воздействий, оказываемых внешними и внутренними деструктивными факторами.

- 2) Моделирование процессов старения изоляции в известных условиях эксплуатации кабельных линий.
- 3) Экспериментальные исследования по искусственному состариванию СПЭ-изоляции кабелей в условиях, приближенным к условиям эксплуатации, с контролем мощности частичных разрядов.
- 4) Моделирование электрического поля в изоляции кабеля в при наличии в ней дефекта и при его отсутствии для исследования процессов, следствием которых является пробой изоляции кабеля. Определение критерия критической степени износа изоляции.
- 5) Разработка программно-аппаратного комплекса устройств определения остаточного ресурса СПЭ-изоляции кабельных линий.

**Объект исследования** – изоляция кабельных линий электропередачи 6 (10) кВ из сшитого полиэтилена, применяемых для общих задач электроснабжения.

**Предмет исследования** – мониторинг состояния изоляции и ее остаточного ресурса на протяжении срока эксплуатации кабеля.

#### **Научная новизна:**

- 1) Определен критерий критической степени износа изоляции, соответствующий 79% разрушения материала.
- 2) Уточнена формула срока службы изоляции, предложенная Кучинским Г. С., произведено ее преобразование для определения остаточного ресурса изоляции.
- 3) Разработан резистивный датчик тока и напряжения с возможностью регистрации напряжения на кабеле, тока в его жиле и экране, а также частичных разрядов с кажущимся зарядом менее 1 пКл.
- 4) Разработан аппаратно-программный комплекс устройств и его программное обеспечение для вычисления остаточного ресурса СПЭ-изоляции кабеля.

**Практическая ценность работы:**

- 1) Результаты анализа различных методов диагностики и контроля состояния изоляции кабелей, показывающие основные достоинства и недостатки существующих методов и позволяющие как определиться с оптимальным способом контроля состояния изоляции, так и предложить новые методы контроля состояния изоляции.
- 2) Уточнение математической модели старения изоляции кабелей из сшитого полиэтилена, предложенной Кучинским Г. С., на основе данных о температуре изоляции и напряжении на кабеле в течение всего срока его эксплуатации.
- 3) Проведенное моделирование электрического поля в изоляции кабеля с дефектом, позволяющее определить критическую степень износа изоляции, которая, наиболее вероятно, приведет к пробою.
- 4) Полученные результаты экспериментальных исследований процесса старения изоляции, анализ которых позволяет говорить о степени достоверности полученной математической модели и произвести ее корректировку для более точного определения прогнозируемого срока службы изоляции.
- 5) Разработанный тестовый образец аппаратно-программного комплекса устройств определения остаточного ресурса изоляции кабелей, внедрение которого в опытную эксплуатацию позволит набрать существенный массив данных об измеряемых величинах, что позволит уточнить определение срока службы изоляции.

**Методы исследования** определялись поставленными задачами и основывались на математических моделях старения изоляции, известных и разработанных к настоящему моменту. Моделирование процессов, происходящих в изоляции в процессе ее старения, производилось в программных пакетах Matlab, Elcut, Delphi с учетом основных положений теории цепей с сосредоточенными параметрами, теории электромагнитного поля. Экспериментальные исследования

проводились на поверенном оборудовании. Обработка и анализ результатов производился в лицензионных программных пакетах Matlab и Microsoft Excel.

**Основные положения диссертации, выносимые на защиту:**

- 1) Критерий критической степени износа изоляции кабелей из сшитого полиэтилена, соответствующий разрушению материала на 79%.
- 2) Уточненная формула срока службы изоляции в зависимости от температуры и напряженности электрического поля и ее преобразование для расчета остаточного ресурса.
- 3) Датчик тока и напряжения с возможностью регистрации напряжения, токов в жиле и экране и частичных разрядов с кажущимся зарядом менее 1 пКл.
- 4) Аппаратно-программный комплекс устройств и его программное обеспечение для вычисления остаточного ресурса сшитой полиэтиленовой изоляции кабеля.

**Достоверность научных положений и результатов** определяется корректностью принятых допущений, сходимостью результатов, полученных аналитическими методами расчета, с данными математического моделирования, результатами исследований других авторов, опубликованными в литературных источниках и многочисленными экспериментальными исследованиями процессов старения изоляции кабеля, продолжающимися в общей сложности 2528 часов.

**Апробация работы.** Основные результаты диссертационной работы докладывались и были одобрены на международных научно-технических конференциях «Россия молодая – передовые технологии в промышленность!» (Омск, 2013, 2015, 2017), «Электроэнергетика глазами молодежи» (Новочеркасск – 2013, Иваново – 2015, Самара - 2017), «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (Сочи, 2015), «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2014, 2016), «IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015» (Омск, 2015), «От проектного инжиниринга к строительному» (Омск, 2015), «ИНЖЕНЕРНОЕ ДЕЛО: ВЗГЛЯД В БУДУЩЕЕ» (Омск, 2016), «Перспективы развития

фундаментальных наук», (Томск, 2016), «Актуальные вопросы энергетики» (Омск, 2017), «Релейная защита и автоматика энергосистем 2017» (Санкт-Петербург), на научных семинарах кафедр ОмГТУ.

**Личный вклад соискателя** состоит в постановке цели и задач исследования, разработке математической модели определения остаточного ресурса изоляции, моделировании электрического поля изоляции кабеля с дефектом и без него, разработке и сборке экспериментальной установки для искусственного состаривания изоляции кабелей под воздействием теплового и электрического полей, экспериментальных исследованиях процессов старения изоляции, разработке устройства определения остаточного ресурса изоляции кабелей на базе защищенного патентом датчика тока и напряжения.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы».** Полученные соискателем основные результаты исследований соответствуют пункту 4 «Разработка методов оценки надежности электрооборудования, структурных схем и схем распределительных устройств электростанций», пункту 5 «Разработка методов диагностики электрооборудования электроустановок» и пункту 11 «Разработка методов анализа структурной и функциональной надежности электроэнергетических систем и систем электроснабжения»

**Диссертационные исследования выполнены при финансовой поддержке** Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) при выполнении научно-исследовательских работ по теме «Предотвращение перерывов передачи электроэнергии с помощью автоматического прогнозирования повреждений электроустановок» по гранту № 20-12-98028/14 от 02.06.2014.

**Публикации.** Результаты исследований опубликованы в 25 печатных работах, из них 4 статьи в изданиях перечня ВАК, 2 статьи в англоязычных журналах и сборниках, индексируемых в базе данных Scopus, а также получен патент на изобретение и 3 свидетельства о регистрации электронных ресурсов, 15

статьей и тезисов докладов в сборниках Международных и Всероссийских конференций.

**Структура и объем работы.** Работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка и приложений.

В главе 1 описывается обзор известных методов и приборов для диагностики и контроля состояния изоляции кабелей на класс напряжения 6 (10) кВ. Также проведен их сравнительный анализ.

В главе 2 приведены результаты уточнения математической модели определения остаточного ресурса изоляции, основанной на модели старения изоляции, предложенной Г. С. Кучинским и статистическом расчете зависимости вероятности пробоя изоляции от степени разрушения материала. Предложены параметры математической модели, необходимые для начала экспериментальных исследований.

В главе 3 исследованы характеристики частичных разрядов в изоляции кабелей в процессе старения диэлектрика, обеспечиваемого внешним воздействием теплового поля и воздействием электрического поля в изоляции кабеля в специально разработанной экспериментальной установке для искусственного термоэлектрического состаривания кабелей. Характеристики частичных разрядов определялись путем расчета на основе зарегистрированных электрических сигналов частичных разрядов в сбалансированной мостовой схеме их регистрации.

В главе 4 описывается разработанный аппаратно-программный комплекс устройств для определения остаточного ресурса изоляции кабелей из сшитого полиэтилена, а также адаптация математической модели для использования в программном обеспечении устройства. Кроме того, в этой главе проведена оценка погрешности расчета прогнозируемого срока службы изоляции, составляющая около 14%.

Библиографический список содержит 103 источника. Общий объем диссертации составляет 148 страниц, из них основной текст – 129 страниц, список литературы – 11 страниц, приложения – 8 страниц.

## 1 Состояние вопроса и постановка цели исследования

### 1.1 Основные методы диагностики и контроля состояния изоляции кабельных линий 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена

Для обеспечения надежности работы силовых кабелей необходимо производить их проверку перед введением в эксплуатацию. Проверке могут подвергаться токоведущие жилы кабеля (для обеспечения соединения источника электрической энергии с потребителем) и их изоляция (для избежания коротких замыканий). При вводе кабельных линий 6-10 кВ со сшитой полиэтиленовой изоляцией в эксплуатацию могут проводиться следующие испытания [1]:

- 1) Проверка целостности и фазировки жил кабеля.
- 2) Измерение сопротивления изоляции. Величина сопротивления не нормируется, измерение сопротивления производится до и после испытания повышенным напряжением.
- 3) Испытание номинальным или повышенным напряжением выпрямленного тока (в некоторых случаях проводится испытание напряжением промышленной или сверхнизкой частоты (0,01-0,1 Гц)).
- 4) Измерение распределения тока по одножильным кабелям. Неравномерность в распределении токов на кабелях не должна быть более 10%.
- 5) Контроль состояния антикоррозийного покрытия, при наличии.
- 6) Измерение сопротивления заземления.

Изоляционные материалы в большей степени подвержены разрушению под воздействием внешних и внутренних факторов, поэтому наибольшее внимание следует уделить испытаниям изоляции. Нормируемая проверка повышенным напряжением является разрушающей для изоляции, так как, кроме прожига имеющихся изъянов (образовавшихся в процессе производства или как следствие некачественного монтажа), ускоряется процесс деструкции изоляционного материала, что ведет к образованию новых дефектов в изоляции и сокращению

срока ее службы. Кроме того, при использовании постоянного напряжения для испытания кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, в них может накапливаться объемный заряд, наличие которого может привести к быстрому выходу кабеля из строя. В связи с этим в настоящее время существует тенденция по внедрению неразрушающих методов контроля и диагностики изоляции, которыми являются [2,3]:

- 1) Измерение частичных разрядов в изоляции [4–6];
- 2) Измерение тангенса угла диэлектрических потерь [7,8];
- 3) Измерение напряжения/тока процессов поляризации/деполяризации диэлектрика [9,10];
- 4) Тепловизионная, оптическая, ультразвуковая дефектоскопия [11,12];
- 5) Метод рефлектометрии [13].

Стоит отметить, что при использовании диагностики изоляции на предмет частичных разрядов, измерении тангенса угла диэлектрических потерь существует возможность проводить онлайн мониторинг состояния изоляции под нагрузкой в режиме эксплуатации.

## **1.2 Испытания изоляции повышенным напряжением**

Испытание изоляции повышенным напряжением является обязательным, согласно [1], как для нового оборудования перед вводом в эксплуатацию, так и периодически на протяжении всего процесса эксплуатации. Форма испытательного напряжения может быть различной [14]: постоянное, переменное синусоидальное, импульсное. При этом чаще остальных используют постоянное напряжение и синусоидальное промышленной частоты.

При испытании изоляции кабелей постоянным напряжением дополнительно контролируется ток утечки через изоляцию. При этом кабель считается прошедшим испытание в случае, если не произошло пробоя, и если ток утечки не увеличился. Недостатком этого метода является разница физических процессов, протекающих в изоляции в процессе испытаний и в процессе эксплуатации.

При испытании изоляции повышенным синусоидальным напряжением промышленной частоты испытательное напряжение выдерживается на кабеле в течение 1 минуты, а изоляция признается годной к эксплуатации в случае, если за это время не наблюдалось пробоя или частичного повреждения изоляции. В некоторых случаях для испытания повышенным синусоидальным напряжением используют частоту 100 Гц, 250 Гц или напряжение СНЧ с частотой от 0,01 до 0,1 Гц.

Одной из наиболее распространенных установок для испытания кабелей повышенным напряжением является АИД-70/50 (рисунок 1.1). Данный аппарат может генерировать постоянное напряжение до 70 кВ и переменное синусоидальное промышленной частоты до 50 кВ соответственно.



Рисунок 1.1 – Аппарат испытательный диодный АИД-70/50.

Кроме того, изоляция подвергается испытанию грозовыми импульсами. Амплитуда импульсов определяется в зависимости от характеристик грозозащитного оборудования. Передний фронт импульса составляет 1,2 мкс, длительность импульса до полуспада – 50 мкс. При возникновении грозового импульса срабатывает защитный разрядник, срезающий импульс через 2-3 мкс после начала импульса. Таким образом, при испытании изоляции подается по три импульса положительной и отрицательной полярности, сначала полные, затем срезанные. Изоляция считается прошедшей испытания, если не была пробита или повреждена. Для генерации грозовых импульсов используются генераторы импульсного напряжения (ГИН) (рисунок 1.2).



Рисунок 1.2 – Генератор грозового импульсного напряжения.

### 1.3 Измерение частичных разрядов

**Частичным разрядом (ЧР)** называется электрический разряд малой мощности, который шунтирует лишь часть изоляции, и не вызывает значительного изменения напряжения между электродами [15].

Как правило, частичные разряды возникают в изоляции в местах нахождения внутренних дефектов (пузырьков газов, различных микрочастиц твердых примесей) по той причине, что в этих местах возникает неоднородность электрического поля, напряженность которого внутри дефекта может быть намного выше, чем в изоляционном материале. Как правило, электрическая прочность примесей существенно меньше электрической прочности изоляции, поэтому в месте дефекта возникает локальный электрический пробой.

Оценку состояния изоляции производят по одной или нескольким характеристикам частичных разрядов, которыми являются [6]:

- 1) ***Кажущийся заряд*** – абсолютное значение такого заряда, при мгновенном ведении которого на электроды испытуемого объекта напряжение между ними кратковременно изменится так же, как изменилось бы при частичном разряде;
- 2) ***Временной интервал одного цикла измерения*** или число периодов воздействующего напряжения – промежуток времени непрерывного измерения ЧР, выраженный в секундах или в числе периодов воздействующего напряжения.
- 3) ***Регулярность возникновения*** – отношение числа периодов воздействующего напряжения, в которых зарегистрированы частичные разряды с кажущимся зарядом больше заданной величины к общему числу периодов воздействующего напряжения за определенный интервал времени;
- 4) ***Момент времени появления импульса*** или фазовый угол появления импульса – значение интервала времени от нуля предшествующей положительной полуволны до момента образования импульса ЧР в периоде воздействующего на

изоляцию переменного напряжения, или угол между нулем предшествующей положительной полуволны и импульсом ЧР.

- 5) ***Частота повторения импульсов*** – отношение между общим числом импульсов частичных разрядов, зарегистрированных в определенном временном интервале, и продолжительностью этого интервала;
- 6) ***Частота следования импульсов*** ( $N$ ) – число импульсов ЧР за секунду (в случае равноотстоящих импульсов).
- 7) ***Средний ток*** – сумма абсолютных значений кажущихся зарядов  $q$  ЧР от минимального значения регистрируемого заряда до максимального за интервал времени, деленная на этот интервал;
- 8) ***Мощность*** – сумма произведений значений кажущихся зарядов частичных разрядов за определенный период времени на мгновенные значения воздействующего на изоляцию напряжения в момент образования соответствующих частичных разрядов;
- 9) ***Квадратичный параметр*** – сумма квадратов абсолютных значений кажущихся зарядов  $q$  ЧР от минимального значения заряда до максимального за интервал времени, деленная на значение интервала времени;
- 10) ***Распределение количества импульсов  $N$  по значениям их кажущихся зарядов  $q$***  – зависимость количества ЧР от кажущегося заряда в диапазоне измерения от минимального до максимального, зарегистрированных за интервал времени.
- 11) ***Распределение значений кажущихся зарядов по фазе воздействующего напряжения*** – зависимость значений кажущихся зарядов частичных разрядов от соответствующих фазовых углов их появления в периоде воздействующего напряжения;
- 12) ***Распределение числа импульсов по их кажущимся зарядам  $q$  и фазе воздействующего напряжения*** – зависимость количества импульсов ЧР от значений их кажущихся зарядов и от соответствующих фазовых углов их появления в периоде воздействующего напряжения.

13) *Наибольшее неоднократно встречающееся значение кажущегося заряда* – наибольшая величина, которую имеет импульс, неоднократно зарегистрированный системой измерения за один интервал времени;

14) *Напряжение возникновения частичных разрядов* – приложенное напряжение, при котором в испытуемом объекте впервые отмечаются повторяющиеся ЧР при постепенном увеличении напряжения с более низкого значения, при котором ЧР не наблюдаются;

15) *Напряжение погасания частичных разрядов* – приложенное напряжение, при котором в испытуемом объекте погасают (прекращаются) повторяющиеся ЧР при постепенном уменьшении напряжения с более высокого значения, при котором наблюдаются значения импульса ЧР.

Для определения характеристик частичных разрядов, требуется решить следующие задачи:

- Зарегистрировать электрический сигнал, содержащий частичные разряды;
- Произвести фильтрацию сигнала аппаратными и программными методами;
- Обработать полученный сигнал для определения нужных характеристик.

### 1.3.1 Регистрация частичных разрядов

Зарегистрировать частичные разряды можно по воздействиям, которые они оказывают на электрические цепи и окружающую среду. Исходя из этого, известны следующие методы регистрации ЧР [6]:

- *Электрический* метод является наиболее точным, так как напрямую анализирует электрические сигналы ЧР;
- *Электромагнитный* (регистрация ЧР по их электромагнитному полю) метод также является достаточно точным, однако его не всегда

можно использовать для диагностики оборудования на наличие источника частичных разрядов, так как датчики, основанные на этом методе, могут обнаружить источник ЧР на относительно небольшом расстоянии. Однако при диагностике линий электропередачи этот метод может использоваться для поиска места образования дефекта;

- **Акустический** метод позволяет зарегистрировать звуковой сигнал, исходящий от источника ЧР, этот метод обычно применяется аналогично электромагнитному;
- **Химический** метод основывается на анализе химических соединений, выделяющихся при ЧР, например, в трансформаторном масле. Учитывая особенности этого метода, он не подходит для регистрации и поиска источников частичных разрядов в кабельных линиях электропередачи;
- **Оптический** метод позволяет зарегистрировать ультрафиолетовое излучение от источника ЧР, как правило, используется в системах со стеклянной изоляцией для поиска поврежденных элементов и не применяется для поиска источников ЧР в кабельных линиях электропередачи;
- **Термический** метод основывается на нагреве изоляции в области образования дефекта, обычно используется для поиска места источника ЧР в том числе и в кабельных ЛЭП.

Для контроля состояния изоляции кабельных линий электропередачи 6-10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена целесообразно применять электрический метод регистрации ЧР для их выявления и анализа в совокупности с одним из методов, позволяющих найти источник частичных разрядов.

Известно три основных схемы регистрации частичных разрядов электрическим методом в лабораторных условиях (рисунок 1.3) [6].

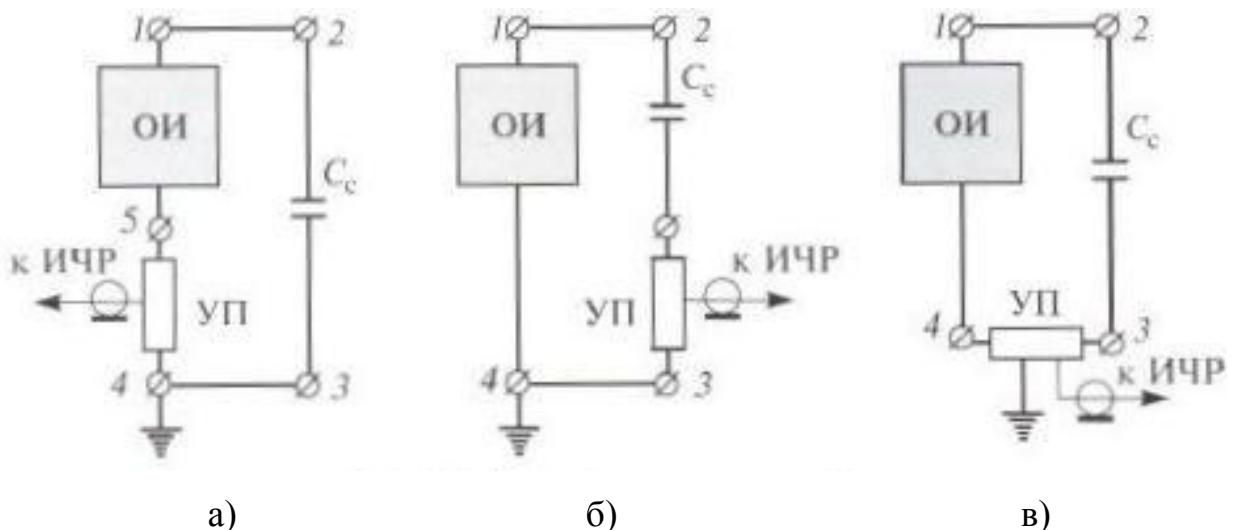


Рисунок 1.3 – Основные схемы регистрации частичных разрядов [6] с включением устройства присоединения: а) в цепь заземления объекта измерения; б) в цепь заземления соединительного конденсатора; в) мостовая схема регистрации частичных разрядов.

Все три схемы позволяют производить регистрацию сигналов, содержащих частичные разряды, однако предпочтительной является мостовая схема регистрации ЧР ввиду достаточно простого аппаратного метода фильтрации помех. Например, в [16] описывается мостовая схема регистрации ЧР, в которой при включении устройства измерения в диагональ моста и правильной настройке параметров схемы сигналы частичных разрядов регистрируются, а сигналы внешних помех компенсируют друг друга.

Кроме того, существует обширный выбор датчиков, регистрирующих частичные разряды, выпускаемых промышленностью с возможностью их использования для мониторинга характеристик частичных разрядов (рисунок 1.4):

- Резистивные датчики [17];
- Высокочастотные трансформаторы тока с ферритовым сердечником, включающиеся в цепь измерения токов утечки на землю [17,18];
- Акустические датчики [19–23];
- Электромагнитные датчики [19,24];
- Присоединительные конденсаторы [25,26];



Рисунок 1.4 – Датчики для регистрации частичных разрядов: а) трансформатор тока с ферритовым сердечником; б) присоединительный конденсатор; в) акустический датчик; г) электромагнитная антенна, улавливающая ЧР в диапазоне частот от 400 до 900 МГц.

### 1.3.2 Способы фильтрации помех

Современные устройства измерения характеристик частичных разрядов дают хорошие результаты при регистрации сигналов, содержащих ЧР. Однако здесь возникает проблема распознавания сигналов ЧР на фоне широкого спектра возможных помех, которые могут появляться в энергосистеме как следствие работы некоторых потребителей (выпрямителей, блоков управления частотой вращения двигателей, газоразрядных и люминесцентных ламп и др.), наличия постоянно возникающих переходных процессов (при включении-отключении потребителей в сеть) или наводиться извне (электромагнитные поля электропотребителей, сотовых сетей и пр.). В этом случае есть два способа отстройки от помех: аппаратный и программный.

Аппаратным способом фильтрации помех является использование, например, полосовых фильтров, исключающих сигналы из диапазона частот, нехарактерного для спектра частичных разрядов.

Программными способами фильтрации помех являются:

- Вейвлет-преобразования [21,22,27–30];
- Использование нейронных сетей [28,31,32];
- Системы распознавания образов [33–35];
- Фрактальный анализ [22];

Также одной из разрабатываемых в настоящее время проблем является определения места расположения источника частичных разрядов, для этих целей обычно используют следующие методы:

- Использование электромагнитных датчиков;
- Использование акустических датчиков;
- Анализ коэффициентов корреляции [36];
- Использование вейвлет-преобразований в совокупности с нейронной сетью [28];
- Методы математической морфологии [29,37];

- Анализ мощности спектрального состава электрического сигнала [38]
- Анализ энергетических диаграмм для определения типа источника ЧР [39].

Кроме того, дополнительные сложности при определении характеристик частичных разрядов создает возможность возникновения сразу нескольких источников ЧР в одном контролируемом элементе. Для определения количества источников ЧР и их типа могут применяться следующие методы:

- Использование акустических датчиков [40];
- Использование теории нечетких множеств [41];
- Использование нейронных сетей [32].

Кроме того, актуальным остается вопрос регистрации характеристик частичных разрядов в экранированных силовых кабелях [42], в низковольтных кабелях [43], при наличии постоянной составляющей в сигнале переменного напряжения [44].

Анализ динамики изменения характеристик частичных разрядов во времени используется для оценки состояния изоляции и ее остаточного ресурса. Так в [45] предложена методика определения предпробивного состояния изоляции в зависимости от изменения мощности частичных разрядов, отмечается, что при увеличении размеров дефекта мощность ЧР возрастает, затем следует небольшой ее спад, после чего происходит критическое увеличение мощности ЧР, приводящее к пробою изоляции.

### **1.3.3 Источники частичных разрядов**

Источниками ЧР высокой интенсивности обычно являются дендриты – древовидные каналы неполного пробоя [46], развивающиеся из неоднородностей, образующихся в изоляции при изготовлении (пузырьки газов диаметром 1-30 мкм, образующиеся при вулканизации полиэтилена [47], твердотельные

примеси) и в процессе эксплуатации как следствие деструкции и/или деполимеризации материала по причинам естественного старения изоляции. Кроме того, источниками ЧР могут быть места некачественного монтажа, например, кабельных муфт.

Внутри дефектов изоляции, образовавшихся как следствие недостатков технологии изготовления, в процессе эксплуатации под воздействием электрического поля возникают частичные разряды, вызывая рост дендритов. Для заполненных газами дефектов существенным является тот факт, что для возникновения частичных разрядов в газовых включениях требуется меньшая напряженность электрического поля, так как диэлектрическая проницаемость газов меньше, чем проницаемость жидкостей и твердых примесей [48]. Как следствие интенсивность частичных разрядов может быть существенно выше на начальных стадиях развития дефекта.

Микропоры в изоляции могут быть заполнены водой, имеющейся в изоляции в виде раствора (известно, что в любом материале имеется хотя бы небольшое количество воды) или проникающей в изоляцию из окружающей среды. Наличие воды в изоляции может привести к образованию дендритов, каналы которых будут заполнены водой. В этом случае имеет место явление, называемое водным триингом [47]. Несмотря на более высокую диэлектрическую проницаемость воды, это явление в некоторых случаях может быть даже более опасным, чем в случае заполнения каналов дендрита газами. При возникновении частичных разрядов в заполненных водой каналах дендрита возникают явления, называемые электрогидравлическим эффектом или эффектом Юткина [49].

Электрогидравлический эффект заключается в том, что при возникновении электрического разряда в жидкости имеют место мощные гидродинамические импульсы. Воздействие этих импульсов на стенки каналов водного триинга существенно ускоряет рост дендрита, что может значительно сократить время развития дефекта до полного пробоя изоляции.

Дополнительным негативным фактором наличия водного триинга в изоляции является тот факт, что при проведении испытаний изоляции

постоянным напряжением в водных промежутках может накапливаться объемный заряд, ускоряющий развитие дефектов в изоляции.

Исследование процессов роста дендритов и водных триингов в изоляции позволит повысить эффективность анализа сигналов частичных разрядов [50].

Считается, что по виду сигналов ЧР можно определить стадию роста дендрита. Соответствующее исследование описано в [51]: автор работы предлагает определять стадию роста дендрита путем анализа симметричности появления ЧР в положительной и отрицательной полуволнах и по сглаженности пика сигнала ЧР (на ранней стадии роста дендрита вершины сглажены и нет симметрии, на поздних стадиях, свидетельствующих о приближении пробоя, имеется симметрия, вершины заострены).

### **1.3.4      Оборудование для регистрации и анализа характеристик частичных разрядов в кабельных линиях 6-10 кВ**

В настоящее время существует достаточно обширный спектр выпускаемого оборудования для диагностики и контроля состояния изоляции электрооборудования на основе характеристик частичных разрядов. Производителями такого оборудования являются ООО «Димрус», «СамараПрибор», НПП «СТЭЛЛ», High Voltage Partial Discharge Ltd (HVPD) и др. Выпускаемое оборудование можно подразделить на системы периодического контроля, системы мониторинга и системы поиска источника частичных разрядов.

К системам периодического контроля относятся устройства DKL-3, R2200, R400, OVM-1, PDS Insight, HVPD Kronos Portable Monitor (таблица 1.1, рисунок 1.5) и др. Эти системы имеют необходимый набор датчиков для проведения периодического контроля характеристик частичных разрядов. Некоторые из этих приборов (например, DKL-3) могут быть использованы для временного мониторинга состояния изоляции, например, при наличии известного проблемного участка линии или муфты. В этом случае прибор устанавливается на

определенное время для того, чтобы проследить динамику изменения характеристик ЧР и свести вероятность пробоя изоляции к возможному минимуму.

Для стационарного мониторинга характеристик частичных разрядов используют системы КМК-500, HVPD Kronos Permanent Monitor, HVPD Longshot Diagnostic OLPD Test Unit (таблица 1.2, рисунок 1.6) и др. Указанные системы устанавливаются стационарно для мониторинга состояния изоляции. Как правило, они оснащены программным обеспечением, позволяющим автоматически анализировать характеристики частичных разрядов и выдавать сигналы о возникновении источника ЧР персоналу предприятия для проведения мер по ремонту проблемного участка линии электропередачи или муфты с целью избежания пробоя изоляции. Кроме того, некоторые из систем мониторинга позволяют определять примерное месторасположение источника ЧР путем анализа электрических сигналов.

Таблица 1.1 – Сравнение параметров приборов для периодического контроля ЧР.

	DKL-3	R2200	R400	OVM-1	PDS Insight	HVPD Kronos Portable Monitor
Количество каналов измерения ЧР	–	9	2	1		24
Диапазон регистрируемых ЧР, МГц	0,5 – 20, 200 – 1000	0,5 – 10	1 – 15	0,01 – 20	5 – 60	0,1 – 50
Амплитуда регистрируемых высокочастотных импульсов, мВ	20 – 100000	–	До 10000	–	100 пКл – 100 нКл	–
Динамический диапазон входных	От -70 до -25	-70	-70	-80	-70	–

сигналов, dB						
Интерфейс связи с компьютером	USB	USB	USB	USB, Ethernet	USB	Ethernet
Диапазон рабочих температур прибора, °C	От -20 до +40	От -20 до +45	От -20 до +70	От -40 до +60	От -20 до +40	От -20 до +45



Рисунок 1.5 – Приборы периодического контроля характеристик частичных разрядов: а) PDS Insight; б) OVM-1.

Таблица 1.2 – Сравнение параметров приборов для стационарного мониторинга ЧР.

	KMK-500	HVPD Kronos Permanent Monitor	HVPD Longshot Diagnostic OLPD Test Unit
Количество каналов измерения ЧР	6 или 9	24	4
Диапазон регистрируемых ЧР, МГц	0,1 – 45 или 30 - 300	0,1 – 50	До 200
Интерфейс связи с компьютером	RS-485, Ethernet,	Ethernet	USB, Ethernet

	USB		
Диапазон рабочих температур прибора, °С	От -40 до +60	От -20 до +45	От +5 до +40

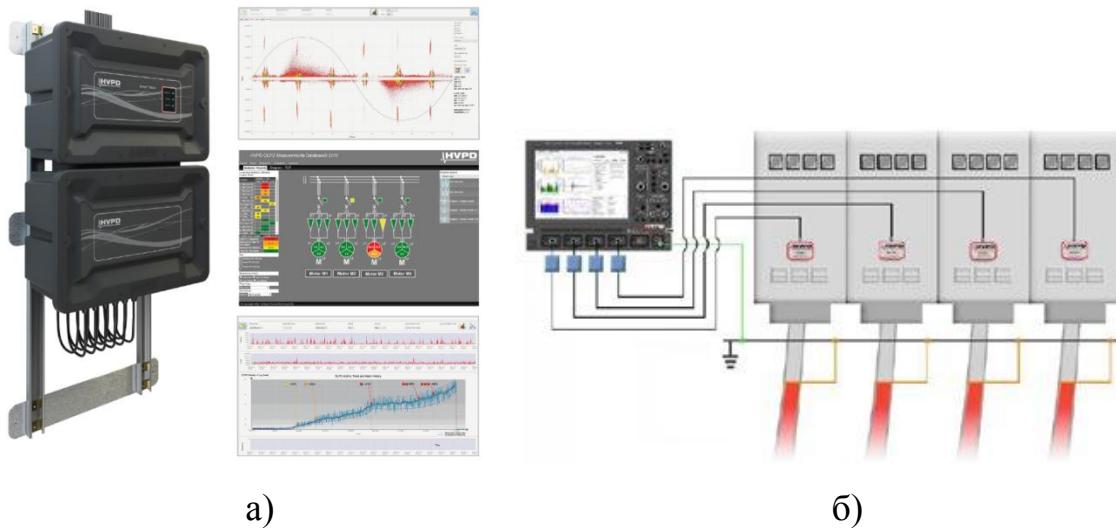


Рисунок 1.6 – Приборы мониторинга характеристик частичных разрядов:  
а) HVPD Kronos Permanent Monitor; б) HVPD Longshot Diagnostic OLPD Test Unit.

Для поиска источников частичных разрядов используются устройства CSM-1, AR-100, AR-200, AR-700, UltraTest, UHF-Recorder (таблица 1.3). Указанные приборы используются для поиска источника ЧР по их акустическим или электромагнитным сигналам.

Таблица 1.3 – Сравнение параметров приборов для поиска ЧР.

	CSM 1	AR-100	AR-200	AR-700	UltraTest	UHF-Recorder
Количество каналов измерения ЧР		1 акуст.	1 акуст.	4 акуст. и 1 электр.	1 – 3 акуст.	1
Диапазон регистрируемых ЧР, МГц	0,1 – 1000	0,03 – 0,3	0,03 – 0,3	0,03 – 0,3	0,02 – 0,1	100 – 900
Интерфейс связи	ZigBee, RS-485	USB	USB	USB,	USB	Радиоканал

				Ethernet		
Диапазон рабочих температур прибора, °C	От -40 до +60	От -40 до +50	От -40 до +50	От -40 до +50	От -20 до +40	От -20 до +40

#### 1.4 Измерение тангенса угла диэлектрических потерь

Диэлектрические потери – это рассеяние электрической энергии в диэлектрике при воздействии на него переменного напряжения, обусловленное процессами проводимости и поляризации, развивающейся с задержкой по времени.

Величина тангенса угла диэлектрических потерь ( $\operatorname{tg} \delta$ ), определяющая диэлектрические потери в изоляции на переменном напряжении, является одной из самых распространенных характеристик, значение которой используется для оценки качества и состояния электроизоляционного материала [52–54].

Дефектами в изоляции, как правило, являются газовые и твердотельные микровключения, электрическая прочность которых значительно меньше электрической прочности изоляционного материала. Следовательно, возникновение такого дефекта в изоляции уменьшает электрическую прочность всей изоляционной конструкции в целом. Следствием этого обычно является увеличение активной составляющей тока в изоляции, что можно зафиксировать по увеличению тангенса угла диэлектрических потерь.

При оценке состояния изоляции измерение величины  $\operatorname{tg} \delta$  имеет следующие преимущества, по сравнению с измерением абсолютных значений активной и реактивной составляющих токов или мощности потерь:

- 1) Величина  $\operatorname{tg} \delta$  не зависит от размеров объекта, но позволяет обнаружить возникающие в изоляции дефекты;
- 2) Величина  $\operatorname{tg} \delta$  может быть непосредственно измерена мостом переменного тока (например, мостом Шеринга (рисунок 1.7)) или другим устройством [7,8], МД-16, Р-507, Р-521, Р-595, Р-5026 (рисунок 1.8) и др.

Измерение тангенса угла диэлектрических потерь по настоящее время остается одним из наиболее распространенных диагностических инструментов для оценки состояния изоляции благодаря высокой степени проработки вопроса: величина  $\tan \delta$  нормируется почти для всех типов изоляции электроустановок. Так для сшитой полиэтиленовой изоляции значение тангенса угла диэлектрических потерь нормируется и составляет не более  $3 \cdot 10^{-4}$  (при частоте 1 МГц) или  $4 \cdot 10^{-4}$  (при частоте 500 МГц) [55].

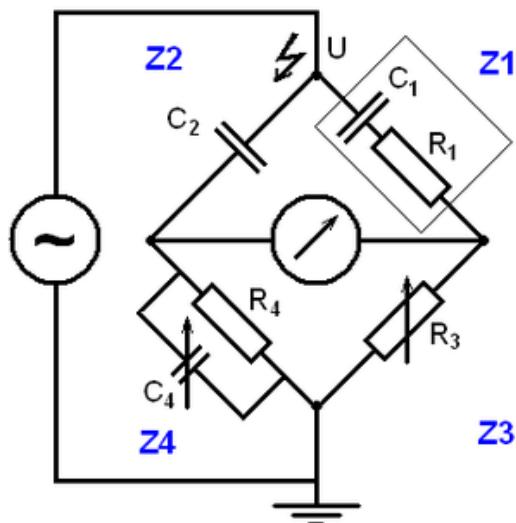


Рисунок 1.7 – Мост Шеринга.



Рисунок 1.8 – Прибор для измерения тангенса угла диэлектрических потерь Р-5026.

Кроме того, с помощью измерения тангенса угла диэлектрических потерь определяется относительная увлажненность изоляции: производят измерение  $\operatorname{tg} \delta$  на частотах 2 Гц и 50 Гц. Затем проверяют соотношение емкостей, и, если емкость изоляции при 2 Гц превышает емкость при 50 Гц в 1,3 раза или больше, такое увлажнение считается недопустимым для введения изоляции в эксплуатацию.

## 1.5 Оценка состояния изоляции по процессам поляризации/деполяризации

Основными характеристиками, подвергаемыми анализу при определении деполяризационных характеристик изоляции, являются возвратное напряжение и коэффициент (ток) абсорбции.

При анализе обеих характеристик подразумевается заряд изоляции постоянным напряжением значительно меньше номинального, что в некоторых случаях может вызвать образование объемного заряда в полимерной изоляции, однако в [56] отмечается, что использование напряжений 250 В, 500 В, 1000 В не может вызвать образования объемного заряда, способного оказать существенное влияние на электрическую прочность и работоспособность кабеля, не влияя при этом на точность проведения измерений.

Измерение возвратного напряжения производится следующим образом [56]: первоначально изоляция подключается к регулируемому источнику постоянного напряжения для ее заряда, после чего на 1, 2 или 3 секунды изоляция жила и экран замыкаются накоротко, затем ключ размыкается и происходит осциллографирование сигнала напряжения на изоляции. Полученная характеристика возвратного напряжения позволяет проанализировать степень старения изоляции. Наличие локальных повреждений изоляции вносят существенные изменения в форму кривой возвратного напряжения.

Другой способ контроля состояния изоляции – через контроль коэффициента абсорбции. Для определения коэффициента абсорбции, как и для анализа возвратного напряжения, изоляцию заряжают постоянным напряжением,

однако в отличие от анализа возвратного напряжения, анализируется процесс поляризации диэлектрика.

После подачи постоянного напряжения на изоляцию на основе величины абсорбционного тока определяют сопротивление изоляции через 15 секунд и через 60. После чего вычисляют коэффициент абсорбции по формуле:

$$k_{abc} = \frac{R_{60}}{R_{15}} \quad (1.1)$$

По коэффициенту абсорбции судят о степени увлажненности и качества изоляции. При  $K_{abc} < 1,3$  изоляция считается недопустимо увлажненной и необходимо провести ее сушку, либо изоляция выработала свой ресурс и нуждается в полной или частичной замене.

Измерение сопротивления изоляции обычно производится с помощью мегаомметров, наиболее распространенными из которых являются ЭСО202/2Г, М-4100, MIC-2500, MIC-1000, С.А 6555 и др (рисунок 1.9).



Рисунок 1.9 – Мегаомметры: а) MIC-2500; б) С.А 6555.

Главным недостатком этого метода контроля состояния изоляции является невозможность производить измерения под нагрузкой из-за необходимости приложения постоянного напряжения. Следовательно, нет известных технических

решений по мониторингу этого параметра. Таким образом, для контроля состояния изоляции этим методом необходимо производить периодический контроль параметра персоналом.

## **1.6 Тепловизионная, ультрафиолетовая и рентген-диагностика состояния изоляции**

Метод тепловизионной диагностики [12,57] электрооборудования получил широкое распространение для определения места расположения дефектов в изоляции линий электропередачи. Если известно о наличии дефекта в изоляции, например, источника частичных разрядов, его месторасположение можно определить по относительно высокому локальному нагреву изоляции, вызванному протеканием токов. Известно, что, при наличии дефекта в изоляции, температура на ее поверхности может превышать температуру неразрушенных участков в 1,5 – 2 раза [58].

Обычно тепловизионная диагностика используется для поиска дефектов в изоляции линий электропередачи в том случае, когда уже известно о наличии дефекта и даже, возможно, известно приблизительное его местоположение (эта информация может быть получена, например, с использованием средств мониторинга характеристик частичных разрядов). В этом случае производится обследование участка линии с предполагаемым дефектом изоляции с помощью тепловизора, и по полученной термокартины производится поиск локального нагрева изоляции, свидетельствующего о наличии в нем дефекта.

Кроме того, тепловизионная диагностика может использоваться для оценки степени нагрева изоляции ЛЭП с целью повышения ее пропускной способности и предотвращения перегревов.

Для проведения тепловизионной диагностики используются тепловизоры, например, TiS10, TiS20, Ti300, TiX1000 фирмы Fluke, testo 890-2, InfraTec VarioCAM HD head, FLIR T450sc, FLIR A655sc, A3500sc/A6500sc, FLIR SC7000 (рисунок 1.10).



Рисунок 1.10 – Термовизоры: а) FLIR SC7000; б) testo 890-2; в) InfraTec VarioCAM HD head; г) A3500sc/A6500sc.

Для обследования воздушных линий электропередачи со стеклянной изоляцией может применяться оборудование, позволяющее находить дефекты в изоляции по их ультрафиолетовому излучению [59]. Для повышения точности регистрации дефектов обследование проводится в темное время суток, так как излучение от солнца не позволяет точно находить поврежденные участки изоляции. Для регистрации ультрафиолетового излучения используют приборы типа Филин – 6 (рисунок 1.11).



Рисунок 1.11 – Электронно-оптический дефектоскоп Филин – 6.

Также для поиска дефектов в изоляции линий электропередачи используют ультразвуковую дефектоскопию, суть которой заключается в просвечивании изоляции с помощью ультразвука и поиске дефектов. Например, исследование, описанное в [60], показало, что этот метод позволил найти дефект в изоляции размером 1 мм. Однако известно [61], что ультразвуковая дефектоскопия может находить в изоляции кабелей водные триинги, которые по размерам могут быть намного меньше 1 мм.

Главным достоинством этого способа поиска дефекта является возможность точного определения местонахождения дефекта для проведения ремонта поврежденного участка. Основным же недостатком метода является необходимость предварительного поиска местонахождения дефекта акустическим или электромагнитным методом.

Для поиска дефектов в изоляции методом ультразвуковой дефектоскопии могут использоваться приборы типа Пеленг-415, СИА-7, УСД-60ФР (рисунок 1.12).

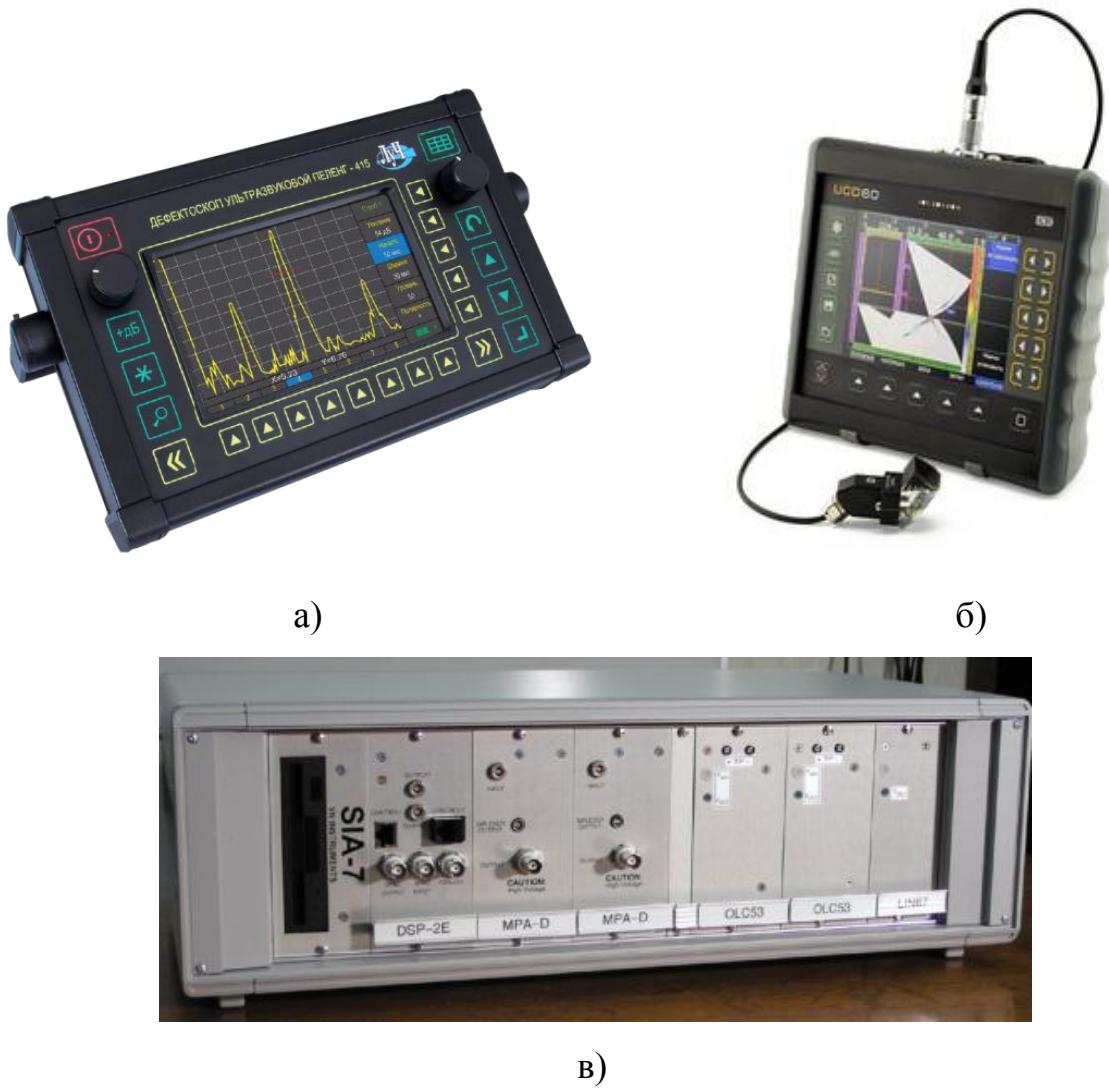


Рисунок 1.12 – Ультразвуковой дефектоскоп а) Пеленг-415; б) УСД-60ФР;

в) SIA-7.

Также для поиска дефектов в изоляции кабелей используется рентгенодефектоскопия, заключающаяся в просвечивании изоляции рентгеновскими лучами и поиске дефектов на полученных изображениях. Интенсивность рентгеновских лучей зависит от толщины исследуемого объекта, таким образом, наличие дефектов в изоляции вносит изменения в полученную картину и позволяет производить поиск поврежденных участков изоляции.

Рентгенодефектоскопия показывает хорошие результаты при обнаружении достаточно больших дефектов, составляющих 1-10% от толщины просвечиваемого объекта. Учитывая размеры изоляционных конструкций кабеля,

такой точности рентгендефектоскопа может быть достаточно для поиска больших дефектов в изоляции, способных привести к пробою.

Основным недостатком этого метода является опасность воздействия рентген-излучения на персонал, а также сравнительно более высокая цена оборудования по сравнению с ультразвуковой дефектоскопией.

Для проведения рентген обследования электрооборудования используются промышленные рентген-установки, например, XYD-3010, Арион-400, РПД-150 (рисунок 1.13) и др.



Рисунок 1.13 – Промышленные рентген-аппараты а) Арион-400; б) РПД-150.

## 1.7 Рефлектометрия

Предварительная локализация места повреждения изоляции может выполняться с помощью метода импульсной рефлектометрии или метода отраженных импульсов [61]. Суть метода заключается в подаче на кабельную линию низковольтных коротких импульсов и анализе отраженных сигналов, по виду которых может определить тип повреждения (короткое замыкание или обрыв). Значительным недостатком этого метода является сложность анализа

отраженного импульса вследствие содержания гармоник в излучаемом импульсе. Для повышения точности измерения может использоваться импульс сложной формы или вейвлет-импульс [3].

Более перспективным в диагностике кабельных линий является метод высокочастотной рефлектометрии, заключающийся в анализе зависимости входного сопротивления от частоты напряжения, и позволяющий производить поиск местоположения распределенных дефектов [3], например, дендритов, образовавшихся как следствие воздействия частичных разрядов.

Кроме того, в некоторых случаях необходимо производить мониторинг температуры изоляции, для чего может применяться метод оптической рефлектометрии, позволяющий определять температуру каждого участка кабельной линии с точностью до 1 м и 1 °С [3]. Однако для использования оптической рефлектометрии требуется наличие оптоволоконной жилы в кабеле.

Таким образом, использование метода рефлектометрии позволяет с достаточной степенью точности производить предварительный поиск места повреждения кабельных линий. Дополнительным достоинством этого метода является возможность его использования без отключения потребителей.

## **1.8 Выводы**

1. Известное многообразие методов диагностики и контроля состояния изоляции подтверждает актуальность данного вопроса;
2. Общепринятые испытания изоляции повышенным напряжением являются разрушающими для изоляции и могут привести к быстрому выходу кабеля из строя, в связи с этим, актуальным является вопрос разработки неразрушающих методов для контроля состояния изоляции;
3. Недостаток всех перечисленных способов контроля состояния изоляции состоит в том, что все они применяются для определения предпробойного состояния изоляции или для поиска места

повреждения, однако этими способами нельзя определять остаточный ресурс изоляции;

4. Методы просвечивания изоляции, дистанционного поиска источника ЧР (электромагнитного, акустического) и тепловизионную дефектоскопию затруднительно использовать для поиска дефектов в изоляции при прокладке кабелей под землей. В этом случае требуется дополнительный инструмент определения местоположения дефекта, например, на основе анализа ЧР или с помощью высокочастотной рефлектометрии;
5. Методы высокочастотной рефлектометрии позволяют достаточно точно определять местоположение дефекта, однако при использовании этого метода без отключения нагрузки увеличится содержание высших гармоник в сети, а также возможны искажения отраженных сигналов, так как в сети всегда присутствуют их высокочастотные составляющие;
6. Основным недостатком всех перечисленных способов контроля состояния изоляции является необходимость анализа данных персоналом для оценки состояния изоляции, поэтому наиболее актуальным сейчас является исследование по автоматизации определения остаточного ресурса и предпробойного состояния изоляции.

## **2 Определение остаточного ресурса изоляции кабелей 6-10 кВ**

### **2.1 Анализ воздействий, оказываемых внешними и внутренними факторами на изоляцию кабелей 6-10 кВ в процессе эксплуатации**

В процессе эксплуатации кабельных линий электропередачи с изоляцией из сшитого полиэтилена изоляционный материал может подвергаться ряду внешних и внутренних разрушающих воздействий, приводящих к его старению [4–6,62–64]:

*Частичные разряды* в изоляции – локальные электрические разряды, которые шунтируют только часть изоляции в электроизоляционной системе, вызванные воздействием электромагнитного поля высокой напряженности;

1. *Температурное воздействие* определяет скорость протекания химических реакций деструкции и деполимеризации [62] сшитого полиэтилена;
2. Повышенная *влажность окружающей среды* может вызывать увлажнение изоляции и ухудшать ее свойства. Для определения степени увлажненности определяется коэффициент абсорбции (подраздел 1.5) и, при необходимости, производят сушку изоляции. Кроме того, содержание воды в микропорах изоляционного материала вызывает явление водного триинга, ускоряющее развитие дефектов в изоляции (подраздел 1.3.3);.
3. *Ультрафиолетовое излучение* оказывает разрушающее воздействие на поверхность изоляции, так как фотоны ультрафиолетового диапазона обладают высокой энергией и разрушают молекулярную структуру изоляции (отщепляют боковые группы, чаще водород) на ее поверхности, приводят к повышению твердости изоляции, ее иссушиванию, растрескиванию и, таким образом, к ухудшению изоляционных свойств. Это явление еще называют фотохимической деструкцией [62];

4. *Химические воздействия* выражаются в многообразии химических веществ, которые могут воздействовать на изоляцию и разрушать ее, например, азотную кислоту, способную разрушать полиэтилен в 50% растворе, или наличие кислорода из воздуха, приводящего к термоокислительной деструкции;
5. *Механические воздействия* вызывают разрушение межатомных связей при возникновении механического напряжения выше энергии связей атомов [62];
6. Действие *радиации* на диэлектрик может приводить к различным повреждениям на молекулярном уровне. Происходит изменения структуры, свойств, состояния вещества. Носители заряда, образующиеся в облучаемом веществе, создают стационарные и нестационарные токи и приводят к накоплению объемного заряда в диэлектриках, который может сохраняться в течение длительного времени [65].

Однако разработка системы мониторинга всех перечисленных факторов является достаточно сложной задачей ввиду необходимости глубокого изучения природы всех перечисленных воздействий на изоляцию. Кроме того, требуется индивидуальных подход к мониторингу остаточного ресурса каждого конкретного кабеля, так как воздействие некоторых факторов на изоляцию может быть незначительным, соответственно, им можно пренебречь.

Объектом исследований в диссертации являются кабельные линии с изоляцией из спитого полиэтилена, применяемые для общих задач электроснабжения. Для определения воздействий, оказываемых на изоляцию кабелей, требуется проанализировать их конструкцию (рисунок 2.1).

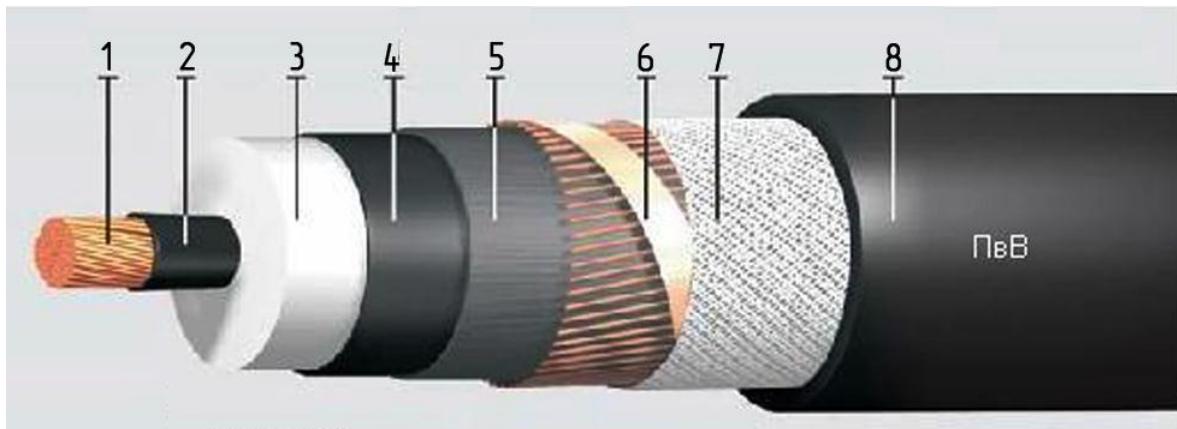


Рисунок 2.1 – Конструкция одножильного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена: 1 – алюминиевая или медная токопроводящая жила, 2 – полупроводящий слой из сшитой полимерной композиции, 3 – изоляция из сшитого полиэтилена, 4 – полупроводящий слой из сшитой полимерной композиции, 5 –слой из электропроводящей водоблокирующей ленты, 6 – Экран из медных проволок, скрепленных медной лентой, 7 – слой из электропроводящих водоблокирующих лент, 8 – полиэтиленовая оболочка.

Исходя из конструкции кабелей, решено не учитывать следующие факторы разрушения изоляционного материала:

1. *Влажность окружающей среды*, так как в кабеле имеются водоблокирующие ленты, препятствующие увлажнению кабелей, а также известно, что полиэтилен обладает относительно низким влагопоглощением [66];
2. *Ультрафиолетовое излучение*, так как оно оказывает разрушающее воздействие исключительно на поверхность кабеля, то есть на его оболочку, не повреждая при этом рабочую изоляцию, расположенную в кабеле так, что она защищена от воздействия внешнего солнечного излучения;
3. *Химические воздействия* решено не рассматривать отдельно, так как все химические вещества могут быть в объеме изоляции в небольшом количестве или образовываться в результате разрушения изоляционного материала, следовательно, будут определяться

процессами термической деструкции, вызываемой нагревом токопроводящей жилы в режиме эксплуатации кабеля;

4. *Механические воздействия* выражаются в изгибах (при прокладке), сжатиях и растяжениях кабелей, вызванных перепадами температуры и смещением грунта (при прокладке в земле);
5. *Радиация* оказывает воздействие на диэлектрик только на специализированных объектах, например, на АЭС, однако целью исследования является разработка системы определения остаточного ресурса для кабелей общего назначения, применяемых в промышленности.

Таким образом, исходя из анализа конструкции кабелей и воздействий, которым их изоляция может подвергаться, достаточно учитывать в процессе старения воздействия температуры и частичных разрядов, вызываемых наличием электрического поля высокой напряженности.

## **2.2 Анализ известных результатов исследования процессов старения изоляции**

Известно достаточно много работ, посвященных оценке степени износа изоляции и ее старению [67–75]

Целью работы является разработка способа определения остаточного ресурса изоляции из сшитого полиэтилена кабельных линий 6–10 кВ, для чего необходимо использовать математическую модель ее старения. В настоящее время известны следующие модели старения изоляции, среди которых [4–6, 76–82]:

1. *Модель старения изоляции Журкова*, разработанная в 1960-е, согласно которой срок службы твердого материала можно рассчитать по формуле [81, 82]:

$$\tau_{cl} = \tau_0 \exp\left[\frac{U_o - \gamma\sigma}{kT}\right] \quad (2.1)$$

где  $\tau_0$ ,  $U_o$ ,  $\gamma$  – константы, зависящие от структуры материала и определяемые экспериментальным путем,  $\sigma$  – растягивающее напряжение,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура.

Однако в первоначальном виде эту модель нельзя использовать для расчета срока службы изоляции силовых кабелей, поэтому были предложены уточнения в модель для учета воздействия температуры и электрического поля [78]:

$$\tau_{cl} = \tau_0 \exp\left(\frac{w - \chi E}{RT}\right) \quad (2.2)$$

где  $\tau_0$  – значение срока службы, когда степенное выражение стремится к единице,  $w$  – энергия активации структурного пробоя,  $R$  – универсальная газовая постоянная,  $\chi$  – структурный параметр,  $E$  – напряженность электрического поля,  $T$  – абсолютная температура.

2. *Модель старения изоляции Крайна*, предложенная в конце 1990-х, по которой срок службы рассчитывается по формуле [76,80]:

$$\tau_{cl} \approx \frac{h}{2kT} \exp\left(\frac{\Delta G}{kT}\right) \operatorname{csch}\left(\frac{e\delta E}{kT}\right) \quad (2.3)$$

где  $h$  – постоянная Планка,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $\Delta G$  – энергия активации Гиббса,  $e$  – заряд электрона, ускоренного электрическим полем с напряженностью  $E$  на дистанции  $\delta$ .

Однако позже Крайн пересмотрел свою модель и предложил рассчитывать срок службы изоляции исходя из объема активации, а не расстояния, как было предложено ранее [79]:

$$\tau_{cl} \approx \frac{h}{2kT} \exp\left(\frac{\Delta G - \varepsilon\varepsilon_0\Delta V E^2/2}{kT}\right) \quad (2.4)$$

Где  $\varepsilon$ ,  $\varepsilon_0$  – относительная и абсолютная диэлектрическая проницаемость материала,  $\Delta V$  – объем активации, в котором действует электрическое поле напряженностью  $E$ .

3. Комбинированная модель на основе модели старения от температуры Аррениуса и обратной степенной модели [78]:

$$\tau_{cl} = \tau_0 \exp(-BcT) \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-(n_0 - bcT)} \quad (2.5)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  $cT = 1/T_0 - 1/T$  – условное температурное напряжение ( $T$  – абсолютная температура,  $T_0$  – приблизительная контрольная температура (комнатная температура),  $n_0$  – коэффициент выносливости по напряжению,  $E_0$  – значение напряженности электрического поля, ниже которого влиянием электрического поля можно пренебречь,  $\tau_0$  – срок службы при  $T = T_0$ ,  $E = E_0$ ,  $B = \Delta W/k$  ( $\Delta W$  – энергия активации реакции термической деградации,  $k$  – постоянная Больцмана),  $b$  – параметр, показывающий синергизм теплового и электромагнитного взаимодействий.

4. Модель старения изоляции под воздействием температуры и электрического поля, предложенная Кучинским Г. С. в [4]:

$$\tau_{cl} = AE^{-n} \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right) \quad (2.6)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  $W_a$  – энергия активации,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $A$  – константа, зависящая от структуры и свойств изоляции,  $n$  – показатель степени, зависящий от типа изоляции.

5. Модель старения тонких полимерных пленок, предложенная в [83]:

$$\tau_{cl} \cong \exp\left[\frac{E_t - aeF}{kT}\right] \quad (2.7)$$

где  $E_t$  – глубина ловушек в диэлектрике,  $a$  – ширина ловушки,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – абсолютная температура,  $e$  – заряд электрона,  $F$  – напряженность электрического поля.

Для анализа моделей старения изоляции предлагается сопоставить результаты расчета при одних и тех же условиях. Для этого необходимо задать параметры моделирования для каждой из моделей. Модель старения тонких

полимерных пленок решено не принимать в расчет, так как изоляционный материал не является тонкой пленкой.

Паспортный срок службы кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена составляет 30 лет. В связи с этим, параметры моделей подбирались таким образом, чтобы при максимально длительно допустимой температуре 90°C срок службы составлял около 30 лет.

При этом анализ моделей старения показал, что зависимость срока службы изоляции от температуры и напряженности электрического поля существенно зависит от коэффициентов, задаваемых в моделях, которые могут варьироваться в больших пределах. Например, возможен набор коэффициентов, при котором зависимости совпадут, что доказывается графиком зависимости (рисунок 2.2) при параметрах, указанных в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры моделей старения изоляции

<i>Модель С. Н. Журкова</i>		<i>Модель Ж.-П. Крайна</i>	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
$\tau_0$ [с]	$10^{-3}$	$\epsilon$ [ $\Phi/m$ ]	$2.213 \cdot 10^{-11}$
W [кДж/моль]	84	$\Delta G$ [Дж]	$2.5555 \cdot 10^{-19}$
$\chi$ [кДж мм/(моль кВ)]	0.447	$T_0$ [К]	293
R [кДж/(моль К)]	$8.314 \cdot 10^{-3}$	$\Delta V$ [ $m^3$ ]	$3.4 \cdot 10^{-23}$
<i>Модель Аррениуса-ОСМ</i>		<i>Модель Г. С. Кучинского</i>	
Параметр	Значение	Параметр	Значение
$\tau_0$ [с]	$2 \cdot 10^5$	A	$5.3 \cdot 10^{16}$
b [К мм/кВ]	200	W [кДж/моль]	84
$n_0$	16	n	3
$E_0$ [кВ/мм]	5	R [кДж/(моль К)]	$8.314 \cdot 10^{-3}$
B [К]	10103		

Однако расчета зависимости срока службы изоляции от температуры недостаточно, так как напряжение на кабеле непрерывно меняется в пределах 10% от номинального, а также могут возникать перенапряжения на изоляции,

вызванные коммутациями или грозой. В связи с этим, необходимо произвести расчеты срока службы изоляции в зависимости от напряжения и температуры. Для этих целей использовался пакет программ Matlab, полученные результаты моделирования представлены на рисунках 2.3 – 2.10.

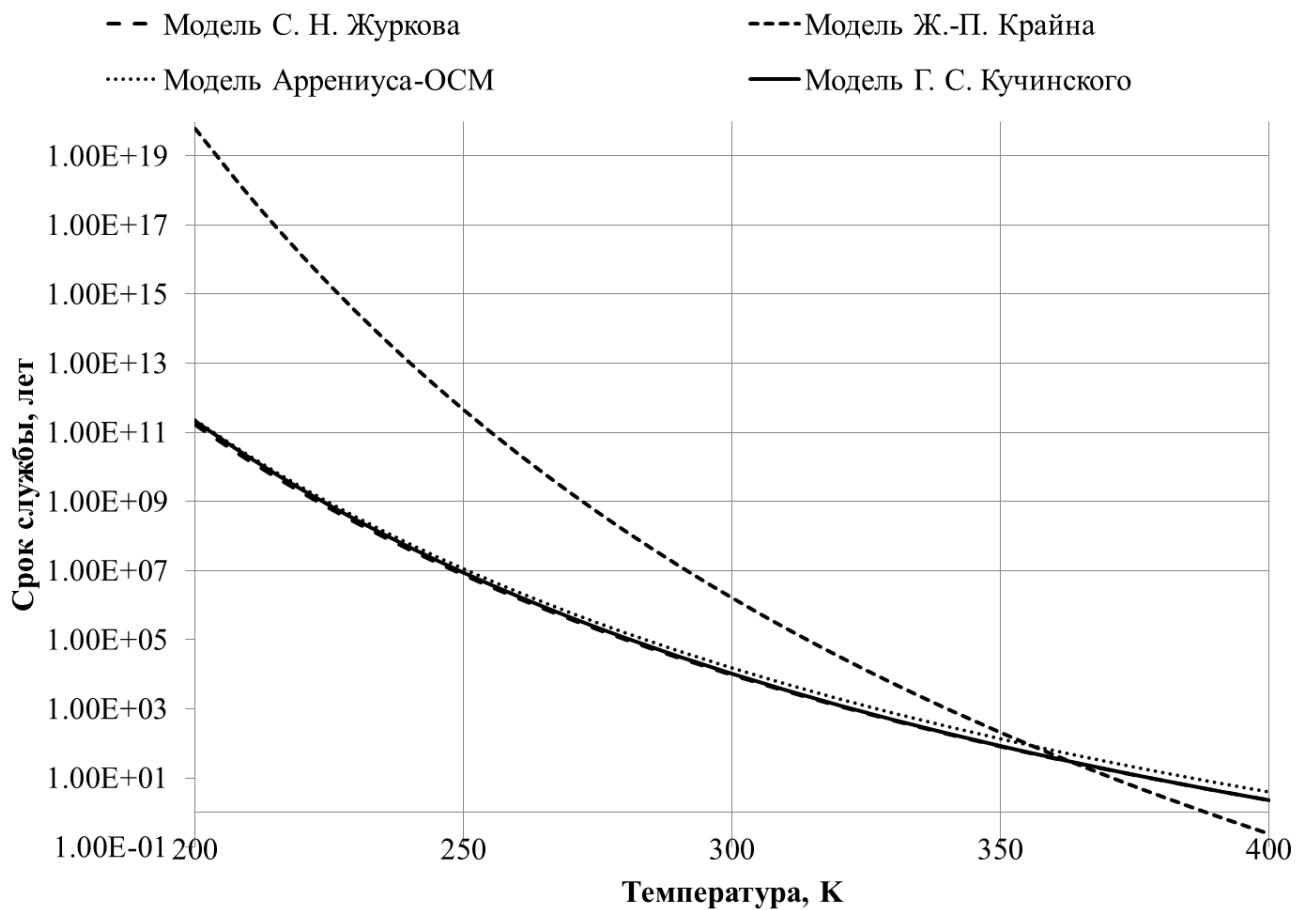


Рисунок 2.2 – Зависимости срока службы изоляции кабелей из сшитого полиэтилена от температуры при номинальной напряженности электрического поля при расчете по различным моделям старения изоляции.

Исходя из полученных результатов расчета, все перечисленные модели имеют попарно схожий характер зависимости от температуры и напряженности электрического поля, что вполне логично. Однако для математического моделирования предлагается выбрать модель старения изоляции Г. С. Кучинского, так как она базируется на учете энергетических составляющих разрушающих воздействий, которыми является температура изоляции (как параметр термической и термоокислительной деструкции) и мощность частичных разрядов, которая является функцией от напряженности электрического поля.

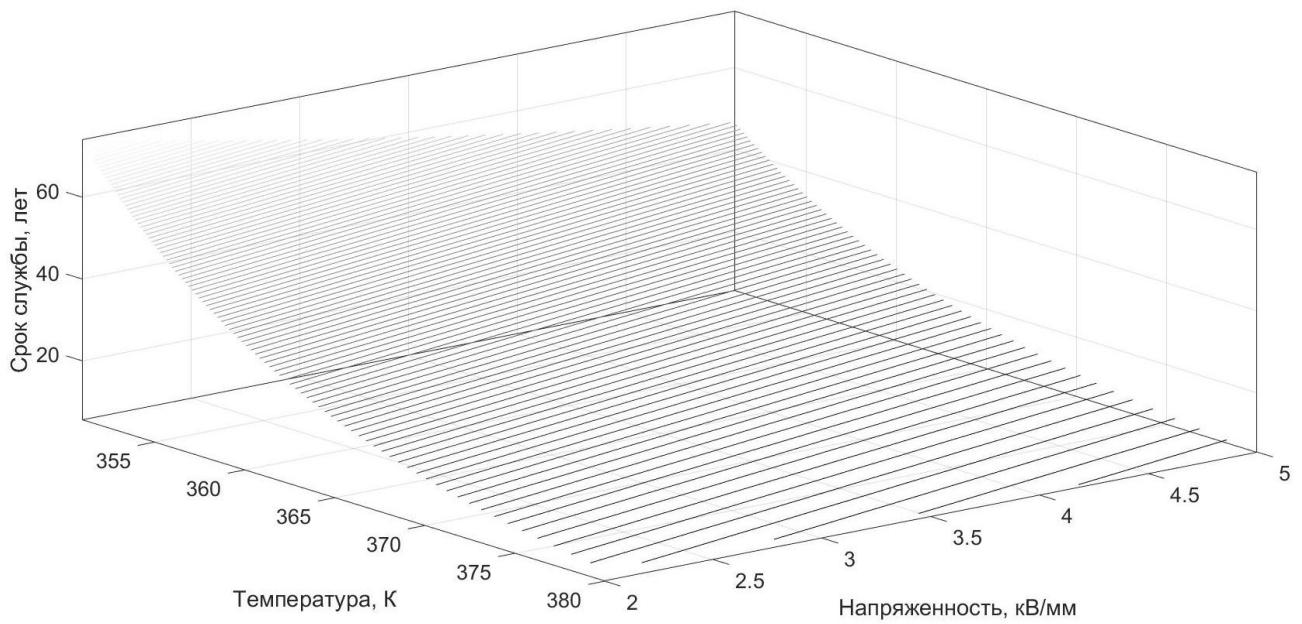


Рисунок 2.3 – Зависимость срока службы от напряженности и температуры, согласно модели С. Н. Журкова

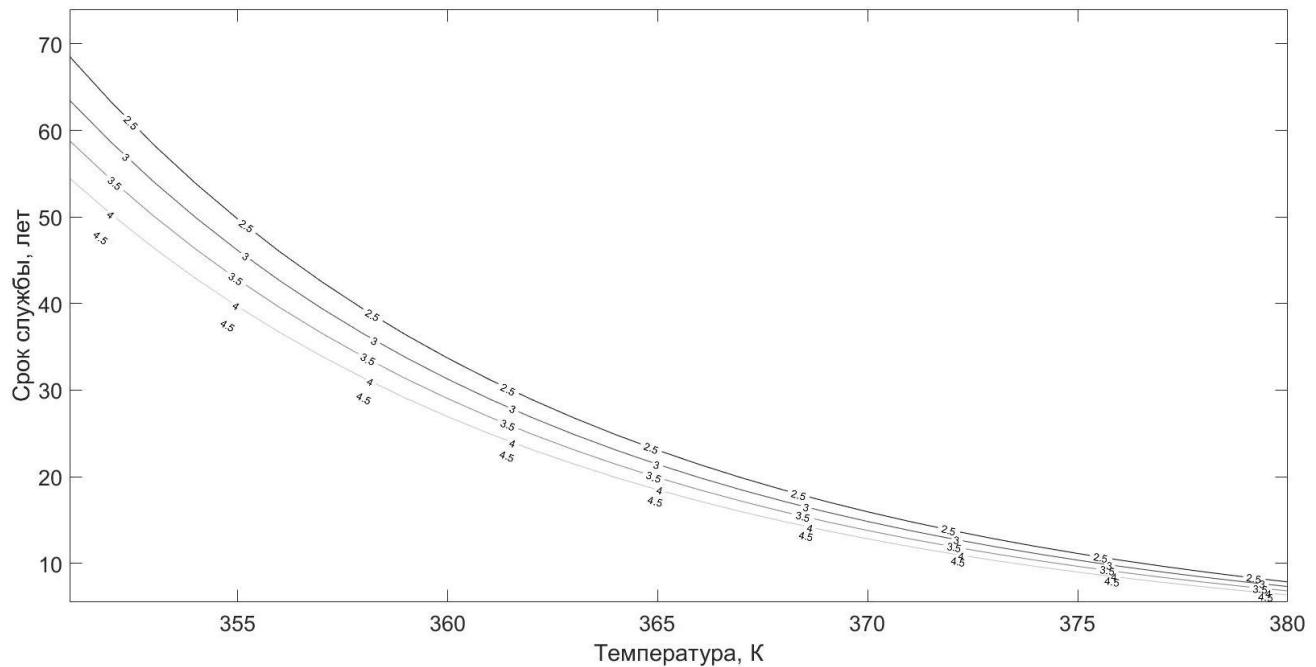


Рисунок 2.4 – Контурная поверхность зависимости срока службы от напряженности и температуры, согласно модели С. Н. Журкова

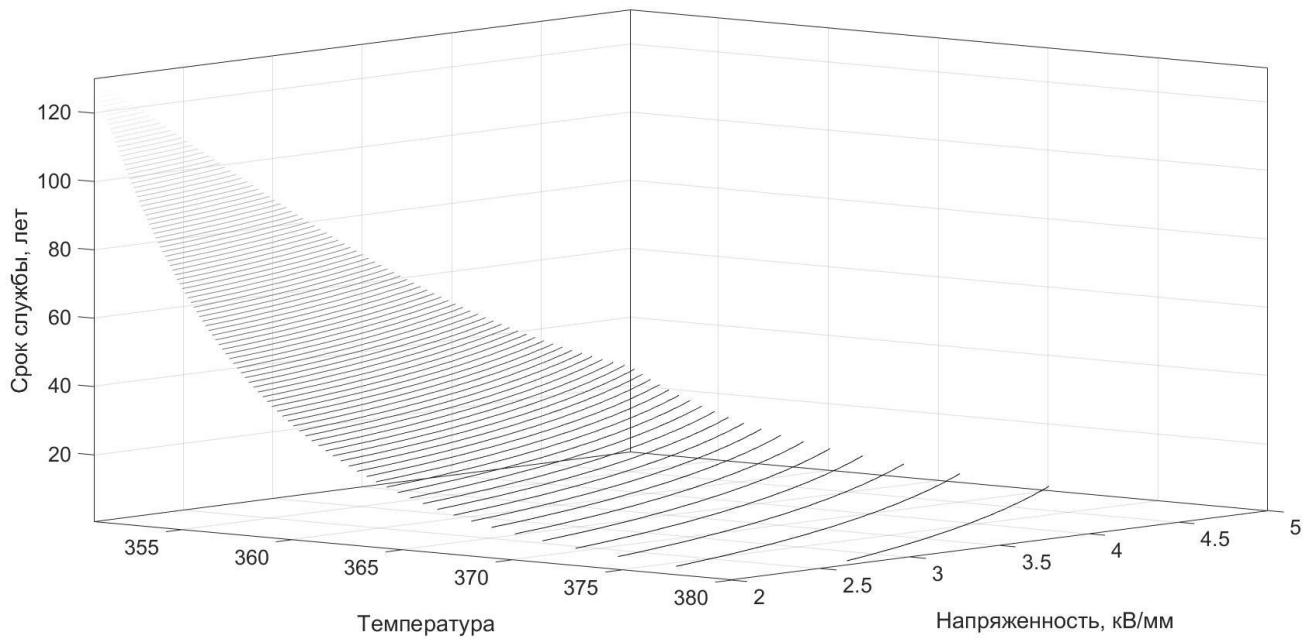


Рисунок 2.5 – Зависимость срока службы от напряженности и температуры, согласно модели Ж.-П. Крайна

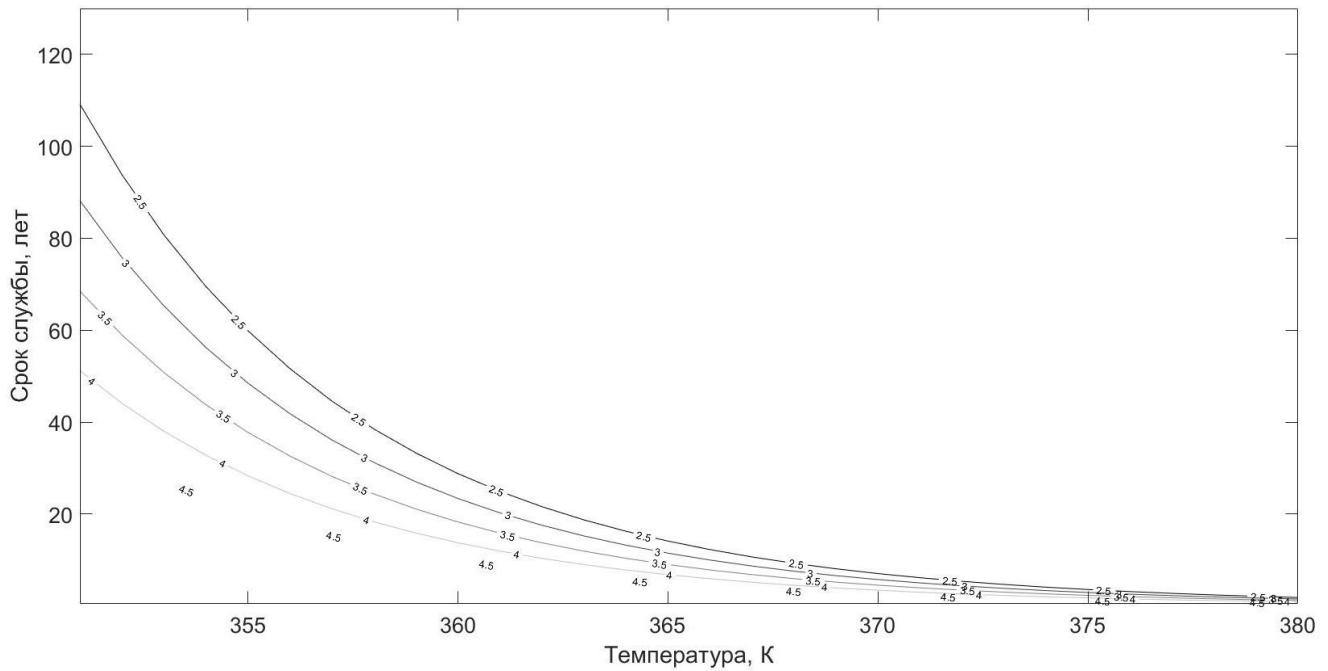


Рисунок 2.6 – Контуруная поверхность зависимости срока службы от напряженности и температуры, согласно модели Ж.-П. Крайна

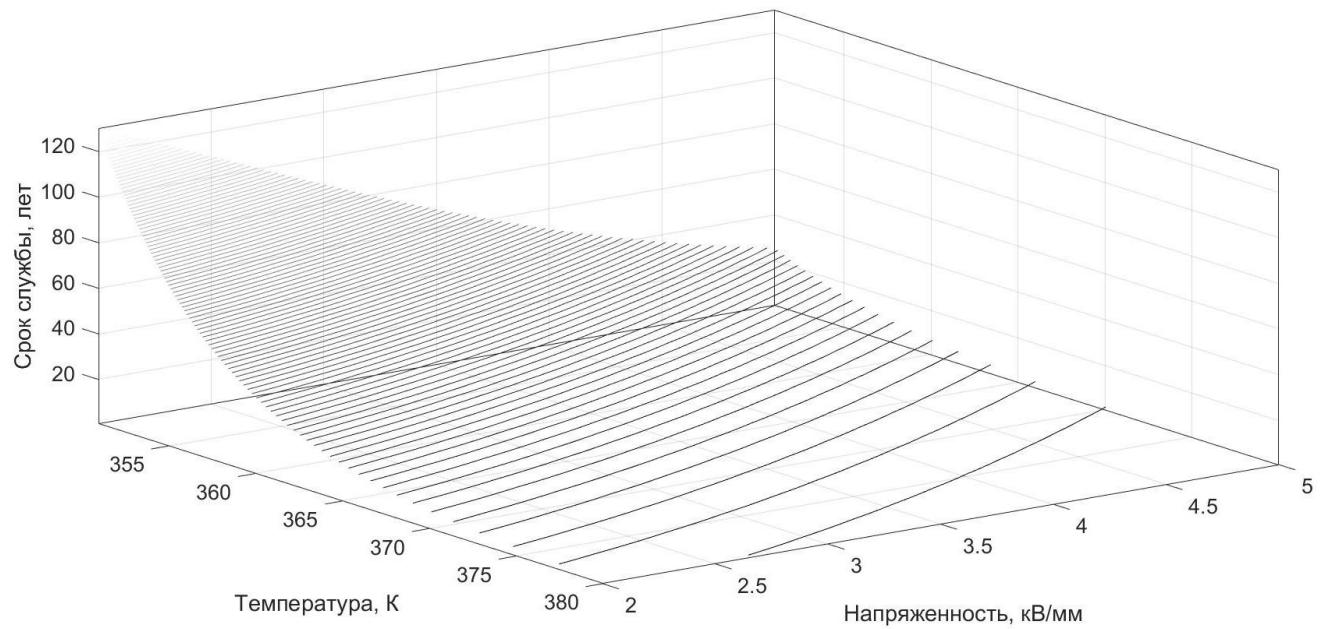


Рисунок 2.7 – Зависимость срока службы от напряженности и температуры, согласно модели Аррениуса-ОСМ

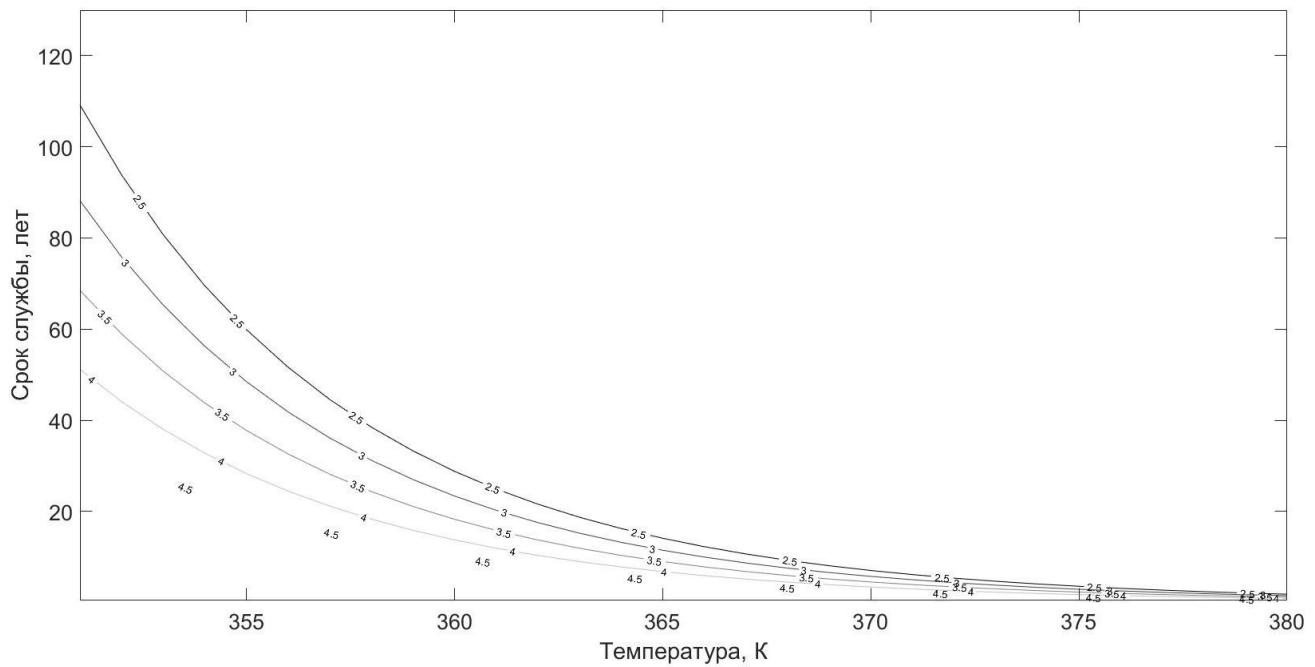


Рисунок 2.8 – Контуруная поверхность зависимости срока службы от напряженности и температуры, согласно модели Аррениуса-ОСМ

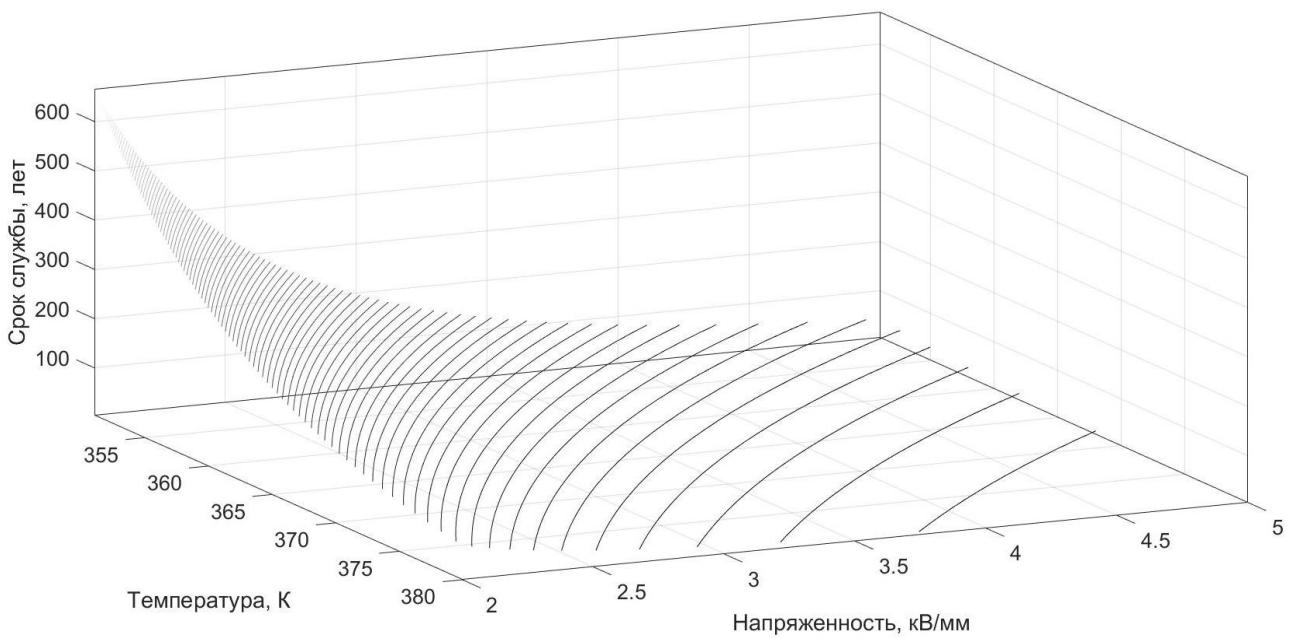


Рисунок 2.9 – Зависимость срока службы от напряженности и температуры, согласно модели Г. С. Кучинского

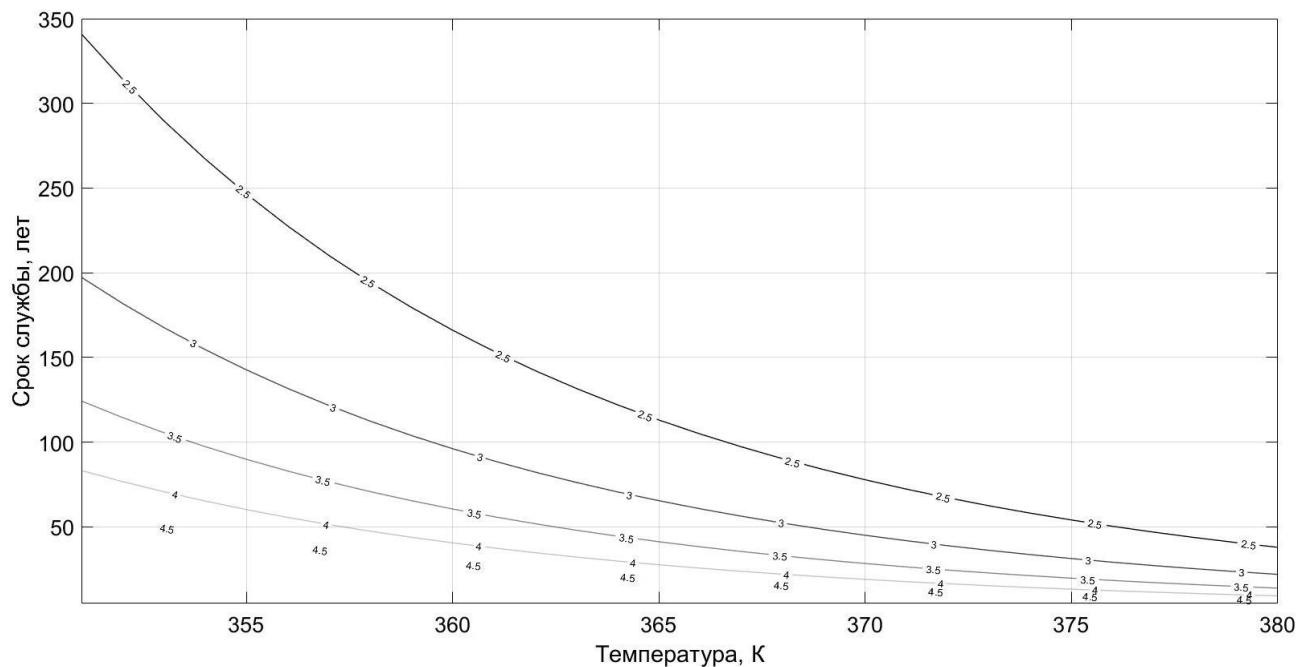


Рисунок 2.10 – Контуруная поверхность зависимости срока службы от напряженности и температуры, согласно модели Г. С. Кучинского

Также предполагается внести уточнения в модель старения изоляции Г. С. Кучинского при несоответствии результатов экспериментальных исследований с расчетом и уточнить коэффициенты А и п для изоляции кабелей из сшитого полиэтилена для того, чтобы модель старения можно было

использовать для определения остаточного ресурса и прогнозировать износ изоляции.

### 2.3 Определение критерия возникновения пробоя изоляции кабеля

В качестве объекта исследования решено использовать одножильный коаксиальный кабель на напряжение 10 кВ марки АПвПуг 1x70/35–10. Все расчеты и моделирование производились для указанного кабеля. Сечение кабеля представлено на рисунке 2.11.

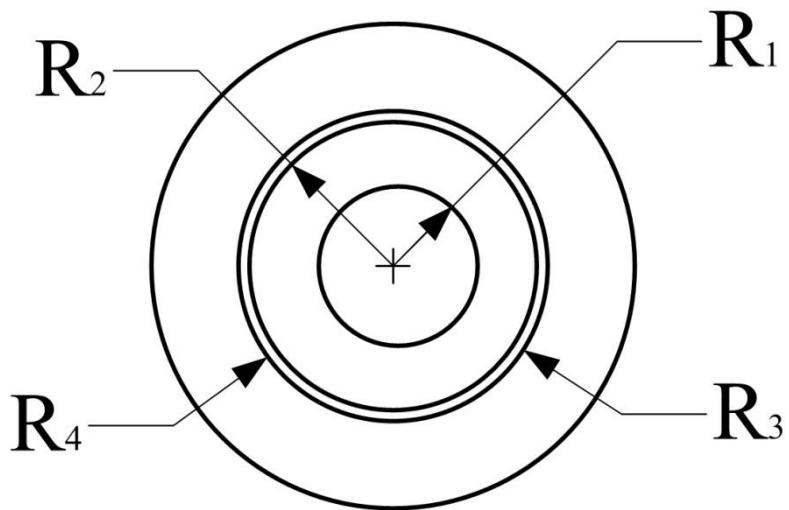


Рисунок 2.11 – Сечение кабеля

Для кабеля выбранной марки размеры составляют:  $R_1 = 4.72$  мм,  $R_2 = 8.52$  мм,  $R_3 = 9.15$  мм,  $R_4 = 14.3$  мм. Геометрия кабеля, построенная в программном комплексе Elcut 5.6 Профессиональная версия, представлена на рисунке 2.12.

Конструкция кабеля такова, что он представляет собой цилиндрический конденсатор. Известно, что напряженность электрического поля в диэлектрике цилиндрического конденсатора при  $R_1 < r < R_2$  может быть рассчитана по формуле:

$$E(r) = \frac{\tau}{2\pi\epsilon\epsilon_0 r} \quad (2.8)$$

где  $E$  – напряженность электрического поля,  $\tau$  – линейная плотность заряда конденсатора,  $\epsilon$  и  $\epsilon_0$  – относительная и абсолютная диэлектрическая проницаемость соответственно,  $r$  – радиус.

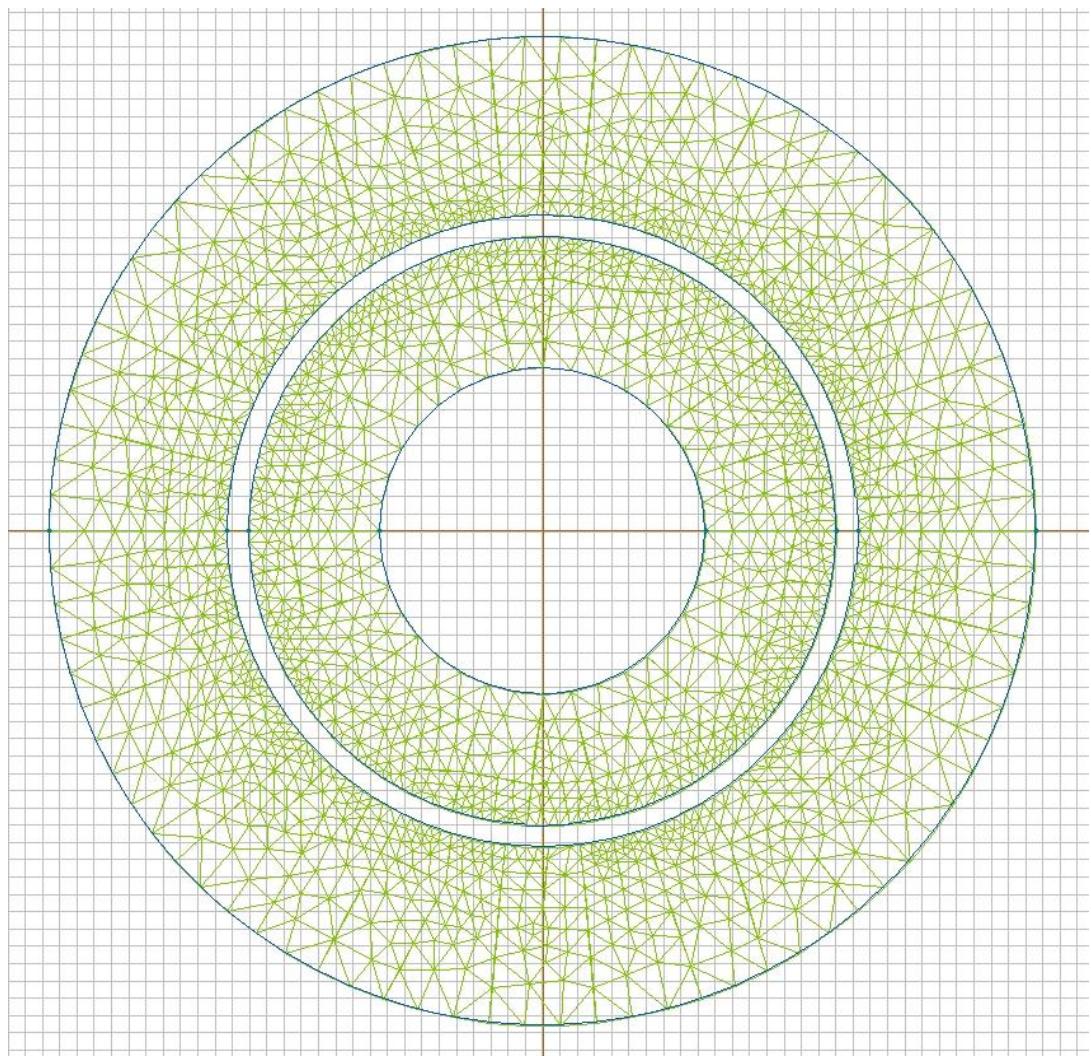


Рисунок 2.12 – Геометрия кабеля

Однако линейная плотность заряда неизвестна при компьютерном моделировании. Известной величиной является напряжение на изоляции. В связи с этим, формула (2.8) должна быть преобразована. Известно, что линейную плотность заряда можно рассчитать по формуле:

$$\tau = C \cdot U \quad (2.9)$$

где  $U$  – напряжение,  $C$  – емкость конденсатора.

Емкость цилиндрического однослойного конденсатора рассчитывается по формуле:

$$C = \frac{2\pi\epsilon\epsilon_0}{\ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \cdot l \quad (2.10)$$

где  $l$  – длина конденсатора.

Тогда, подставив расчет по формулам (2.9) и (2.10) в (2.8), получим, что напряженность электрического поля в изоляции кабеля будет иметь зависимость от напряжения и радиуса по формуле:

$$E(r) = \frac{U}{\ln\left(\frac{R_3}{R_{жc}}\right)r} \quad (2.11)$$

Для определения критерия возникновения пробоя изоляции необходимо задать мгновенное значение напряжения, при котором наиболее вероятно произойдет пробой. Учитывая быстротечность процесса пробоя изоляции при возникновении лавины электронов в области пробоя, напряжение в момент пробоя можно считать неизменным. При этом естественно, при возникновении дуги, напряжение начнет быстро уменьшаться в области пробоя.

Учитывая, что на напряженность электрического поля существенно влияет только мгновенное значение напряжения, логично предположить, что пробой изоляции произойдет при напряжении, близком к амплитудному. Класс напряжения выбранного кабеля – 10 кВ. однако следует учесть, что кабель одножильный, и кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена соединяются по схеме «звезда», а нейтраль заземляется через низкоомный резистор [84]. Следовательно, действующее значение напряжения, прикладываемого к изоляции, составит 5.7 кВ, а амплитуда напряжения – 8.16 кВ. Примем для расчета напряжение, составляющее 95% от номинального, то есть 7.76 кВ.

Исходя из размеров кабеля, при напряжении 7.76 кВ напряженность электростатического поля в изоляции кабеля будет иметь зависимость от радиуса, представленную на рисунке 2.13.

Также, кроме расчета, было проведено моделирование электрического поля в изоляции кабеля с использованием профессиональной версии программы Elcut 5.6. Результаты моделирования представлены на рисунке 2.14 (картина электростатического поля в изоляции кабеля) и рисунке 2.15 (распределение напряженности электрического поля в изоляции кабеля при удалении от центра

кабеля). Работа программы Elcut основывается на применении метода конечных элементов для расчета электрических, магнитных и тепловых полей.

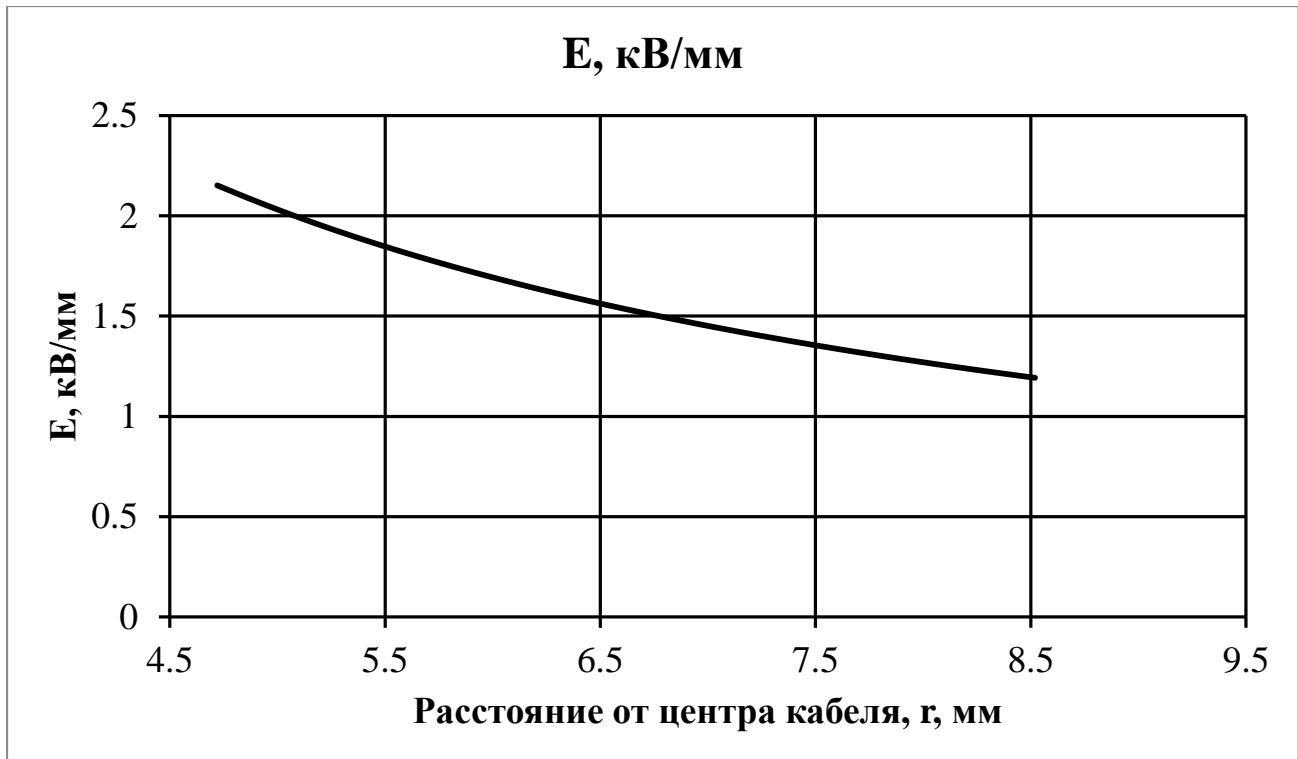


Рисунок 2.13 – Зависимость напряженности электрического поля в изоляции кабеля от расстояния от центра кабеля.

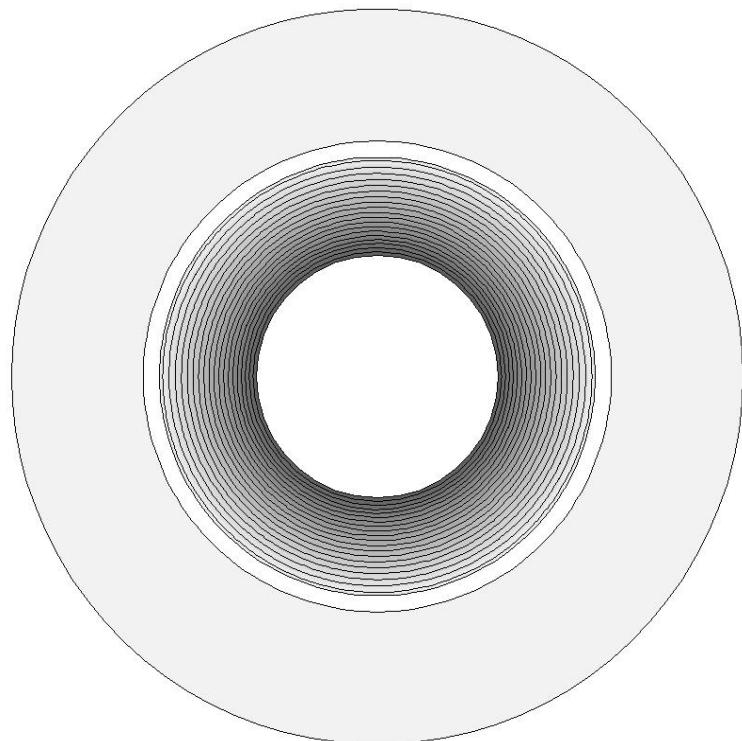


Рисунок 2.14 – Картина поля в изоляции кабеля.

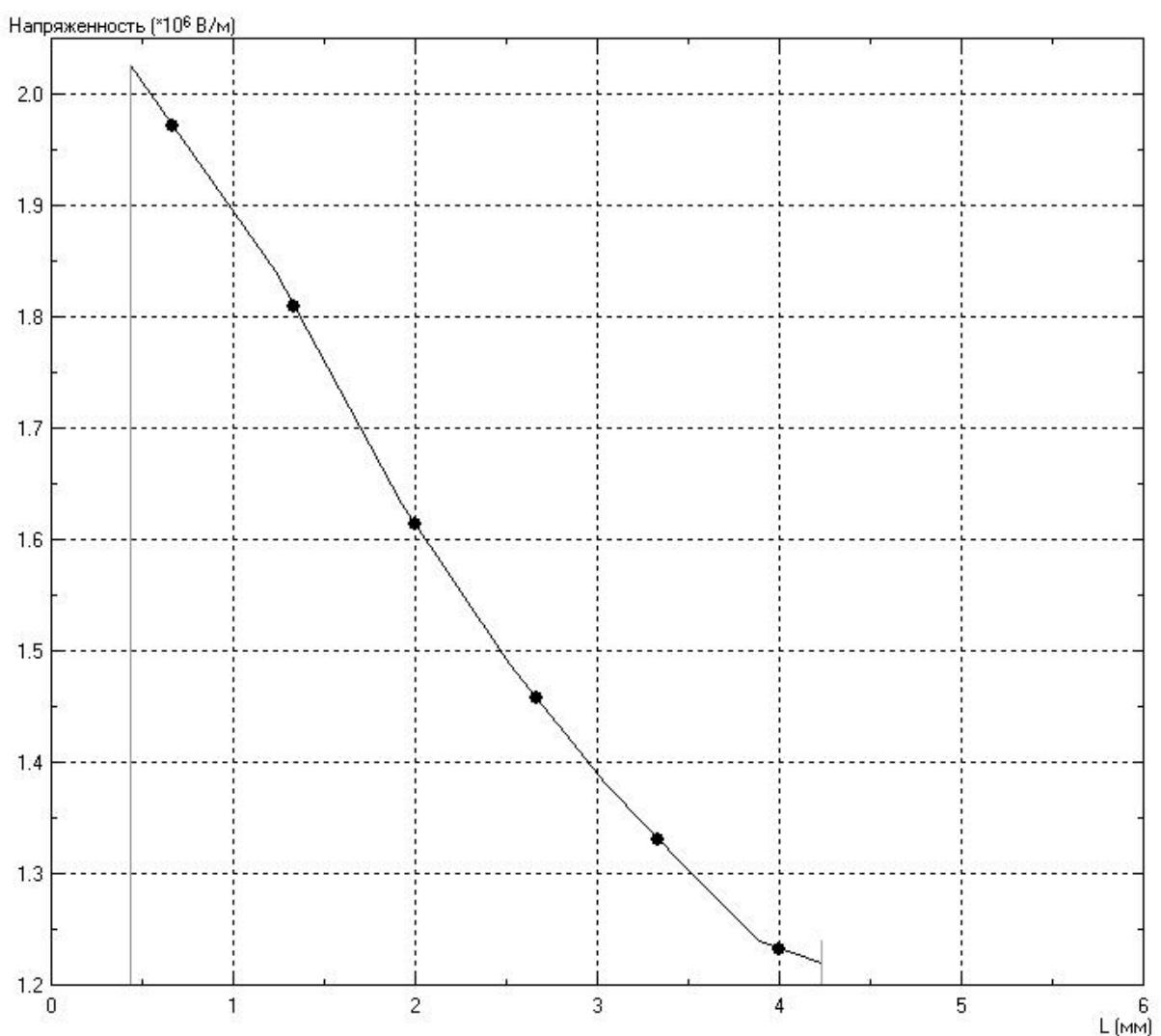


Рисунок 2.15 – Распределение напряженности электрического поля в изоляции кабеля по результатам компьютерного моделирования.

Следующим шагом при определении критерия возникновения пробоя изоляции является расчет распределения электростатического поля в диэлектрике с дефектом. Для задачи расчета электрического поля с дефектом нет аналитического решения. В данном случае расчет электрического поля сводится к численным методам, одним из которых является метод конечных элементов, реализованный в Elcut 5.6.

В качестве условия возникновения пробоя используется условие возникновения в изоляции напряженности электрического поля выше пробивной. Важно учитывать фактор старения изоляции кабелей в процессе эксплуатации. Исходя из этого, в качестве пробивной напряженности решено использовать

величину  $E_{\text{пр}} = 6 \text{ кВ/мм}$ , которая была определена в [47] для кабеля с полиэтиленовой изоляцией после восьми лет в эксплуатации.

Дефект изоляции был принят как эквипотенциальная поверхность, так как внутри дефекта возникают частичные разряды, фактически шунтирующие сам дефект. Электростатическое поле моделируется в момент возникновения частичного разряда, так как в этот момент времени наиболее вероятно возникновение пробоя изоляции за счет увеличения напряженности электрического поля в изоляции и возникновения лавины электронов в области дефекта.

Первоначально проводилось моделирование электростатического поля в кабеле с дефектом круглой формы в сечении. Результаты моделирования показали, что для возникновения пробивной напряженности электрического поля в области дефекта, необходимо, чтобы размер сферического дефекта был соизмерим с толщиной изоляционного материала. Пример возникновения пробивной напряженности с дефектом круглого сечения представлен на рисунках 2.16 и 2.17.

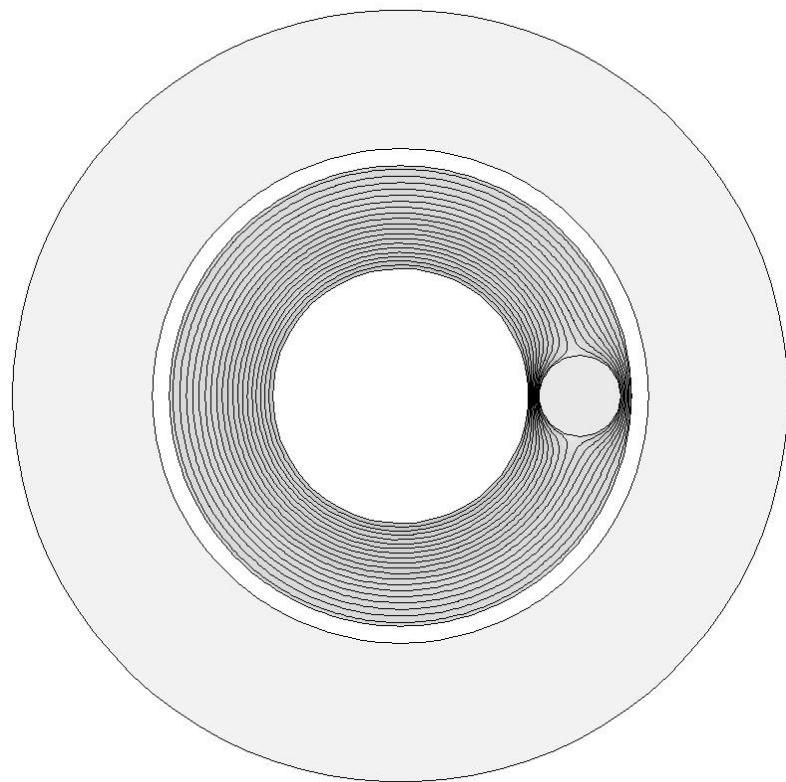


Рисунок 2.16 – Картина поля в кабеле с дефектом круглого сечения

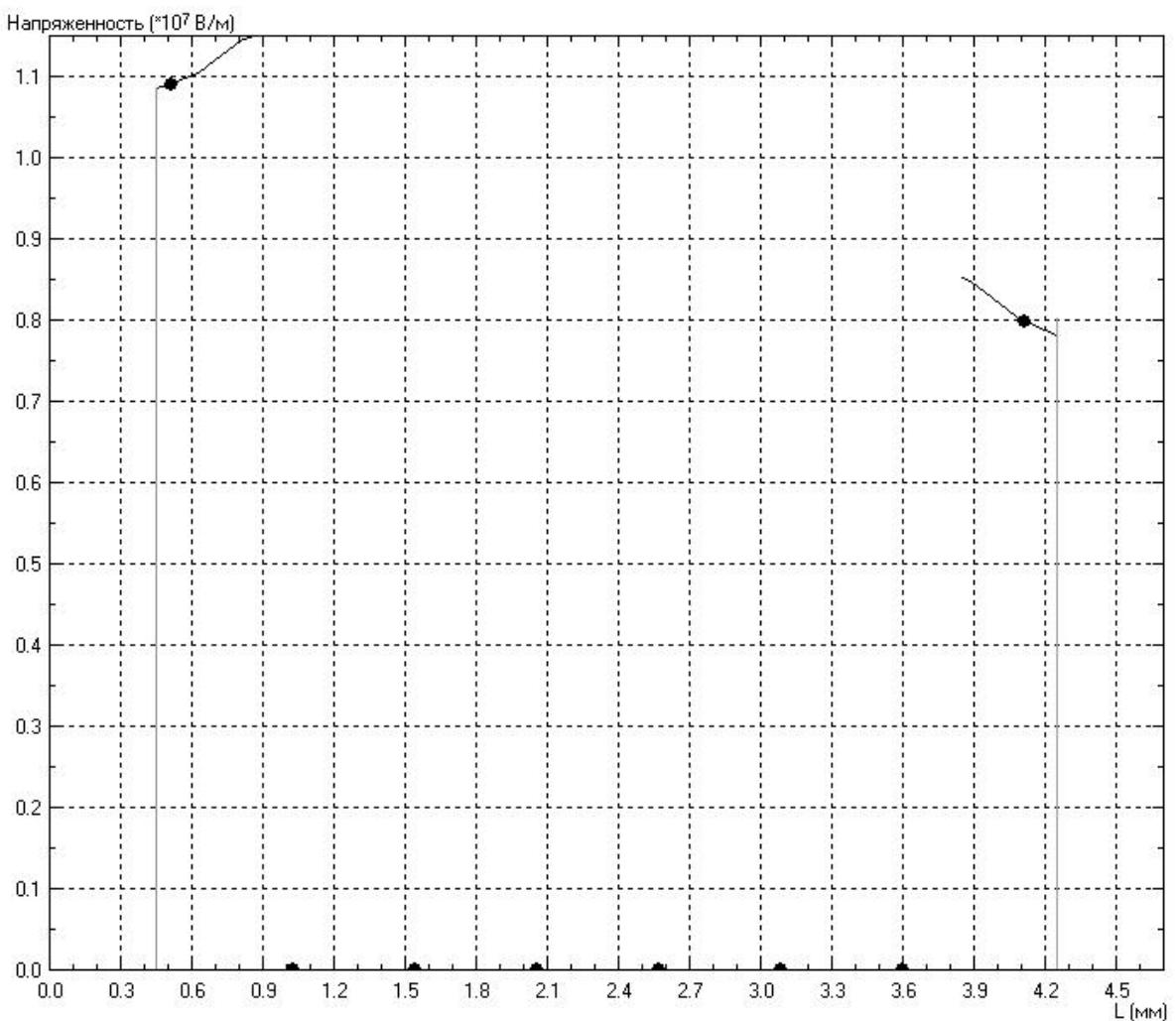


Рисунок 2.17 – распределение напряженности электрического поля в кабеле с дефектом круглого сечения

Вероятность возникновения дефекта такого размера в изоляции кабеля практически равна нулю, следовательно, было принято решение произвести моделирование электрического поля с несколькими дефектами с круглым сечением. Выявлено, что напряженность электрического поля в изоляции существенно зависит от расстояния между дефектами и их расстояния от токопроводящей жилы и экрана. Однако суммарный диаметр всех дефектов также должен быть соизмерим с толщиной изоляции для возникновения пробивной напряженности, соответственно такое условие также маловероятно.

Исходя из полученных результатов, было решено изменить форму дефекта в изоляции. Чаще всего дефект изоляции представляет собой древовидную структуру – дендрит [85], каналы которого могут быть заполнены водой или газом.

При этом, вероятность возникновения дендрита наиболее велика вблизи токопроводящей жилы, так как в этой области наиболее высокая напряженность электрического поля и температура, определяемая термическим действием тока в жиле.

Таким образом, принято решение производить моделирование с дефектом эллиптического сечения различных размеров. Важным условием, которое определяет величину напряженности электрического поля, является радиальный наибольший размер канала дендрита. В связи с этим, при моделировании электрического поля решено изменять только размер дефекта по радиусу изоляции кабеля.

Однако важным является тот факт, что при моделировании дефекта, прорастающего от токопроводящей жилы к экрану нельзя задавать его как эквипотенциальную поверхность, касающуюся жилы, так как в этом случае моделирование будет некорректным. В связи с этим, решено принять потенциал на поверхности дефекта равным потенциалу жилы, так как при частичном разряде разность потенциалов на поверхности дефекта будет сведена к нулю.

После проведения моделирования была получена картина электростатического поля в изоляции с дефектом (рисунки 2.18 и 2.19), способным вызвать пробой изоляции. Толщина эллиптического сечения дефекта принята 50 мкм.

Установлено, что для возникновения пробивной напряженности размер дефекта по радиусу должен составлять не менее 3 мм при толщине изоляции 3,8 мм и сечении токопроводящей жилы в  $70 \text{ mm}^2$ . При указанном размере дефекта напряженность электрического поля в изоляционном промежутке между острием дефекта и экраном кабеля выше пробивной напряженности, принятой равной 6 кВ/мм.

Исходя из полученных результатов, критерием возникновения пробоя изоляции является возникновение дефекта, радиальное измерение которого составляет не менее 78.9% от толщины изоляции. Полученные результаты будут использованы для уточнения статистической модели старения изоляции.

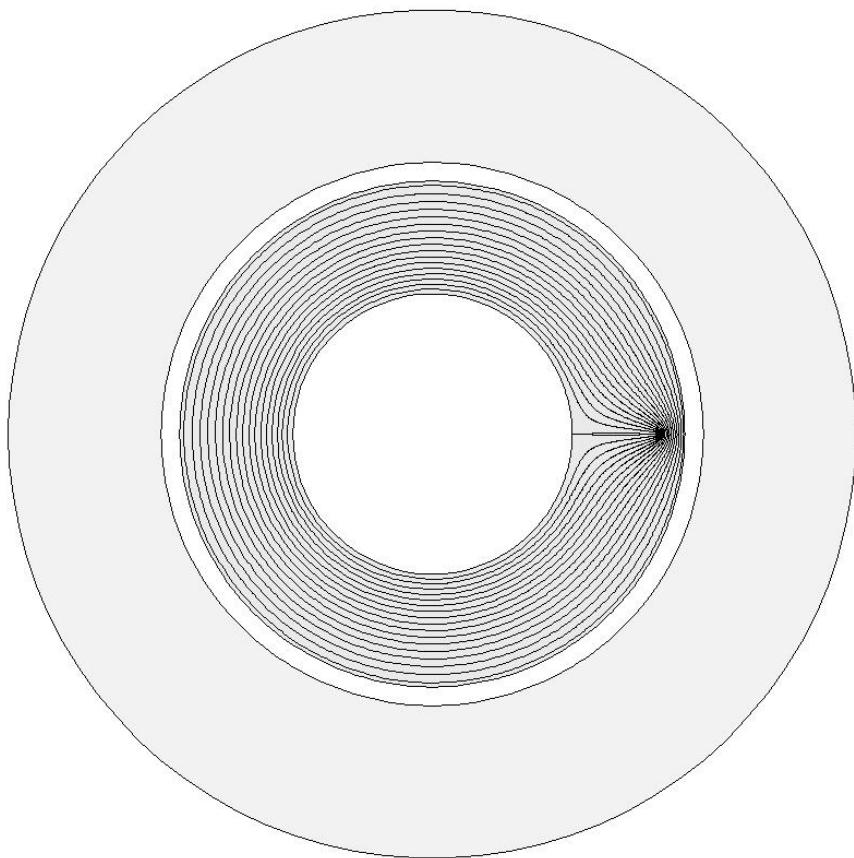


Рисунок 2.18 – Картина поля кабеля с дефектом.

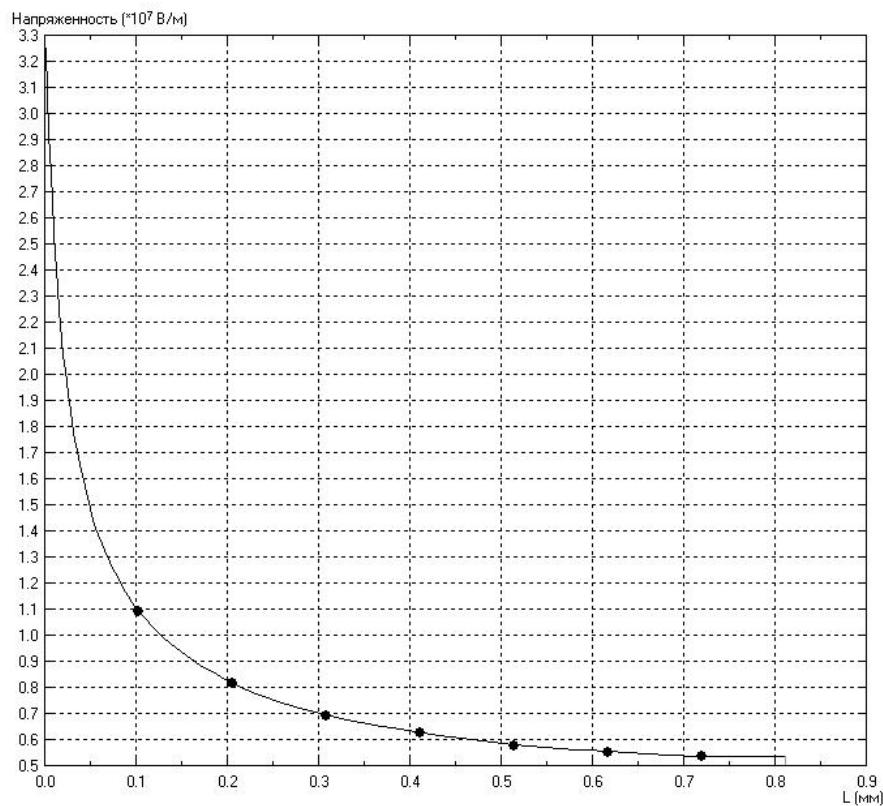


Рисунок 2.19 – Распределение напряженности электрического поля в изоляции кабеля в области между острием дефекта и экраном кабеля.

## 2.4 Разработка математической модели определения остаточного ресурса изоляции кабелей

В [86] была предложена математическая модель старения изоляции, в которой был произведен расчет вероятности пробоя изоляции в зависимости от степени разрушения материала. Для расчета брался срез изоляции размером 100x100 клеток. При этом с использованием случайной функции определялись координаты разрушенных клеток, и при разрушении на одной прямой 10 клеток из 100 считалось, что произошел пробой.

Недостатком модели [86], является то, что не учитывалось третье измерение изоляции. Для выполнения расчета в трех измерениях предлагается использовать параллелепипед со сторонами, пропорциональными размерам изоляции кабеля по длине, толщине и внутренней длине окружности изоляции. Использование такой формы позволит учесть возможность роста дендрита не только вдоль радиуса.

Для определения пропорциональности сторон необходимо рассчитать размеры каждой из них. Площадь сечения токопроводящей жилы равна  $70 \text{ мм}^2$ , отсюда, если считать жилу идеально круглой, длина окружности будет равна около 30 мм. Толщина изоляции составляет 3,8 мм. Для определения третьего размера необходимо знать возможное количество включений в объеме изоляции кабеля, которое, согласно [55], составляет от 0 до 5 на 200 грамм полиэтилена. Однако учитывая высокий уровень развития техники и технологий изготовления изоляции с момента выхода стандарта, примем для расчета одно включение на 200 грамм полиэтилена.

Тогда при плотности спитого полиэтилена  $940 \text{ кг}/\text{м}^3$ , объем изоляции для расчета равен  $212766 \text{ мм}^3$ . Исходя из объема и при известных двух других измерениях, третье измерение будет равно 2086 мм. Таким образом, для расчета получаем параллелепипед размерами  $3,4 \times 30 \times 2086 \text{ мм}$ .

Для расчета необходимо преобразовать полученный параллелепипед в трехмерный массив элементов для проведения расчета. Проводились расчеты с помощью разработанной программы Delphi. Размеры массивов менялись от минимально возможных ( $5 \times 44 \times 3067$ ) до максимально возможных, ограниченных

только максимальными значениями переменных (160x1408x98165). Результаты моделирования показали, что плотность вероятности пробоя изменяется по закону распределения Вейбулла, которое выражается формулой:

$$f = \left( \frac{k}{\lambda} \right) \left( \frac{x}{\lambda} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{x}{\lambda} \right)^k} \quad (2.12)$$

где  $k$  – коэффициент формы,  $\lambda$  – коэффициент масштаба.

Однако при увеличении размеров массива параметр распределения стремился к максимально возможному значению, соответствующему 79% разрушенных молекул. Этот факт объясняется отсутствием учета более высокой вероятности разрушения клетки в области, где уже началось разрушение.

Предлагается принять коэффициент масштаба  $\lambda = 0,63$  (63%), как параметра, используемого в расчете надежности электроэнергетических систем [87], а коэффициент формы  $k = 8$ , так как при этом значении при разрушении 79% материала вероятность пробоя, функция которой для распределений Вейбулла выражается формулой (2.13), стремится к единице (рисунок 2.20).

$$F = 1 - e^{-\left( \frac{x}{\lambda} \right)^k} \quad (2.13)$$

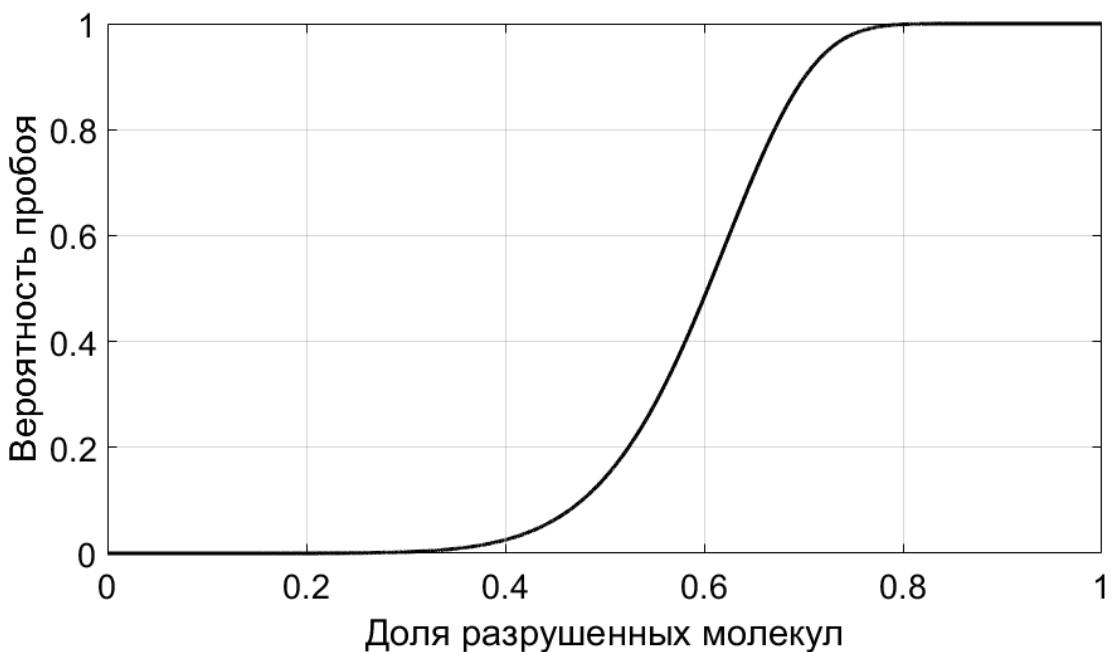


Рисунок 2.20 – Зависимость вероятности пробоя от доли разрушенных молекул изоляционного материала.

Полученный график зависимости вероятности пробоя изоляции от доли разрушенных молекул показал, что при разрушении материала до 35,5% вероятность пробоя составляет менее 1%, после чего начинает существенно увеличиваться. Таким образом, при разрушении материала до 35,5% велика вероятность безотказной работы изоляции. В области от 35,5% до 78% вероятность пробоя существенно возрастает, что говорит о возможности частого появления дефектов изоляции. Соответственно, не рекомендуется доводить степень разрушения материала до этой области и производить замену при разрушении порядка 35,5% молекул материала.

Однако разрушение материала до 78% может занять существенно более длительный срок, следовательно, возможно продолжать эксплуатировать кабель после разрушения 35,5% материала. Но в этом случае рекомендуется производить более тщательный контроль состояния изоляции, например, путем мониторинга характеристик частичных разрядов с целью прогнозирования пробоев изоляции.

Предлагается за основу расчета остаточного ресурса взять модель старения изоляции Г. С. Кучинского, согласно которой срок службы изоляции можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{cl} = AE^{-n} \exp\left(\frac{W_a}{kT}\right) \quad (2.14)$$

Согласно [4], срок службы изоляции определяется мощностью частичных разрядов и скоростью химических реакций при термической и термоокислительной деструкции изоляционного материала, определяемой законом С. А. Аррениуса.

Исходя учета энергетических воздействий на изоляцию кабелей, формулу (2.14) можно представить в виде [88]:

$$\tau_{cl} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot P_{QP} \cdot K_t(t)} \quad (2.15)$$

или:

$$\tau_{cl} = \frac{\ln \frac{N_t}{N_0}}{c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right)} \quad (2.16)$$

где  $N_t$  – количество молекул вещества в единице объема в данный момент времени,  $N_0$  – количество молекул вещества в единице объема до начала разрушения,  $P_{cp} = B \cdot E^n$  – мощность частичных разрядов,  $B$  – константа,  $E$  – напряженность электрического поля,  $n$  – показатель степени, зависящий от типа и структуры материала,  $K(T) = K_0 \cdot e^{(-W_a/kT)}$  – коэффициент скорости химических реакций при температуре в данный момент времени,  $K_0$  – константа скорости реакции закона Аррениуса,  $W_a$  – энергия активации,  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура в Кельвинах,  $c$  – умножающий коэффициент, определенный синергизмом воздействия температуры и электрического поля.

Расчет остаточного ресурса целесообразно производить по формуле (2.16), так как возможно увеличение мощности частичных разрядов в изоляции при образовании дефекта, что не всегда является условием необходимости замены кабеля по всей длине. Не учет этого фактора при расчете остаточного ресурса по формуле (2.15) может внести существенную погрешность в расчет.

При этом для расчета остаточного ресурса необходимо производить расчет количества неразрушенных молекул материала в заданном объеме вещества с целью определения степени его деградации. Исходя из формулы (2.16), количество неразрушенных молекул в данный момент времени при неизменных напряженности и температуре будет рассчитываться по формуле:

$$N_t = N_0 e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) \cdot t} \quad (2.17)$$

Учитывая условие, что с течением времени напряженность электрического поля и температура, как правило, хаотично меняются в условиях эксплуатации, необходимо производить расчет с разбивкой по времени (например, один раз в секунду). Учитывая, что функции изменения напряженности и температуры хаотичны, предлагается производить расчет по формуле:

$$N_t(t) = N_0 - \int_0^t v(t) dt \quad (2.18)$$

где  $v(t)$  – функция скорости разрушения материала под совокупным воздействием факторов, разрушающих изоляцию, которую можно определить по формуле:

$$v(t) = -\frac{dN_t}{dt} = c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) \cdot N_0 \cdot e^{-c \cdot B \cdot E^n \cdot K_0 \cdot \exp\left(-\frac{W_a}{kT}\right) \cdot t} \quad (2.19)$$

Далее для решения задачи прогнозирования износа изоляции требуется произвести экстраполяцию функции  $N_t(t)$  по данным, накопленным в течение определенного времени. Учитывая цикличность процессов, происходящих в электроэнергетической системе, предполагается, что функция сохранит экспоненциальный характер. Кроме того, для учета сезонного фактора нагрузок, предполагается, что время накопления статистических данных для получения прогноза относительно высокой точности составляет не менее года.

Экстраполяцию предлагается производить методом подбора функции. Учитывая экспоненциальный характер функции, можно представить ее в виде:

$$N = N_0 e^{b \cdot t} \quad (2.20)$$

где  $b$  – параметр экспоненциальной эмпирической зависимости.

Определение параметров функции производится методом наименьших квадратов, суть которого заключается в сведении к минимуму расчетных значений от значений эмпирического ряда. Задача нахождения параметров функции сводится к системе уравнений линейной аппроксимации. Для этой цели уравнение (2.20) логарифмируется:

$$\ln N = \ln N_0 + bt \quad (2.21)$$

Затем производится замена, в данном случае предлагается заменить:

$$N' = \ln N$$

Тогда уравнение (2.21) можно представить в виде:

$$N' = \ln N_0 + bt \quad (2.22)$$

Исходя из полученного уравнения и согласно методу наименьших квадратов, нахождение параметра  $b$  сводится к решению уравнения:

$$b \sum_{i=1}^n t_i + n \ln N_0 = \sum_{i=1}^n N'_i \quad (2.23)$$

где  $n$  – количество эмпирических значений.

После нахождения параметра необходимо рассчитать время до безотказной работы изоляции и время до ее полного износа. Так как было рассчитано, что изоляция будет работать без отказов при разрушении до 35.5%, значит соотношение  $N_t/N_0 = 0.645$ . Тогда, исходя из формулы (2.20), получим, что расчетный срок безотказной работы изоляции составит:

$$\tau_{bp} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0.645}{b} = \frac{0.4385}{-b} \quad (2.24)$$

При известном расчетном сроке безотказной работы изоляции и времени в эксплуатации, остаточный срок безотказной работы можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{остбр} = \tau_{bp} - \tau_{экспл} \quad (2.25)$$

Для расчета времени до полного износа изоляции требуется рассчитать время до разрушения 78% материала, следовательно, расчет будет производиться исходя из условия  $N_t/N_0 = 0.22$ :

$$\tau_{cl} = \frac{\ln \frac{N}{N_0}}{b} = \frac{\ln 0.22}{b} = \frac{1.514}{-b} \quad (2.26)$$

При известном расчетном сроке службы изоляции и времени в эксплуатации, остаточный ресурс можно рассчитать по формуле:

$$\tau_{ост} = \tau_{cl} - \tau_{экспл} \quad (2.27)$$

## 2.5 Моделирование расчета остаточного срока службы изоляции кабелей в известном режиме эксплуатации

В данном подразделе предложен пример расчета остаточного ресурса изоляции кабеля на основе известных данных о температуре изоляции и напряжении кабеля. Данные о температуре и напряжении задавались случайным образом с учетом суточной динамики изменения потребления электроэнергии, однако такого расчета достаточно, чтобы показать пример работы математической модели и спрогнозировать износ изоляции.

Данные, использованные для расчета, представлены в таблице 2.2 и на графиках (рисунки 2.21 и 2.22).

**Таблица 2.2 – Данные о температуре и напряжении кабеля для прогнозирования остаточного ресурса.**

t, ч	T, °C	U, кВ	t, ч	T, °C	U, кВ	t, ч	T, °C	U, кВ	t, ч	T, °C	U, кВ
1	35	6.05	43	55	6	85	50	5.9	127	20	6.15
2	30	6.1	44	50	6	86	60	5.85	128	20	6.1
3	25	6.1	45	40	6	87	70	5.85	129	20	6.1
4	20	6.15	46	40	6	88	80	5.85	130	30	6
5	20	6.15	47	40	6	89	70	5.85	131	40	5.95
6	20	6.15	48	40	6	90	60	5.9	132	50	5.9
7	20	6.15	49	35	6.05	91	55	6	133	50	5.9
8	20	6.1	50	30	6.1	92	50	6	134	60	5.85
9	20	6.1	51	25	6.1	93	40	6	135	70	5.85
10	30	6	52	20	6.15	94	40	6	136	80	5.85
11	40	5.95	53	20	6.15	95	40	6	137	70	5.85
12	50	5.9	54	20	6.15	96	40	6	138	60	5.9
13	50	5.9	55	20	6.15	97	35	6.05	139	55	6
14	60	5.85	56	20	6.1	98	30	6.1	140	50	6
15	70	5.85	57	20	6.1	99	25	6.1	141	40	6

16	80	5.85	58	30	6	100	20	6.15	142	40	6
17	70	5.85	59	40	5.95	101	20	6.15	143	40	6
18	60	5.9	60	50	5.9	102	20	6.15	144	40	6
19	55	6	61	50	5.9	103	20	6.15	145	35	6.05
20	50	6	62	60	5.85	104	20	6.1	146	30	6.1
21	40	6	63	70	5.85	105	20	6.1	147	25	6.1
22	40	6	64	80	5.85	106	30	6	148	20	6.15
23	40	6	65	70	5.85	107	40	5.95	149	20	6.15
24	40	6	66	60	5.9	108	50	5.9	150	20	6.15
25	35	6.05	67	55	6	109	50	5.9	151	20	6.15
26	30	6.1	68	50	6	110	60	5.85	152	20	6.1
27	25	6.1	69	40	6	111	70	5.85	153	20	6.1
28	20	6.15	70	40	6	112	80	5.85	154	30	6
29	20	6.15	71	40	6	113	70	5.85	155	40	5.95
30	20	6.15	72	40	6	114	60	5.9	156	50	5.9
31	20	6.15	73	35	6.05	115	55	6	157	50	5.9
32	20	6.1	74	30	6.1	116	50	6	158	60	5.85
33	20	6.1	75	25	6.1	117	40	6	159	70	5.85
34	30	6	76	20	6.15	118	40	6	160	80	5.85
35	40	5.95	77	20	6.15	119	40	6	161	70	5.85
36	50	5.9	78	20	6.15	120	40	6	162	60	5.9
37	50	5.9	79	20	6.15	121	35	6.05	163	55	6
38	60	5.85	80	20	6.1	122	30	6.1	164	50	6
39	70	5.85	81	20	6.1	123	25	6.1	165	40	6
40	80	5.85	82	30	6	124	20	6.15	166	40	6
41	70	5.85	83	40	5.95	125	20	6.15	167	40	6
42	60	5.9	84	50	5.9	126	20	6.15	168	40	6

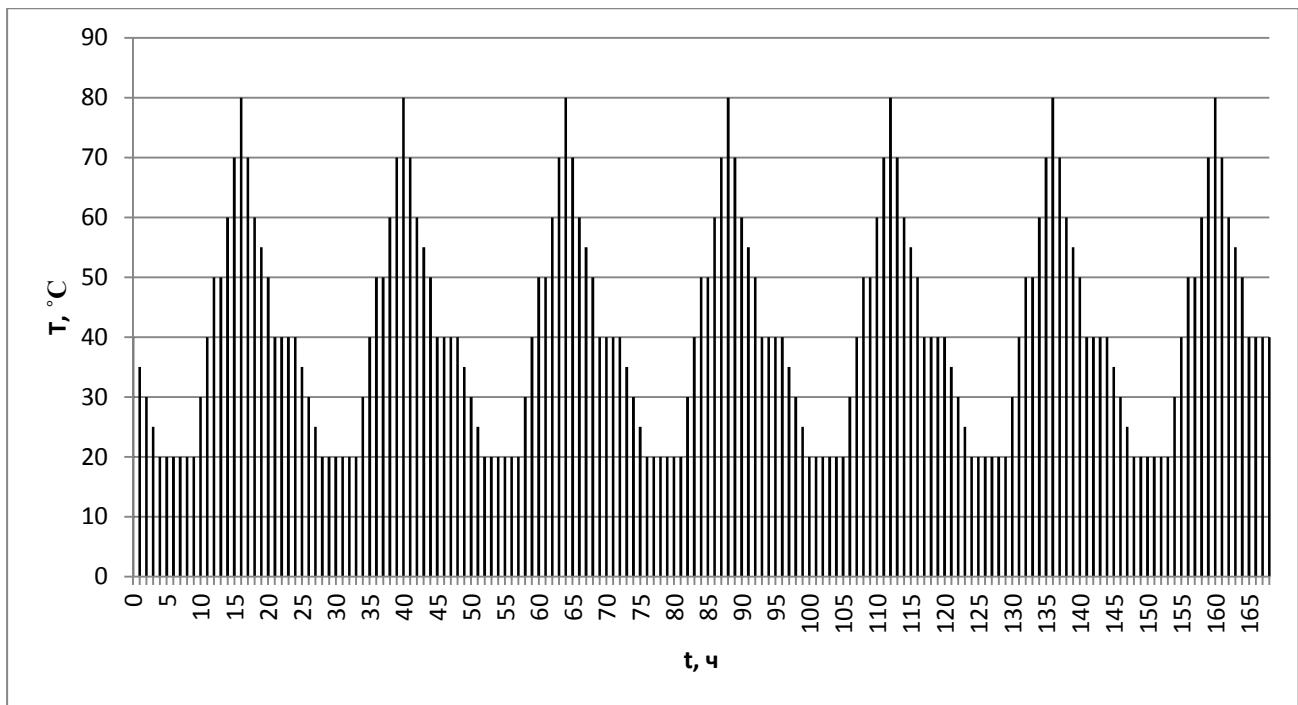


Рисунок 2.21 – График температуры изоляции.

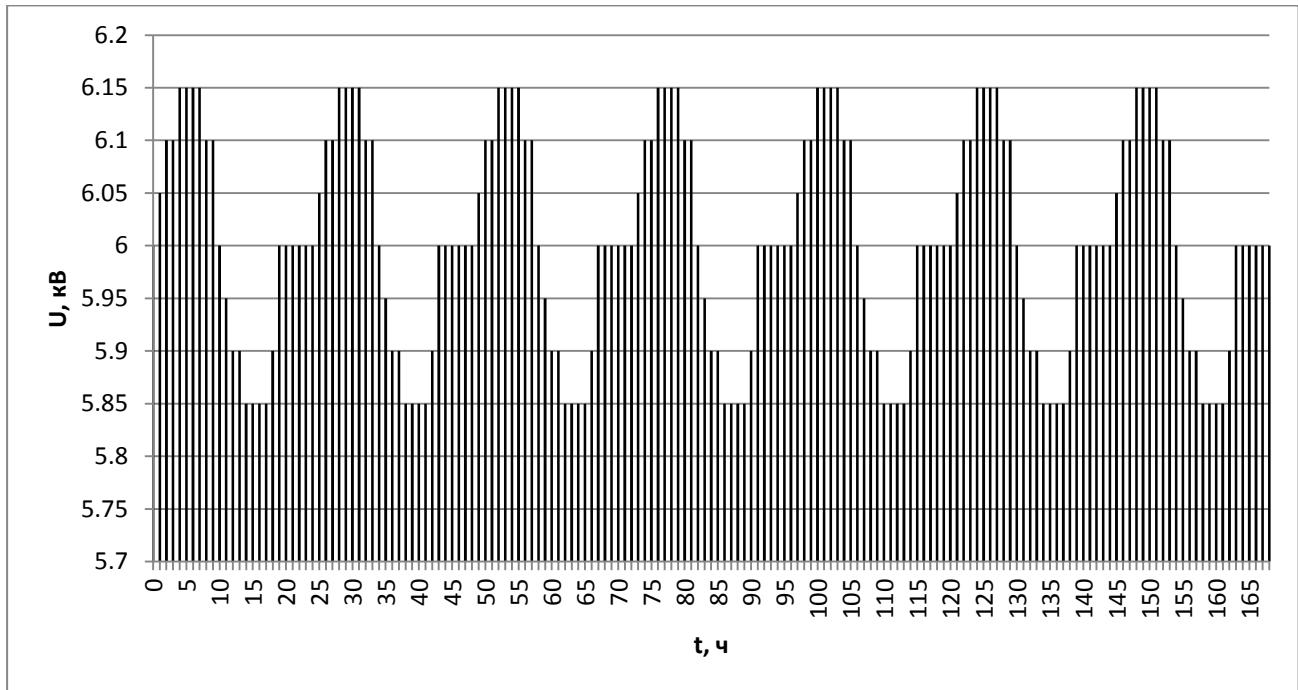


Рисунок 2.22 – График напряжения на изоляции кабеля.

Для расчета остаточного срока службы требуется знать все параметры модели старения изоляции для определения скорости разрушения материала (формула (2.19)).

Константу скорости реакции можно определить по графику Аррениуса для процесса термодеструкции полиэтилена (рисунок 2.23).

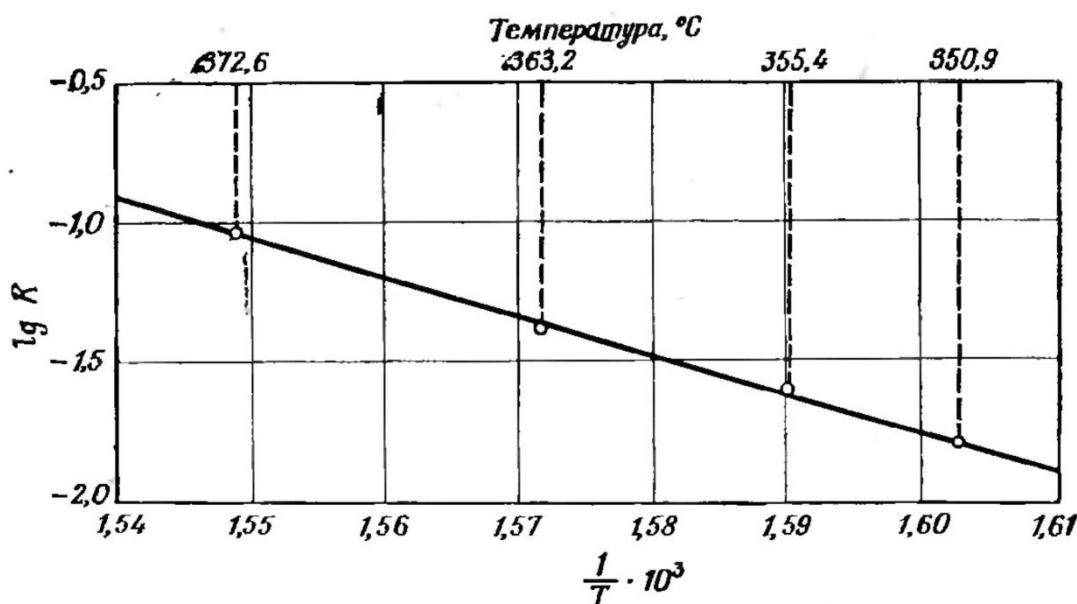


Рисунок 2.23 – График Аррениуса для процесса термической деструкции полиэтилена [89].

Для определения зависимости константы скорости реакции от температуры необходимо знать уравнение прямой, представленной на рисунке 2.22. Для этого нужно знать координаты двух точек, через которые проходит прямая.

Примем, что прямая проходит через точки с координатами (0,001548;-1,05) и (0,00159;-1,7). Согласно уравнению прямой, проходящей через две точки, получим:

$$\frac{\frac{1}{T} - 0.001548}{0.00159 - 0.001548} = \frac{\lg K_t(T) + 1.05}{-1.7 + 1.05}$$

Отсюда:

$$\lg K_t(T) = -15476 \cdot \frac{1}{T} + 22.9 \quad (2.28)$$

где  $T$  – температура в Кельвинах.

Однако константа скорости реакции выражена в экспоненциальной форме, значит формулу (2.26) следует преобразовать:

$$\ln K_t(T) = -6721 \cdot \frac{1}{T} + 9.945 \quad (2.29)$$

Отсюда

$$K_t(T) = e^{-6721 \cdot \frac{1}{T} + 9.945} \quad (2.32)$$

Или

$$K_t(T) = 20854 e^{-6721 \cdot \frac{1}{T}} \quad (2.31)$$

Также необходимо определить параметры формулы мощности частичных разрядов:

$$P_{QP} = B \cdot E^n \quad (2.32)$$

Параметры формулы определялись эмпирически путем измерения мощности частичных разрядов на разных уровнях напряжения в процессе экспериментальных исследований процесса старения изоляции. Значения параметров изменялись в процессе старения, однако в модели предлагается взять усредненные значения:  $B = 5.536 \cdot 10^{-35}$  и  $n = 5$ . Более подробно определение параметров описано в подразделе 3.5 главы 3.

Параметр  $c$ , определяющий синергизм воздействия теплового и электрического полей принят равным 0.01.  $N_0$  примем равным числу Авогадро  $6.022 \cdot 10^{23}$

Подставив полученные параметры в формулу скорости разрушения (2.19), получим:

$$v(t) = 0.01 \cdot 5.536 \cdot 10^{-35} \cdot E^5 \cdot 20854 e^{-6721 \cdot \frac{1}{T} \cdot 6.022 \cdot 10^{23}} \cdot e^{-0.01 \cdot 5.536 \cdot 10^{-35} \cdot E^5 \cdot 20854 e^{-6721 \cdot \frac{1}{T} \cdot t}} \quad (2.33)$$

Используя формулу (2.31), графики температуры и напряжения (рисунки 2.21 и 2.22) и значения параметров (таблица 2.2) был произведен расчет и получена функция изменения количества неразрушенных молекул материала

Для полученной эмпирической функции был произведен подбор экспоненциальной расчетной функции с помощью инструмента Curve Fitting Tool пакета программ Matlab 2016 (рисунок 2.25) и получена следующая расчетная зависимость:

$$N = 6.022 \cdot 10^{23} \cdot e^{-0.000001264 \cdot t} \quad (2.34)$$

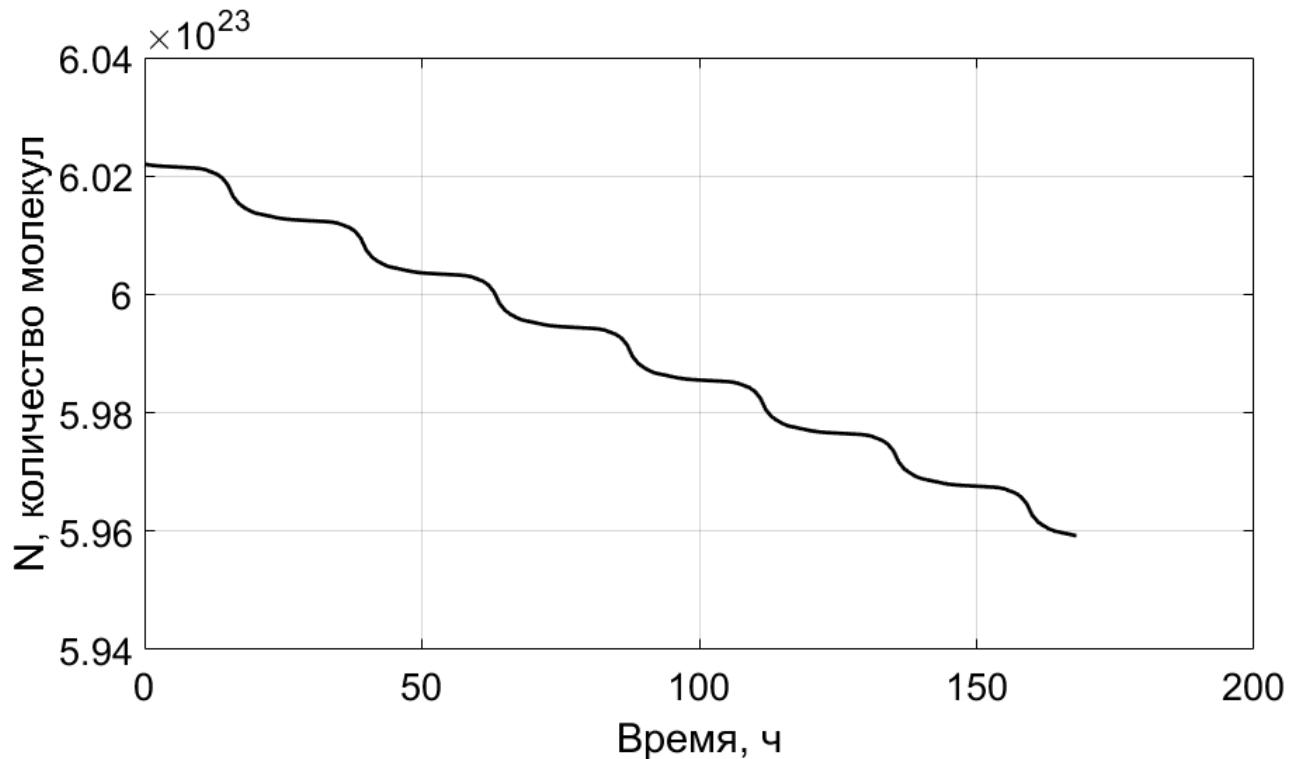


Рисунок 2.24 – График изменения количества неразрушенных молекул материала в процессе эксплуатации.

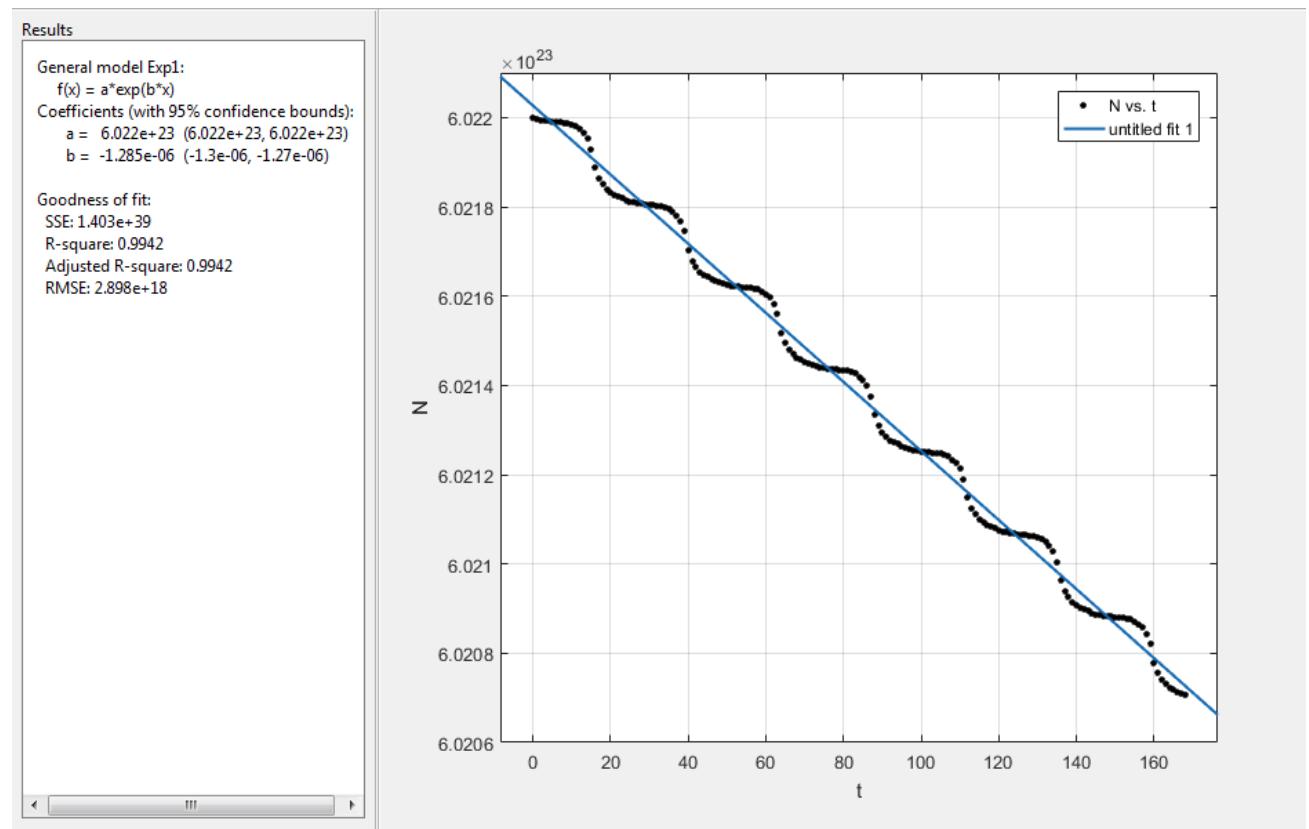


Рисунок 2.25 – Результат определения коэффициентов в Matlab.

Исходя из формулы (2.24), срок безотказной работы изоляции составляет:

$$\tau_{bp} = \frac{0.4385}{0.000001285} = 341245 \text{ч} \approx 39 \text{ лет} \quad (2.35)$$

Остаточный срок безотказной работы, согласно (2.25), равен:

$$\tau_{остбр} = \tau_{bp} - \tau_{экспл} = 341245 - 168 = 341077 \text{ч} \approx 38.9 \text{ лет} \quad (2.36)$$

Срок службы изоляции до ее полного износа составляет (2.26):

$$\tau_{cl} = \frac{1.514}{0.000001285} = 1178308 \text{ч} \approx 134.5 \text{ лет} \quad (2.37)$$

Остаточный ресурс, согласно (2.27), равен:

$$\tau_{ост} = \tau_{cl} - \tau_{экспл} = 1178308 - 168 = 1178140 \text{ч} \approx 134.49 \text{ лет} \quad (2.38)$$

## 2.6 Выводы

1. Анализ конструкции кабеля показал, что для расчета остаточного ресурса изоляции достаточно учитывать воздействия температуры и электрического поля на изоляцию;
2. Рассмотрены известные модели старения изоляции. За основу расчета принята модель Кучинского Г. С., так как она основывается на энергетических воздействиях на изоляцию;
3. Разработана математическая модель расчета остаточного ресурса изоляции кабеля, использование которой позволит спрогнозировать износ изоляции;
4. Рассмотренный пример расчета остаточного ресурса изоляции кабеля говорит о возможности использования математической модели в устройстве мониторинга остаточного ресурса изоляции.

### 3 Экспериментальные исследования процессов старения изоляции кабелей 6-10 кВ

#### 3.1 Описание измерений частичных разрядов для оценки состояния изоляции кабелей

Измерение и контроль характеристик частичных разрядов является эффективным современным инструментом для диагностики состояния изоляции кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена [4,6,45,90,91].

Для измерения частичных разрядов было решено использовать общепринятую мостовую схему измерения ЧР (рисунок 3.1) [4,6,16], так как ее правильная настройка позволяет отфильтровать помехи сети и анализировать только сигналы частичных разрядов. На схеме  $C_1$  – объект измерения,  $C_2$  – измерительный конденсатор,  $R_1$  и  $R_2$  – сопротивления схемы измерения,  $R_{заш}$  – защитное сопротивление трансформатора ТН.

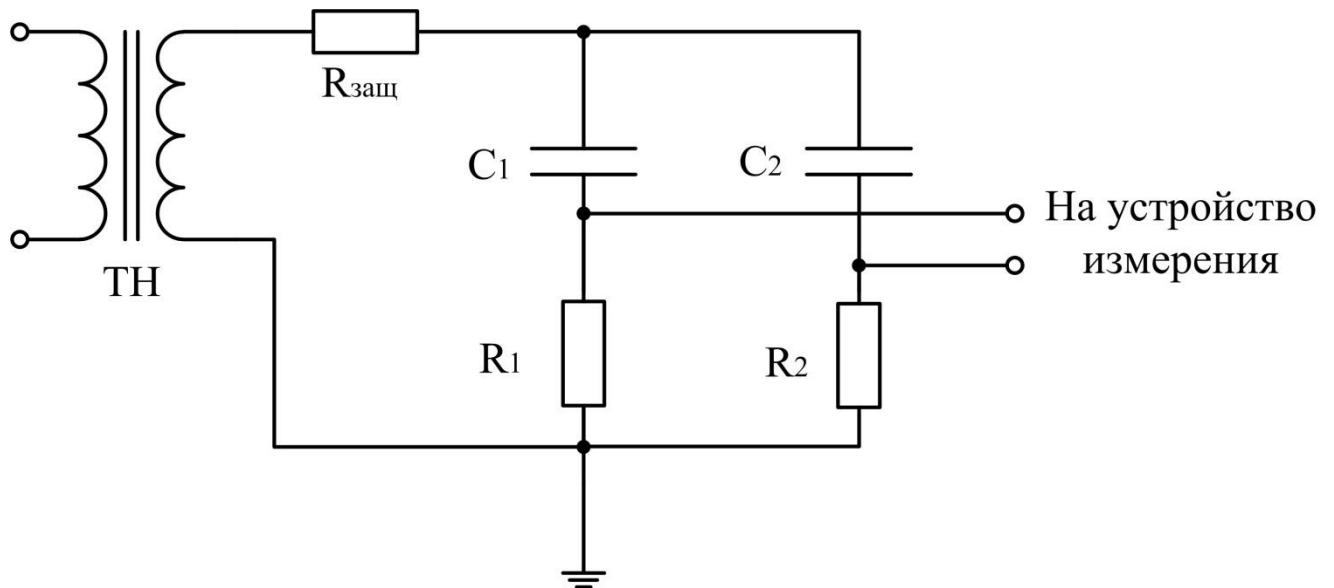


Рисунок 3.1 – Мостовая схема регистрации частичных разрядов.

Для правильной настройки схемы требуется составить и решить систему дифференциальных уравнений, так как частичный разряд фактически является переходным процессом по причине изменения заряда изоляции. В данном случае следует учесть сопротивление и емкость измерительных кабелей. Тогда схема

(рисунок 3.1) преобразуется, представленному на рисунке 3.2.  $R_3$ ,  $R_4$ ,  $C_3$ ,  $C_4$  – параметры схем замещения измерительных кабелей.

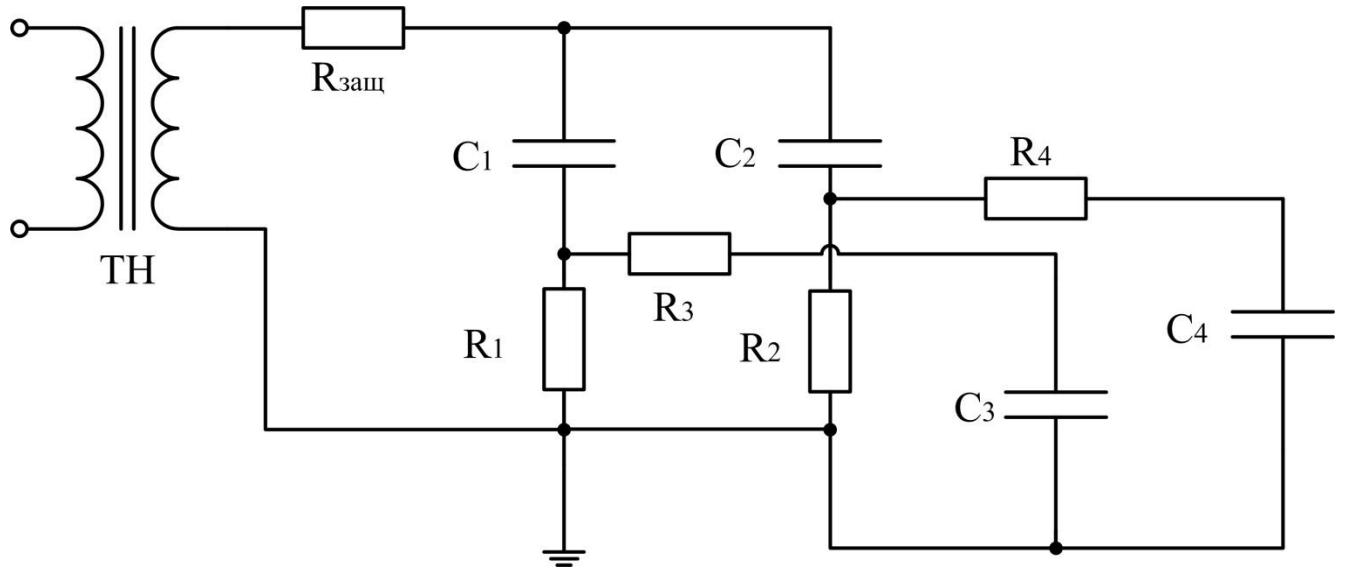


Рисунок 3.2 – Мостовая схема регистрации частичных разрядов с учетом параметров измерительных кабелей.

Для расчета схемы требуется составить систему дифференциальных уравнений и решить ее относительно напряжений на емкостях  $C_3$ ,  $C_4$ , так как мгновенные значения этих напряжений должны быть одинаковы по модулю и по знаку для фильтрации внешних помех. Для составления системы уравнений произведем преобразование схемы (рисунок 3.3).

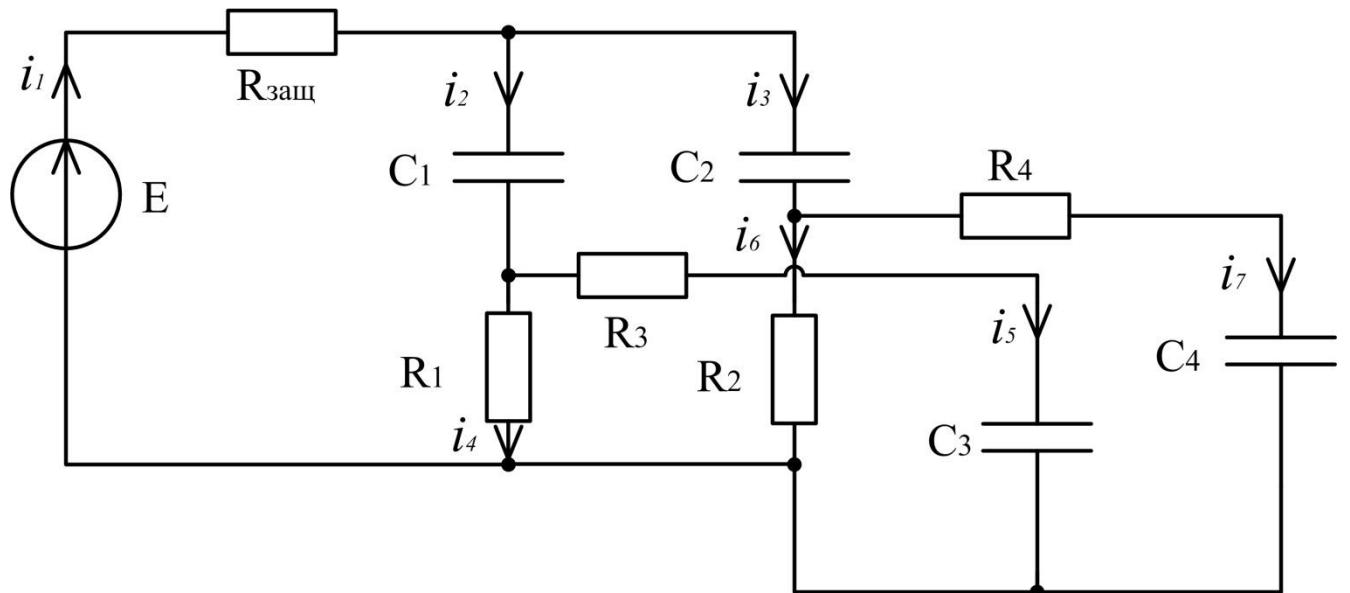


Рисунок 3.3 – Мостовая схема регистрации частичных разрядов с учетом параметров измерительных кабелей для составления системы уравнений.

Система уравнений, составленная по законам Кирхгофа, сводящаяся к системе дифференциальных уравнений, имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_1 = i_2 + i_3 \\ i_2 = i_4 + i_5 \\ i_3 = i_6 + i_7 \\ i_4 R_1 = i_5 R_3 + u_{C_3} \\ i_6 R_2 = i_7 R_4 + u_{C_4} \\ u_{C_1} + i_4 R_1 + i_1 R_{заш} = E \\ u_{C_2} + i_6 R_2 = u_{C_1} + i_4 R_1 \end{array} \right. \quad (3.1)$$

Для составления системы дифференциальных уравнений производятся следующие замены:

$$\left\{ \begin{array}{l} i_2 = C_1 \frac{du_{C_1}}{dt} \\ i_3 = C_2 \frac{du_{C_2}}{dt} \\ i_5 = C_3 \frac{du_{C_3}}{dt} \\ i_7 = C_4 \frac{du_{C_4}}{dt} \end{array} \right. \quad (3.2)$$

После подстановления замен, сведения системы к дифференциальным уравнениям и выражения производных для решения, результатом является следующая система уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_{C_1}}{dt} = \frac{C_3}{C_1} \left( 1 + \frac{R_3}{R_1} \right) \frac{du_{C_3}}{dt} + \frac{u_{C_3}}{R_1 C_1} \\ \frac{du_{C_2}}{dt} = \left[ C_4 \frac{du_{C_4}}{dt} \left( 1 + \frac{R_4}{R_2} \right) + \frac{u_{C_4}}{R_2} \right] \frac{1}{C_0} \\ \frac{du_{C_3}}{dt} = \left[ E - \left( C_1 \frac{du_{C_1}}{dt} + C_2 \frac{du_{C_2}}{dt} \right) R_{заш} - u_{C_3} - u_{C_1} \right] \frac{1}{R_3 C_3} \\ \frac{du_{C_4}}{dt} = \left( C_3 \frac{du_{C_3}}{dt} R_3 + u_{C_1} + u_{C_2} + u_{C_3} + u_{C_4} \right) \frac{1}{R_4 C_4} \end{array} \right. \quad (3.3)$$

Полученная система решалась в пакете программ Matlab и Matlab/Simulink (рисунок 3.4) с различными параметрами схемы. Было принято, что емкости

измерительных кабелей намного меньше емкости силового кабеля, активные сопротивления измерительных кабелей также намного меньше сопротивлений схемы измерения. Решение системы уравнений проводилось с использованием метода Рунге-Кутта 4 и 5 порядка с помощью функции ode45. Особенностью регистрации частичных разрядов в кабеле в реальных условиях является небольшое сопротивление  $R_1$ . При уменьшении сопротивления возникали сложности с расчетом с использованием функции ode45, предположительно, по причине жесткости системы уравнений. Проблема была решена использованием функции для жестких систем ode15s.

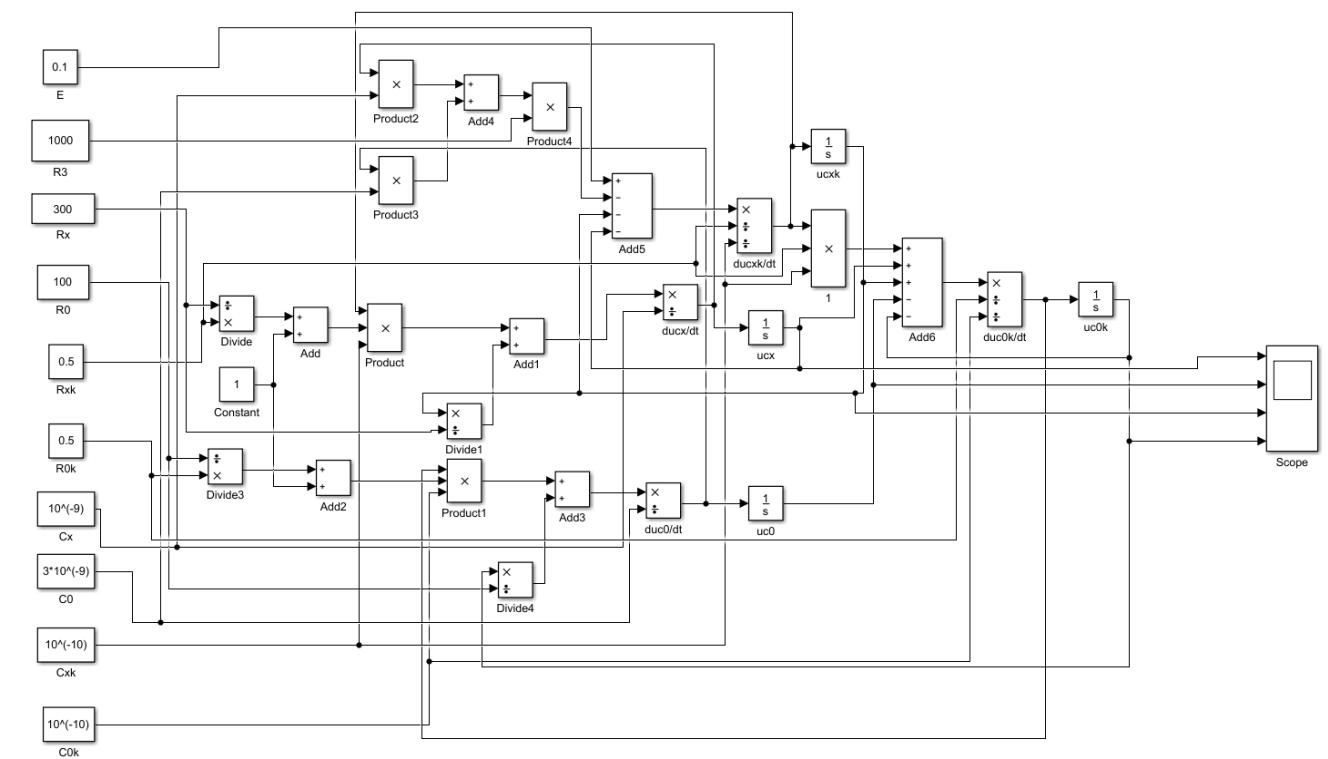


Рисунок 3.4 – Модель расчета системы дифференциальных уравнений Matlab/Simulink.

Полученные результаты расчета показали, что необходимым условием балансировки плеч моста для фильтрации внешних помех является равенство постоянных времени плеч моста ( $R_1C_1 = R_2C_2$ ). Пример расчета

несбалансированного моста представлен на рисунках 3.5 и 3.6, для сбалансированного моста – на рисунках 3.7 и 3.8.

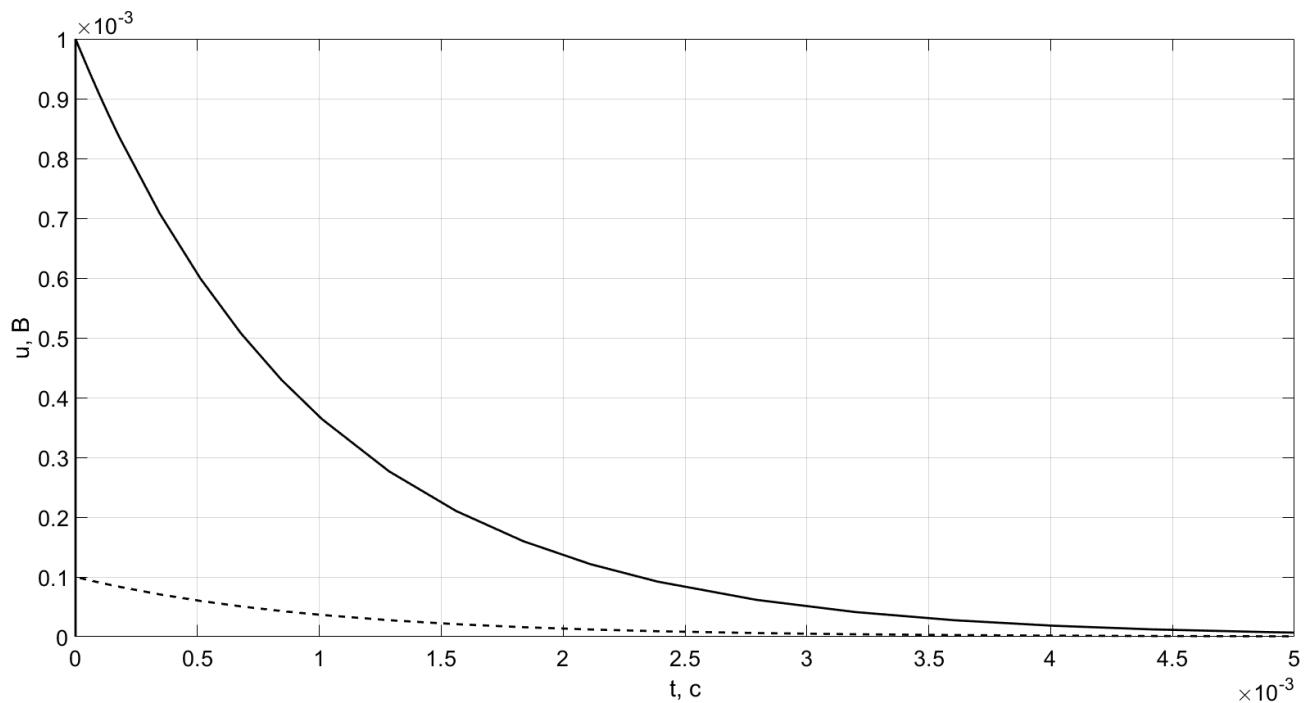


Рисунок 3.5 – Результат расчета напряжений на конденсаторах  $C_3$  и  $C_4$  для несбалансированного моста в Matlab.

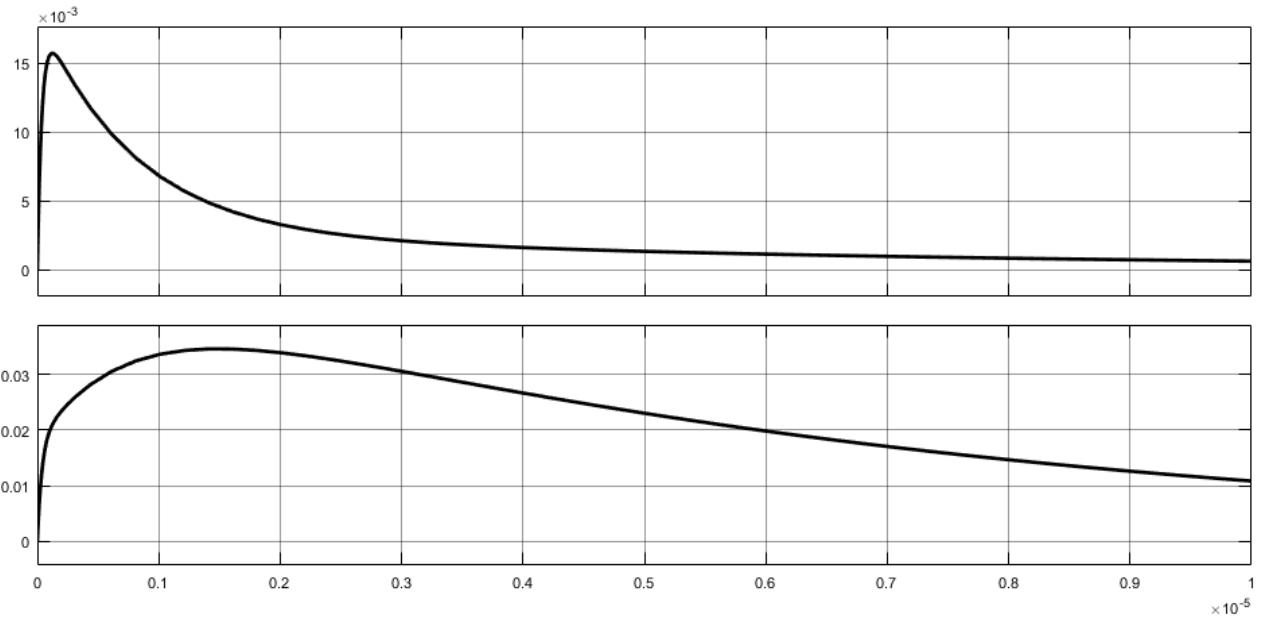


Рисунок 3.6 – Результат расчета напряжений на конденсаторах  $C_3$  и  $C_4$  для несбалансированного моста в Matlab/Simulink.

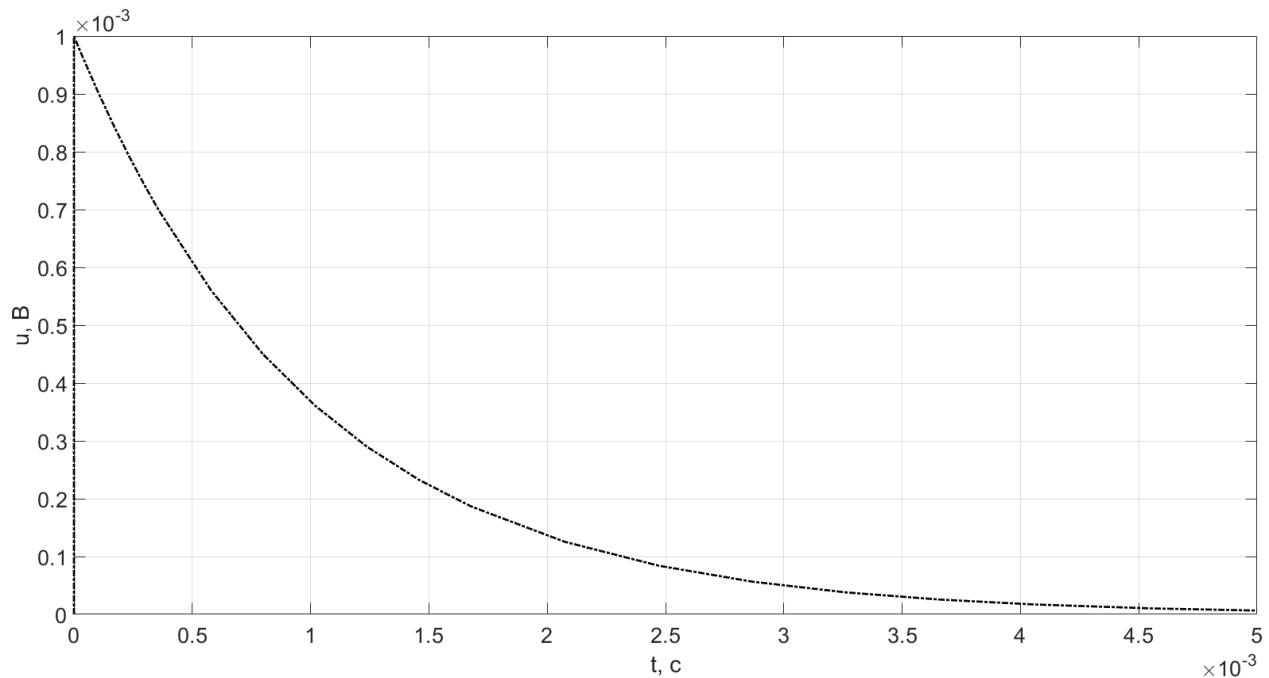


Рисунок 3.7 – Результат расчета напряжений на конденсаторах  $C_3$  и  $C_4$  для сбалансированного моста в Matlab/Simulink (полное совпадение кривых).

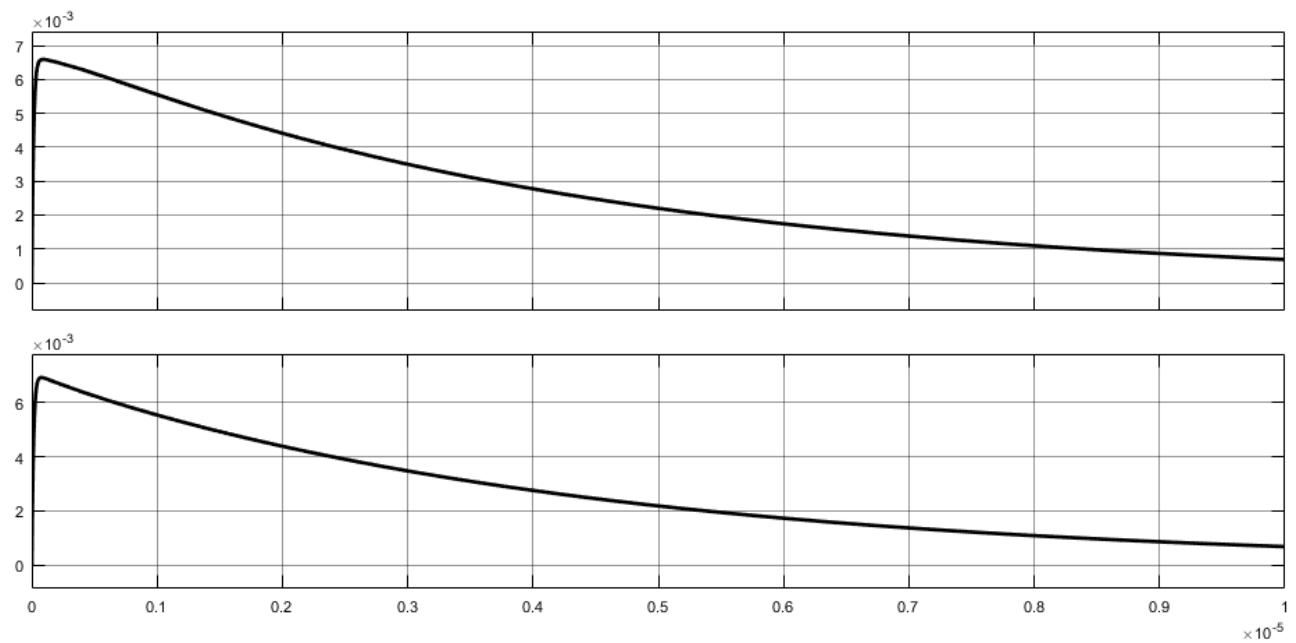


Рисунок 3.8 – Результат расчета напряжений на конденсаторах  $C_3$  и  $C_4$  для сбалансированного моста в Matlab/Simulink (полное совпадение кривых).

Следующим шагом в расчете схемы является расчет напряжений на конденсаторах  $C_3$  и  $C_4$  в процессе частичного разряда. Учитывая, что этот процесс намного быстрее, чем процесс перезаряда изоляции под воздействием сетевого напряжения, можно считать, что в схеме происходит только разряд конденсатора  $C_1$ . Ветвь с обмоткой трансформатора не учитывается, так как для короткого импульса частичного разряда она обладает очень большим сопротивлением из-за большой индуктивности. Тогда схема для расчета частичного разряда представлена на рисунке 3.9.

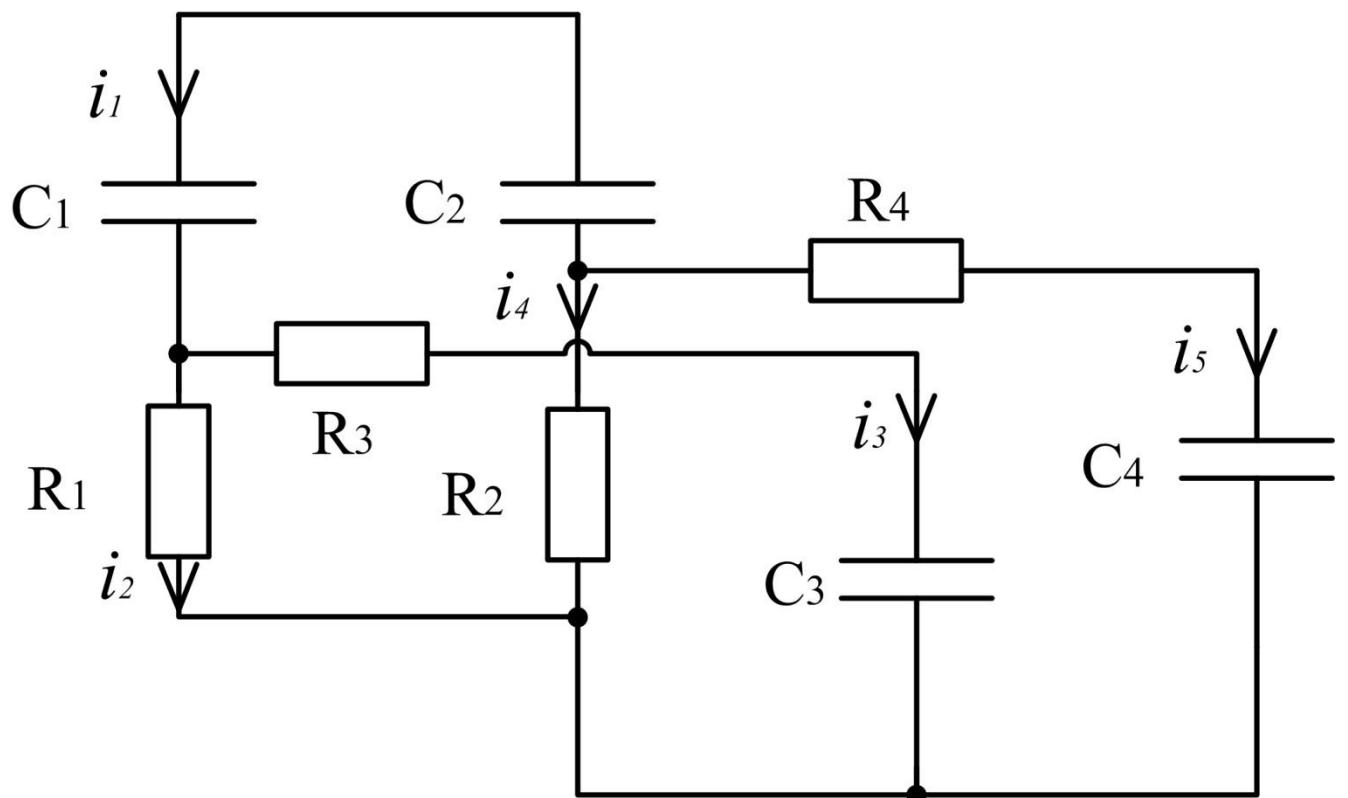


Рисунок 3.9 – Мостовая схема регистрации ЧР для расчета напряжений на конденсаторах  $C_3$  и  $C_4$  под воздействием частичного разряда.

Несмотря на то, что процесс частичного разряда рассматривается как разряд конденсатора  $C_1$ , конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  можно преобразовать в один эквивалентный с тем же зарядом, который был у конденсатора  $C_1$ . Тогда схему (рисунок 3.9) необходимо преобразовать в схему с одним эквивалентным конденсатором (рисунок 3.10).

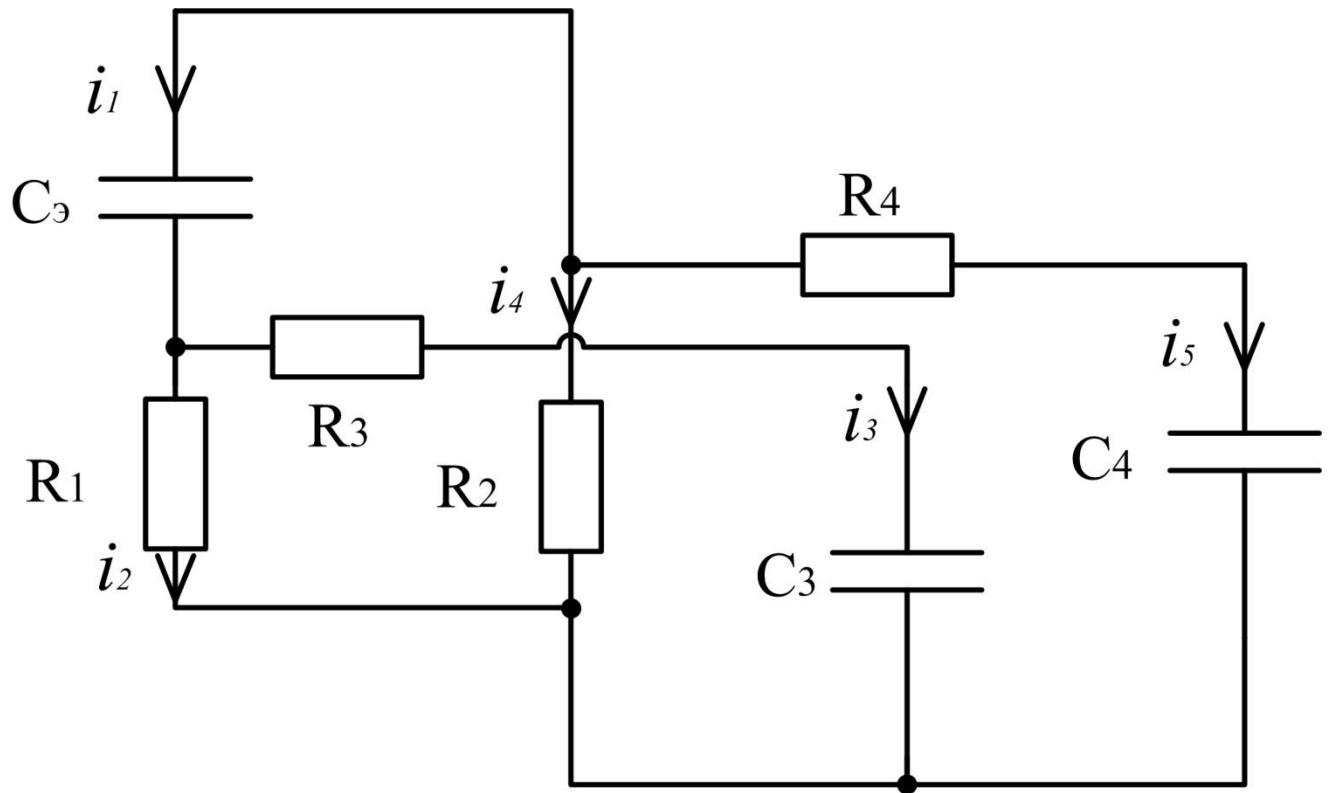


Рисунок 3.10 – Мостовая схема регистрации ЧР для расчета напряжений на конденсаторах  $C_3$  и  $C_4$  под воздействием частичного разряда.

Система уравнений для схемы (рисунок 3.10) записывается следующим образом:

$$\begin{cases} i_1 = i_2 + i_3 \\ i_2 = -i_4 - i_5 \\ u_{C_3} + i_2 R_1 - i_4 R_2 = 0 \\ i_2 R_1 = i_3 R_3 + u_{C_3} \\ i_4 R_2 = i_5 R_4 + u_{C_4} \end{cases} \quad (3.4)$$

После преобразования системы уравнений (3.4) для решения в Matlab, система будет иметь вид (3.5). Для решения системы уравнений была составлена программа Matlab. Результат расчета системы уравнений (3.5) в Matlab представлен на рисунке 3.11. Из рисунка 3.11 видно, что при частичном разряде токи в ветвях сбалансированного моста равны по модулю и противоположны по знаку, что говорит о том, что частичный разряд будет зарегистрирован при подключении объекта измерения в диагональ моста.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{du_{C_9}}{dt} = \left[ C_4 \left( 1 + \frac{R_4}{R_2} \right) \frac{du_{C_4}}{dt} + \frac{u_{C_4}}{R_2} \right] \frac{1}{C_9} \\ \frac{du_{C_3}}{dt} = \left( C_9 \frac{du_{C_9}}{dt} + \frac{u_{C_3}}{R_1} \right) \frac{1}{C_3 \left( -1 - \frac{R_3}{R_1} \right)} \\ \frac{du_{C_4}}{dt} = \left( C_3 R_3 \frac{du_{C_3}}{dt} - u_{C_9} + u_{C_3} - u_{C_4} \right) \frac{1}{C_4 R_4} \end{array} \right. \quad (3.5)$$

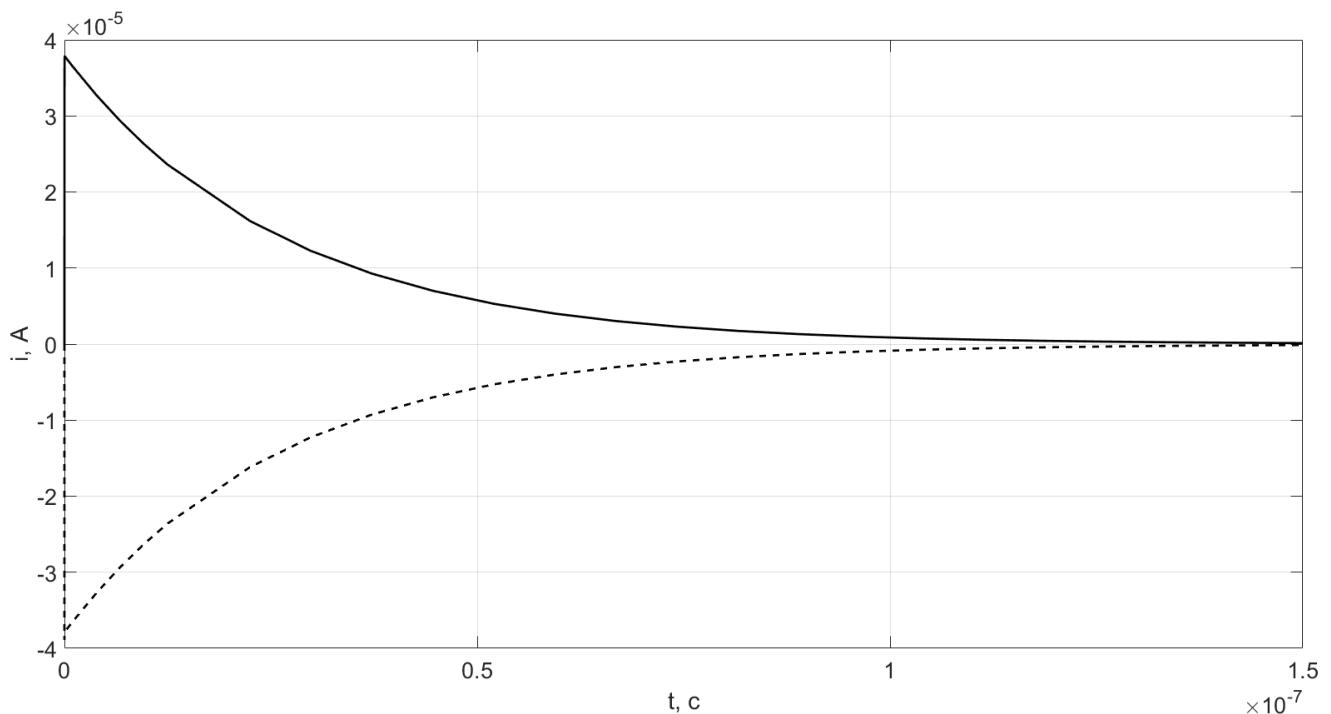


Рисунок 3.11 –Результат расчета тока в ветвях сбалансированного моста под воздействием частичного разряда.

Форма сигнала напряжения при частичном разряде фактически соответствует форме напряжения на эквивалентном конденсаторе и будет иметь вид, представленный на рисунке 3.12.

После расчета необходимого соотношения параметров схемы была проведена подготовка схемы моста для измерения частичных разрядов в образцах кабеля. Было подготовлено 3 образца кабеля АПвПуг 1x70/35-10 длиной 1,67

метра и проведено измерение их емкости для правильной настройки моста. Емкости образцов составили 364, 363 и 361 пФ.

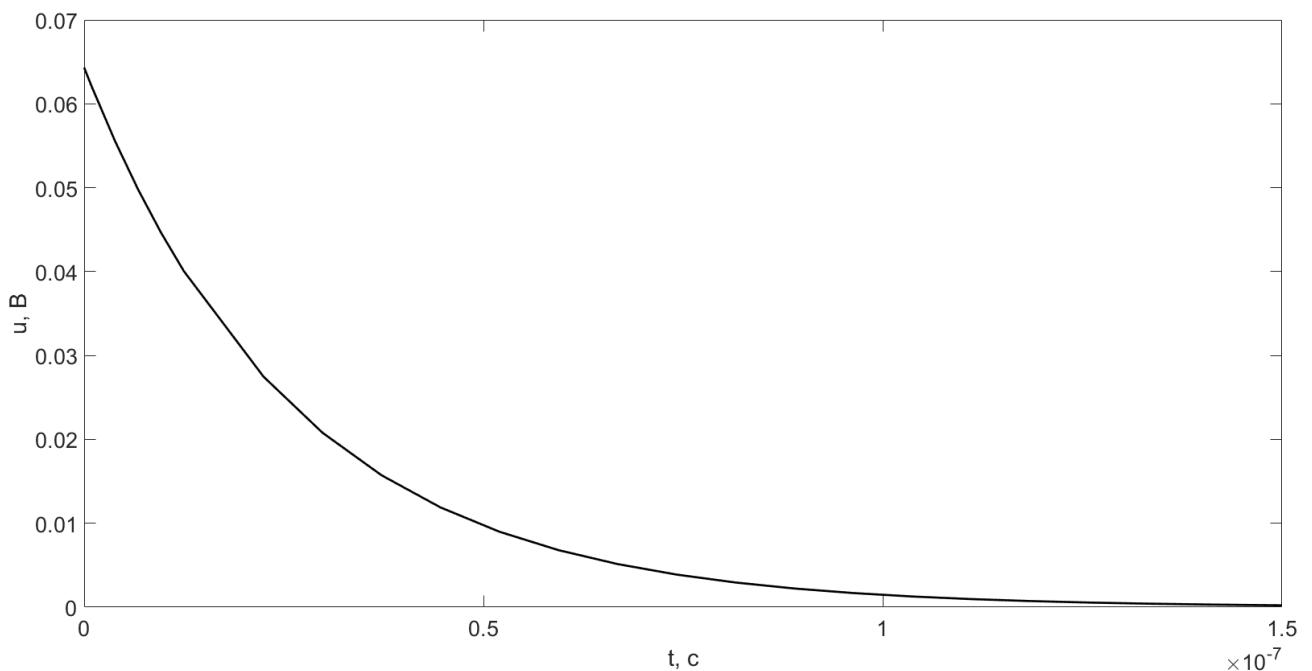


Рисунок 3.12 – Результат расчета напряжения на диагонали сбалансированного моста под воздействием частичного разряда.

Дальнейший подбор элементов для сбалансированного моста производился из расчета, что последовательно с изоляцией кабеля должен быть подключен низкоомный резистор. В качестве конденсатора  $C_2$  было решено последовательно подключить 4 высоковольтных дисковых конденсатора марки DHRB34C101M2BV емкостью 100 пФ и на напряжение 15 кВ. Таким образом, эквивалентная емкость составила 25 пФ, а напряжение 60 кВ.

Сопротивления подбирались таким образом, чтобы максимально точно выполнялось условие равенства постоянных времени плеч моста. В итоге были выбраны металлооксидные малошумящие сопротивления  $R_1 = 4.7$  Ом,  $R_2 = 68$  Ом марки МО-100.

В качестве контрольной характеристики была выбрана мощность частичных разрядов, для расчета которой требуется осциллографировать не только сигналы частичных разрядов, но и сигнал напряжения на изоляции. Очевидно, что с

помощью традиционной измерительной техники напрямую осциллографировать напряжение с достаточной частотой дискретизации не представляется возможным. В связи с этим, для записи сигнала напряжения был использован делитель напряжения, разработанный ООО НТЦ «Электроник». Входное сопротивление делителя составляет 800 МОм. Коэффициент деления с учетом внутреннего сопротивления осциллографа, составляющего 1 МОм, равен 1800.

Экспериментальные исследования по измерению характеристик частичных разрядов проводились на базе ООО НТЦ «Электроник». В качестве источника питания использовалась испытательная установка АИД-70М (рисунок 3.13).



Рисунок 3.13 – Испытательная установка АИД-70М.

Учитывая все вышеперечисленное, схема измерения частичных разрядов, используемая для анализа их мощности в процессе старения, представлена на рисунке 3.14, ее параметры приведены в таблице 3.1.

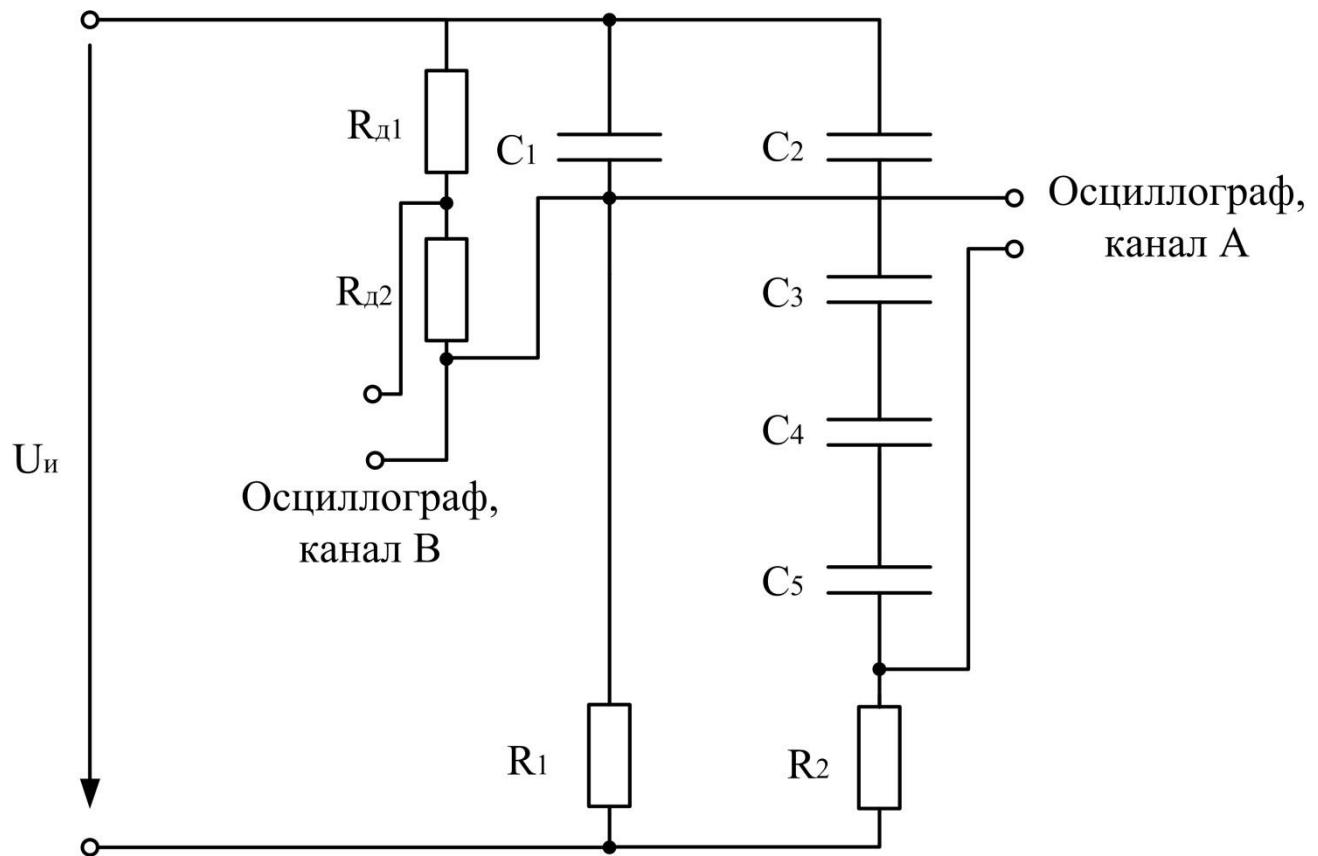


Рисунок 3.14 – Мостовая схема регистрации частичных разрядов для расчета мощности ЧР.

Таблица 3.1 – Параметры схемы регистрации ЧР.

$C_1$	364, 363 или 361 пФ (в зависимости от образца кабеля)
$C_2 \dots C_5$	100 пФ
$R_1$	4,7 Ом
$R_2$	68 Ом
$R_{d1}$	799,2 МОм
$R_{d2}$	800 кОм
$U_i$ (напряжение испытательной установки)	6..16 кВ

С помощью схемы регистрации производилось осциллографирование сигналов частичных разрядов и рабочего напряжения. Для этой цели использовался цифровой пишущий осциллограф АКИП-4127/2. Запись производилась в течение 56 мс для каждого напряжения от 6 до 16 кВ с шагом 2 кВ. Пример части записанных данных представлен на рисунке 3.15.

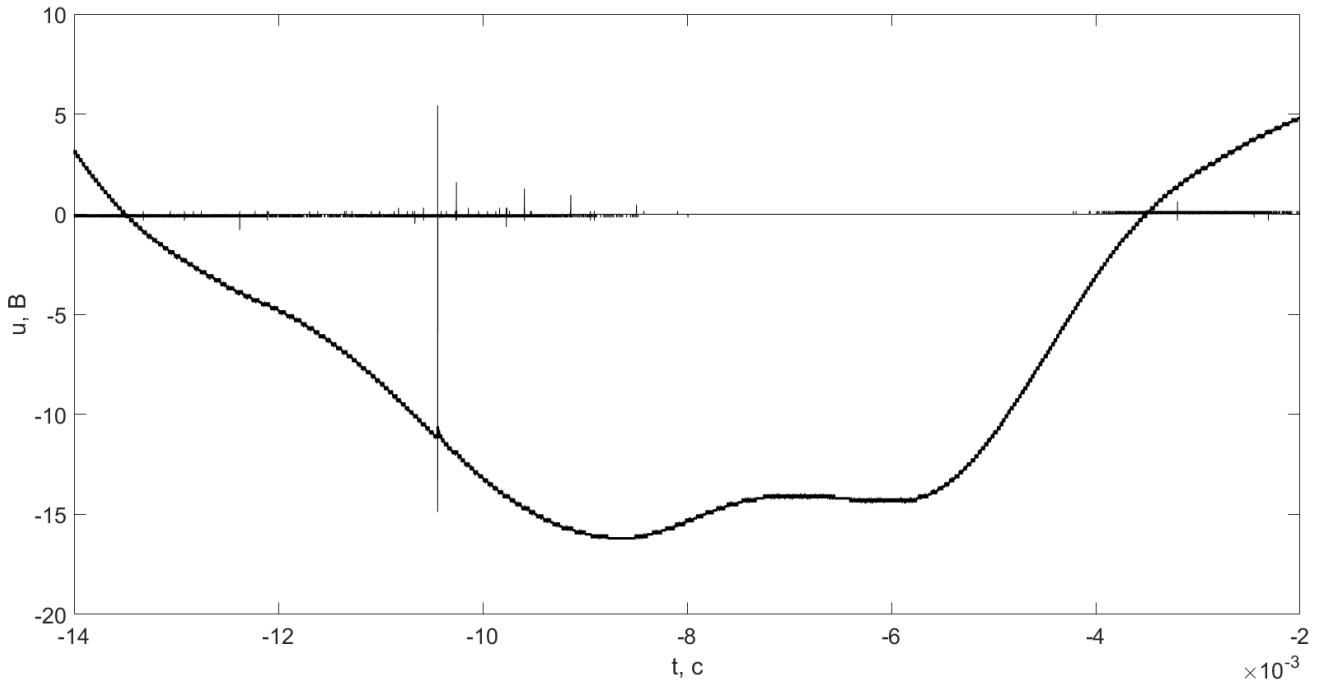


Рисунок 3.15 – Пример зарегистрированных сигналов ЧР и напряжения испытательной установки для 16 кВ.

После регистрации сигналов производилась обработка данных для расчета мощности ЧР по формуле [6,92]:

$$P = \frac{q_0 \cdot U_0 + q_2 \cdot U_2 + \dots + q_{\max} \cdot U_{\max}}{t_{\text{изм}}} \quad (3.6)$$

где  $U_0, U_1, U_2, \dots, U_{\max}$  – мгновенные значения воздействующего на изоляцию напряжения в момент образования ЧР с кажущимся зарядом  $q_0 \dots q_{\max}$ ,  $t_{\text{изм}}$  – время измерения.

Для расчета кажущегося заряда каждого частичного разряда производилось численное трапецеидальное интегрирование тока каждого импульса ЧР, так как

известно, что любой ток характеризуется изменением заряда и его можно рассчитать по формуле:

$$i = \frac{dq}{dt} \quad (3.7)$$

Отсюда, кажущийся заряд, вводимый в схему, определяется по формуле:

$$q = \int_0^{t_{QP}} idt \quad (3.8)$$

где  $i$  – ток импульса частичного разряда,  $t_{QP}$  – длительность импульса частичного разряда с момента его начала.

Каждый рассчитанный кажущийся заряд умножался на напряжение его возникновения для расчета суммарной энергии частичных разрядов и последующего ее деления на времена измерения, составляющее 56 мс. Обработка сигналов производилась с учетом особенностей обработки записей случайных колебаний [93,94].

### **3.2 Экспериментальная установка для искусственного состаривания изоляции кабелей**

Искусственное состаривание изоляции подразумевает прикладывание высокого напряжения к изоляции кабелей, а также внешний нагрев образцов кабеля для учета влияния температуры. В связи с этим, установка, предназначенная для термоэлектрического состаривания изоляции, состоит из следующих основных блоков:

1. *Нагревательный блок;*
2. *Блок высокого напряжения;*

Нагревательный блок (рисунок 3.16) состоит из двух асбестоцементных труб – наружной (диаметром 230 мм) и внутренней (диаметром 100 мм). На внутренней поверхности внешней трубы находится нагревательная обмотка, питание на которую подается путем регулирования напряжения однофазной сети (220 В) блоком управления напряжением устройства.

Нагревательная обмотка выполнена проводом из нихрома, который позволяет осуществлять равномерный нагрев внутреннего объема экспериментальной установки за счет его распределения по всей поверхности внутренней трубы.

Внутренняя труба предназначена для избегания контакта экспериментальных образцов с нагревательной обмоткой при работе установки. Внутри нее расположены образцы кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена для искусственного состаривания. Полость с нагревательной обмоткой с обоих торцов закрыта кольцами из плоского шифера и заизолирована термостойкой мастикой для уменьшения тепловых потерь в установке и для ее более равномерного нагрева.

Внутренняя труба с обеих сторон закрыта заглушками, предназначенными для предотвращения тепловых потерь изнутри установки. Для уменьшения рассеяния тепла с поверхности установки наружная часть укрыта утеплителем из базальтового волокна.

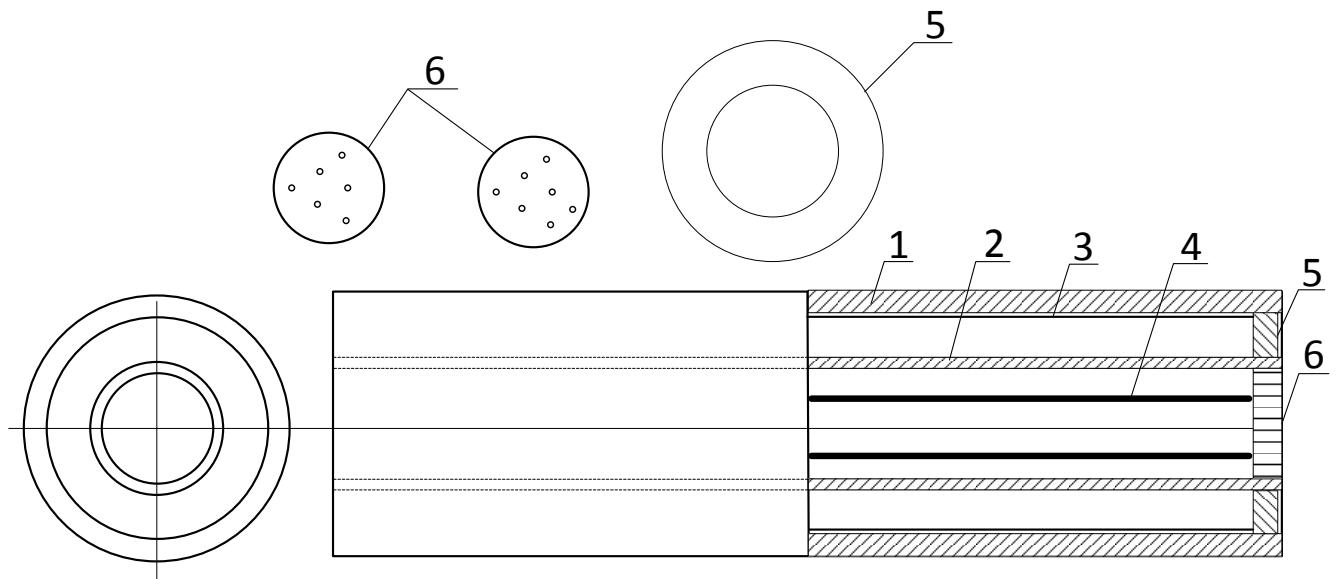


Рисунок 3.16 – Нагревательная установка: 1, 2 – внешняя и внутренняя асбестоцементная труба соответственно, 3 – нагревательная обмотка из нихромового провода, 4 – образцы кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена, 5 – кольцо из плоского шифера, 6 – диски из плоского шифера.

Для управления напряжением питания нагревательной обмотки используется схема на основе симистора, для управления которым используется схема с микроконтроллером, позволяющая программировать время открывания и запирания симистора. Работа схемы предложенного устройства управления напряжением питания была смоделирована на компьютере. Схема модели представлена на рисунке 3.17.

Датчик температуры, подключенный к микроконтроллеру, расположен внутри нагревательной установки в полости с экспериментальными образцами. Данные, полученные с датчика, обрабатываются микроконтроллером, после чего происходит выбор режима работы установки. Встроенный 16-разрядный таймер микроконтроллера позволяет реализовать сигнал управления (+5 В), который дает возможность плавно регулировать мощность нагрева за 1 секунду путем частого включения и отключения питания нагревательной обмотки. Таким образом, блок управления напряжением регулирует количество полупериодов синусоидального напряжения, прикладываемого к нагревательной обмотке за секунду.

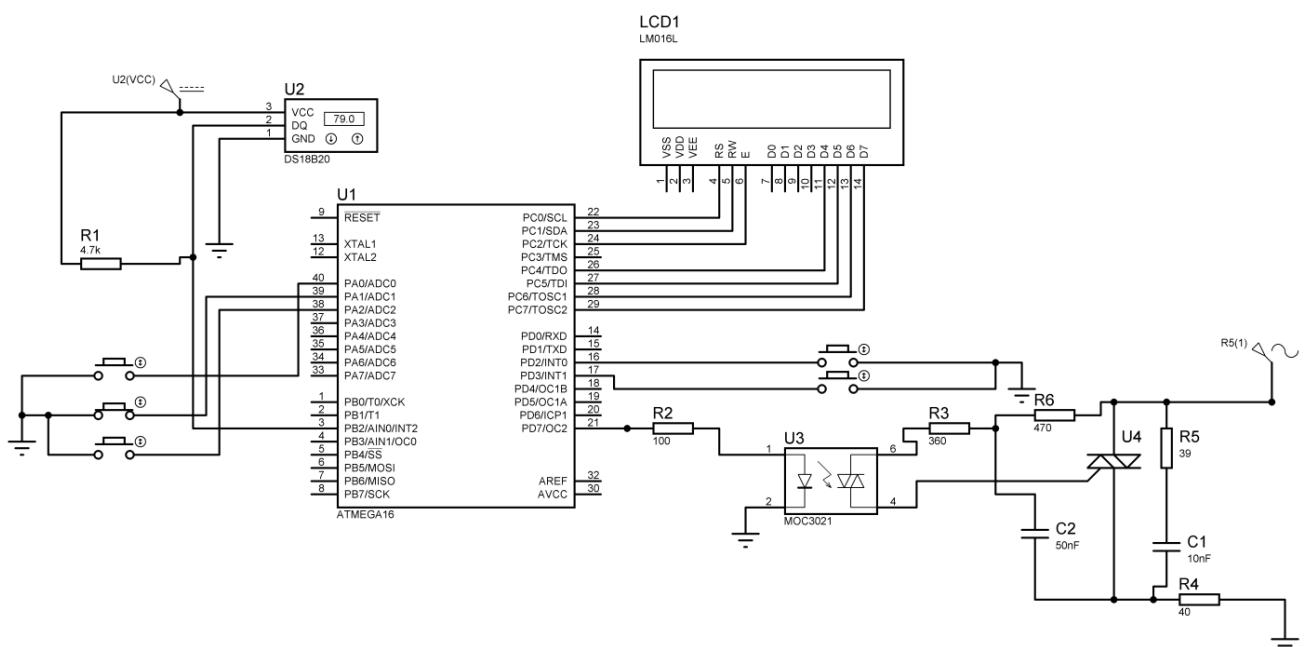


Рисунок 3.17 – Компьютерная модель схемы с микроконтроллером Atmega16

Результат компьютерного моделирования схемы с микроконтроллером и симистором представлен на рисунке 3.18:

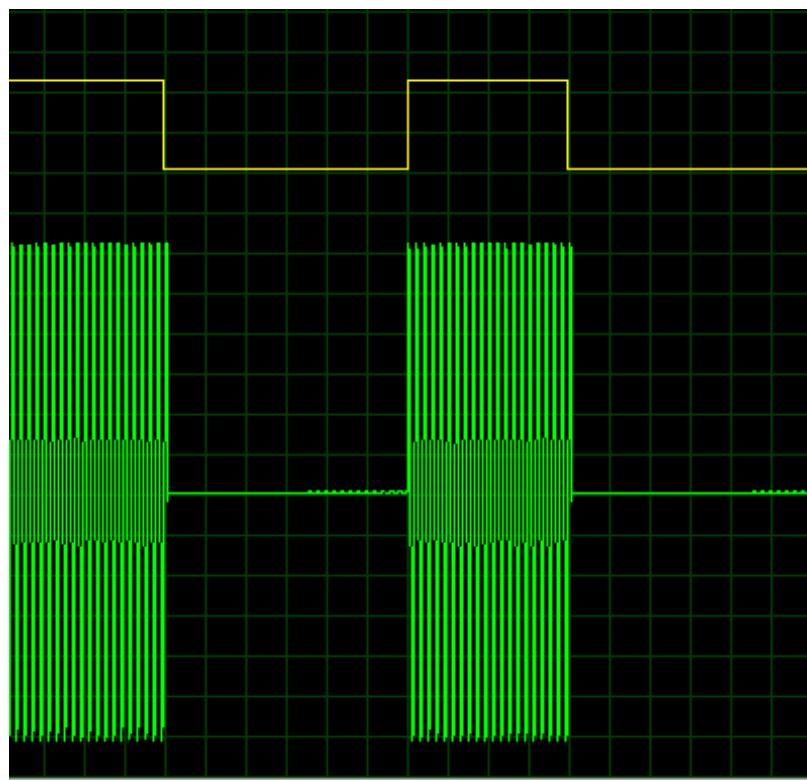


Рисунок 3.18 – Напряжения на ножке микроконтроллера (верхний график) и напряжение питания нагревательной обмотки (нижний график).

Для гальванической развязки элементов блока управления, работающих на постоянном напряжении +5 В, от элементов, работающих на однофазном напряжении сети 220 В, использована схема управления напряжением питания нагревательной обмотки, представленная на рисунке 3.19. Ее работа основана на оптроне микросхемы МОС3021, с помощью которого происходит отпирание и запирание симистора путем управления напряжением на его управляющем электроде. В открытом состоянии симистора на нагревательной обмотке установки будет сетевое напряжение 220 В.

Информация о режиме работы устройства выводится на двухстрочный символьный ЖК-дисплей, что позволяет контролировать корректность работы установки.

Перед изготовлением установки с помощью профессиональной версии программы Elcut 5.6 было проведено моделирование ее теплового поля. Полученные результаты моделирования показали равномерное распределение

температуры в изоляции образцов кабеля. Результаты моделирования для 100 °C (373 K) приведены на рисунках 3.20, 3.21.

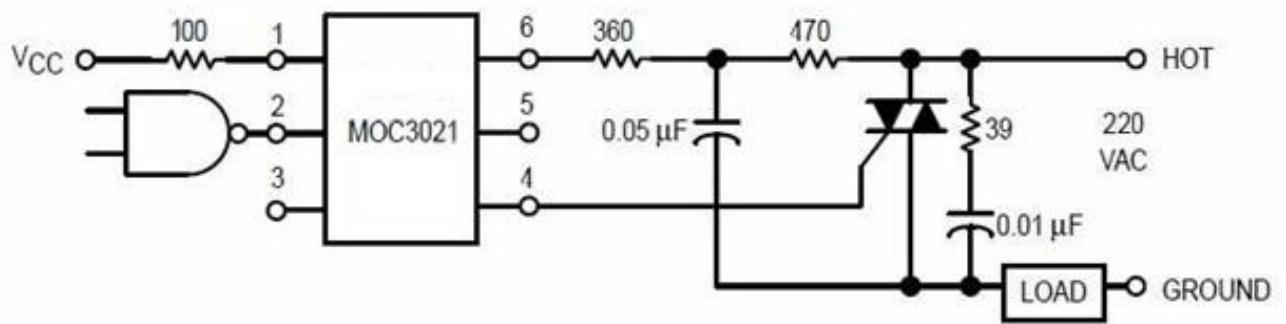


Рисунок 3.19 – Схема управления симистором с оптопарой.

Вторым блоком установки является блок высокого напряжения, предназначенный для подачи высокого напряжения на изоляцию образцов кабеля. Для данной цели использовался испытательный трансформатор марки ИОМ-100 с возможностью подачи на объект испытания регулируемого напряжения до 100 кВ. Схема подачи напряжения на изоляцию образцов кабеля представлена на рисунке 3.22.

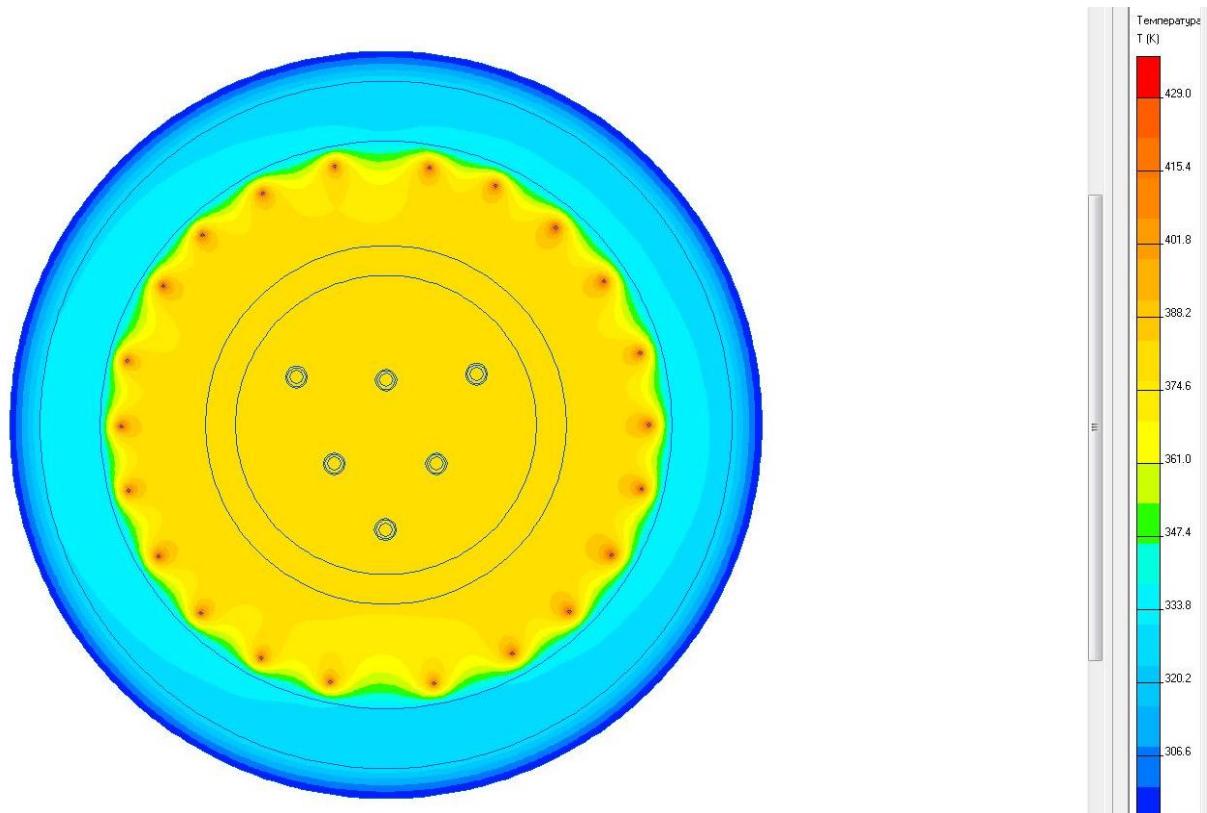


Рисунок 3.20 – Термовое поле внутри нагревательной установки

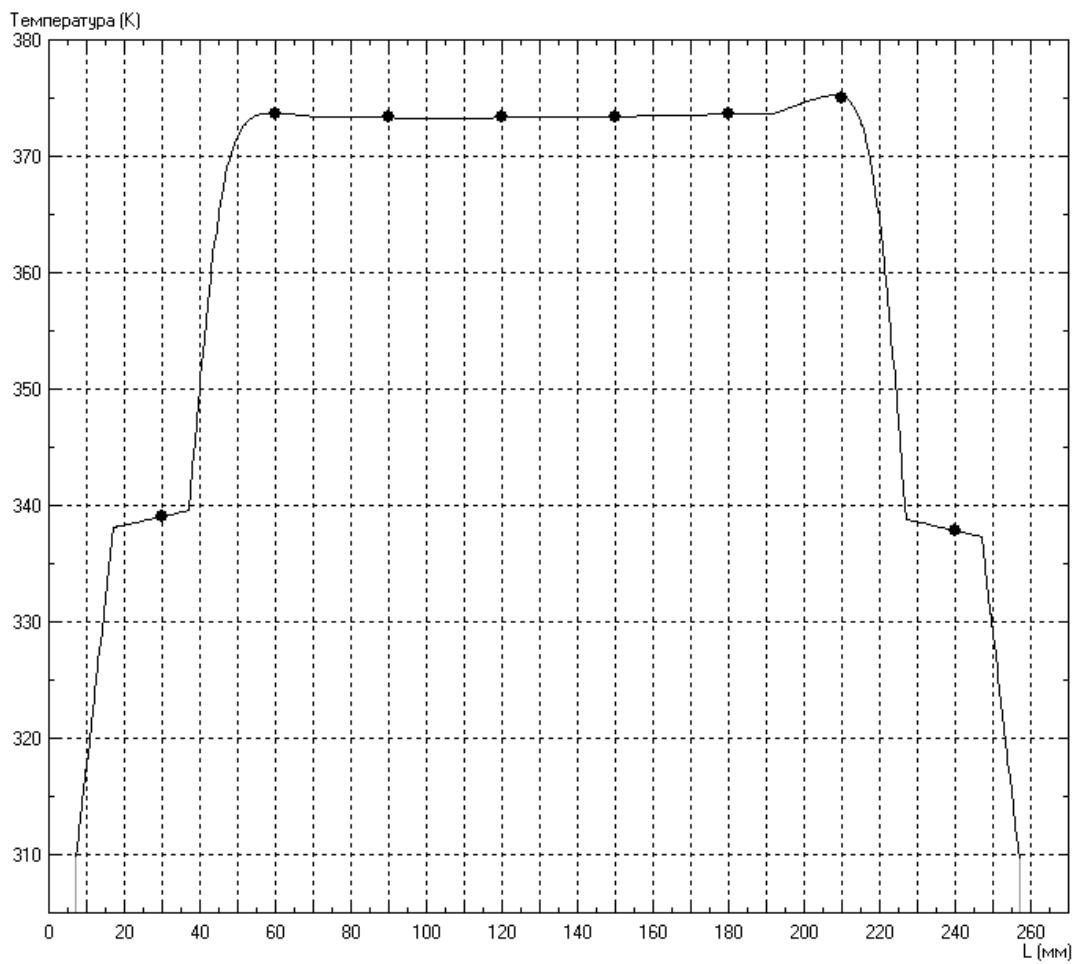


Рисунок 3.21 – Распределение температуры внутри установки

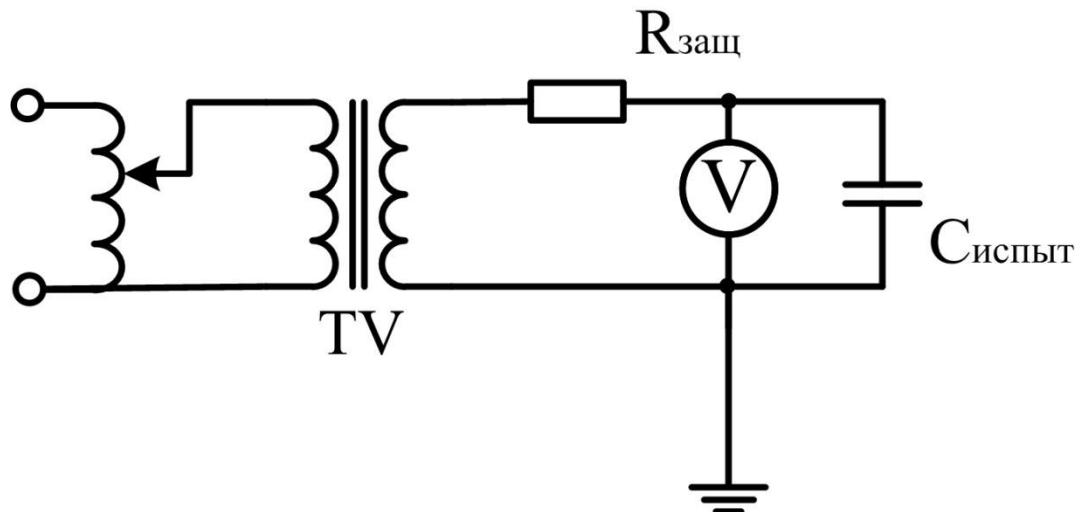


Рисунок 3.22 – Схема подключения высокого напряжения к образцам кабеля.

Предложенная конструкция экспериментальной установки является достаточной для проведения экспериментальных исследований, и в то же время

безопасной с точки зрения использования нагрева в совокупности с прикладыванием к изоляции высокого напряжения.

### 3.3 Исследование характеристик частичных разрядов в изоляции кабеля в процессе ее старения

Прежде, чем проводить экспериментальные исследования, требуется определить такие напряжение и температуру, которые существенно ускорят старение материала, но не изменят свойств материала и пробоя изоляции.

Температура плавления полиэтилена составляет 106-110°C [55]. Исходя из этого, максимальная температура состаривания изоляции - 105°C. Однако, учитывая необходимость приложения высокого напряжения к изоляции, производить нагрев путем протекания тока в жиле кабеля не представляется возможным. Следовательно, нагрев будет производиться извне. Тогда для учета возможных неоднородностей теплового поля внутри нагревательной установки решено снизить эту температуру до 100°C.

Для определения напряжения было решено провести измерение мощности частичных разрядов в образцах кабеля в зависимости от напряжения до начала экспериментальных исследований. Согласно методике эксперимента, описанной в предыдущем разделе, производилось измерение мощности частичных разрядов. Результаты расчета мощности ЧР для первичного измерения представлены в таблице 3.2. Полученные зависимости мощности ЧР представлены на графике (рисунок 3.23).

Для определения функции мощности ЧР от средней напряженности электрического поля, полученные данные были занесены в Matlab, и с помощью инструмента Curve Fitting Tool была подобрана функция. Согласно формулам (2.15) и (2.16), мощность ЧР можно рассчитать по формуле:

$$P_{IP} = B \cdot E^n \quad (3.9)$$

Таким образом, функция подбиралась, исходя из формулы (3.9) для напряженности электрического поля в области 0.3 мм от токопроводящей жилы,

рассчитанной по формуле (2.11), так как в этой области старения изоляции происходит наиболее интенсивно:

Таблица 3.2 – Результаты измерения мощности ЧР.

U, кВ	P, мВт Образец			Pср, мВт
	1	2	3	
6	0	0	0.136541757	0.045514
8	0.632688	0.337439	0.763024842	0.577717
10	1.050106	1.009692	1.472612309	1.17747
12	1.487326	1.679759	2.237913803	1.801666
14	2.106326	1.711027	5.16915699	2.995503
16	3.875529	2.751273	6.591416593	4.406073

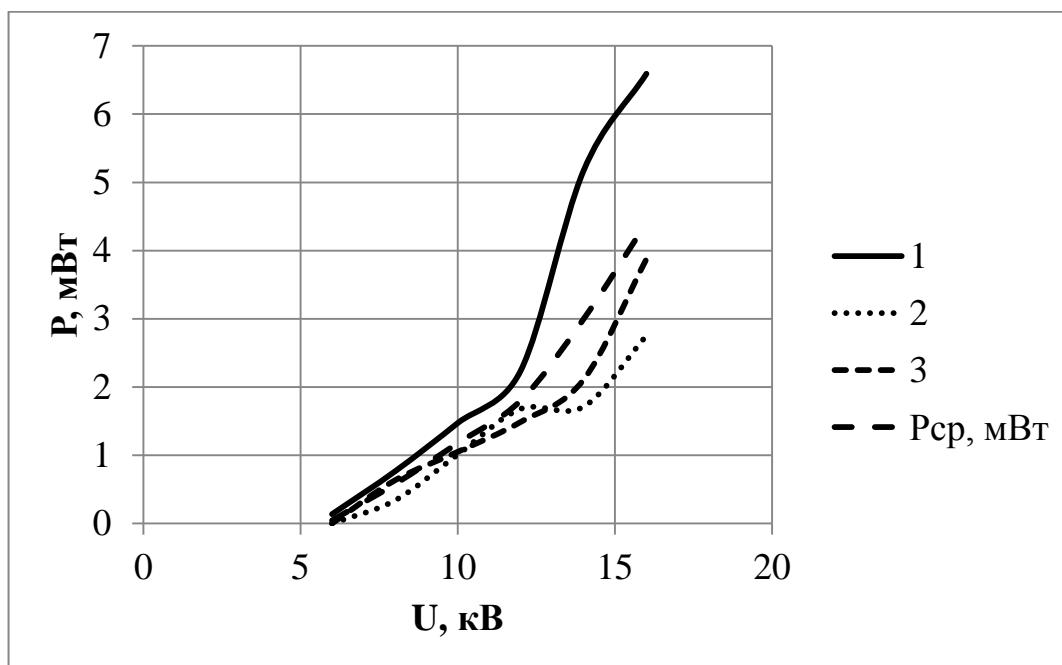


Рисунок 3.23 – Зависимость мощности ЧР от напряжения по данным таблицы 3.2.

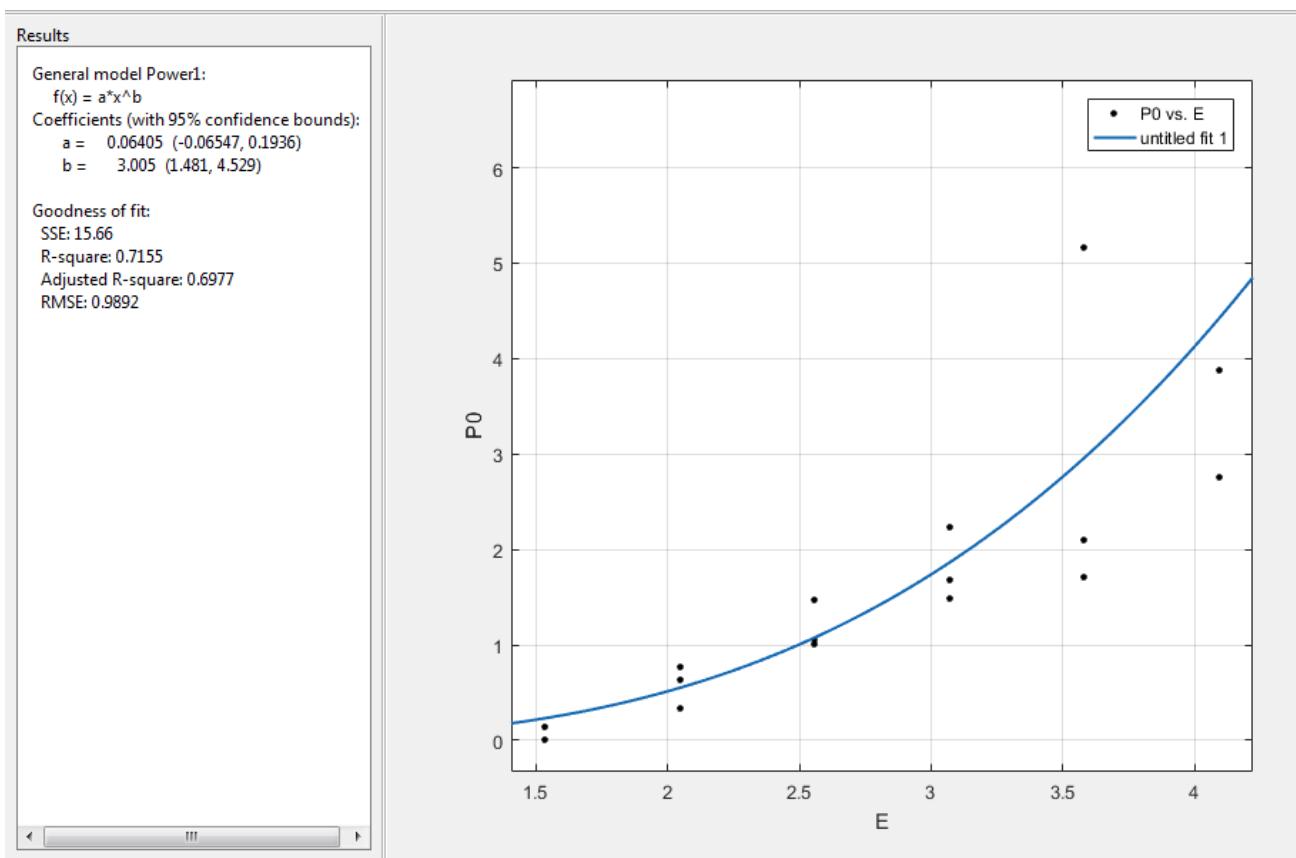


Рисунок 3.24 – Результат определения параметров функции в Matlab Curve Fitting Tool.

Таким образом, функция мощности ЧР в изоляции образцов кабеля до старения выражена формулой:

$$P_{IP} = 0.06405 \cdot E^{3.005} \quad (3.10)$$

Учитывая необходимость воздействия частичных разрядов для разрушения изоляции, очевидно, что напряжение искусственного состаривания составляет не менее 8 кВ, так как на напряжении 6 кВ в двух образцах отсутствовали видимые частичные разряды, хотя на более высоких напряжениях удавалось зарегистрировать ЧР с кажущимся зарядом менее 1 пКл. Следовательно, если ЧР присутствуют на напряжении 6 кВ, их разрушительное действие очень мало.

Однако существенное превышение напряжения выше номинального также нецелесообразно использовать в силу возможного быстрого роста дендритов в

изоляции, причем рост будет происходить намного быстрее, чем в реальных условиях эксплуатации.

Поэтому решено выбрать напряжение 10.5..11 кВ для состаривания изоляции, соответствующее линейному напряжению трехфазной системы кабелей. Задать точное значение не представляется возможным ввиду колебания напряжения энергосистемы в течение суток. Для расчета будет принято напряжение 10,8 кВ, так как в процессе наблюдения за экспериментом это напряжение было установлено на кабеле в течение наиболее продолжительного времени.

Первым этапом искусственного состаривания изоляции была выдержка образцов изоляции при выбранных воздействиях в течение 206 часов. При достижении указанного времени от образцов кабеля было отключено высокое напряжение, а также приостановлен их нагрев извне. После этого было проведено измерение мощности частичных разрядов, результаты которого представлены в таблице 3.3 и на рисунке 3.25.

Таблица 3.3 – Результаты измерения мощности ЧР после 206 часов искусственного состаривания.

U, кВ	P, мВт Образец			Pср, мВт
	1	2	3	
6	0	0	0	0
8	0.207318882	0.233837	0.211414	0.220578
10	0.619393748	0.303698	0.63182	0.461546
12	1.114733183	1.019688	1.315851	1.067211
14	2.919343455	2.241973	3.33422	2.580658
16	3.875533503	2.751284	5.111903	3.313409

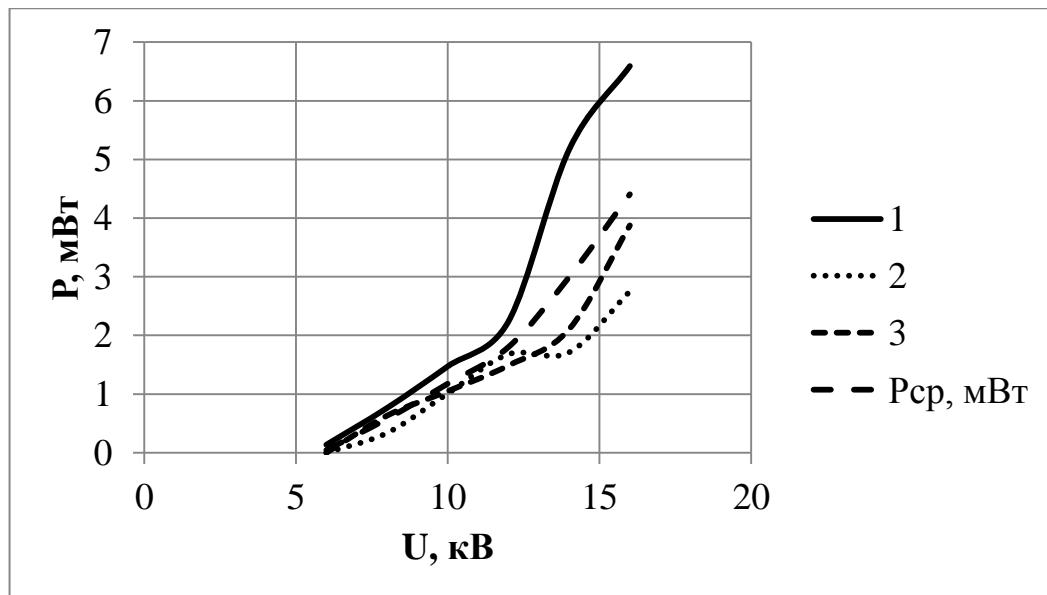


Рисунок 3.25 – Зависимость мощности ЧР от напряжения после 206 часов старения.

Стоит отметить, что произошло некоторое снижение мощности частичных разрядов, связанное с сушкой изоляции под воздействием высокой температуры.

Также использовался инструмент Matlab Curve Fitting Tool, который показал некоторое изменение функции мощности ЧР от напряженности:

$$P_{QP} = 0.0172 \cdot E^{3.879} \quad (3.11)$$

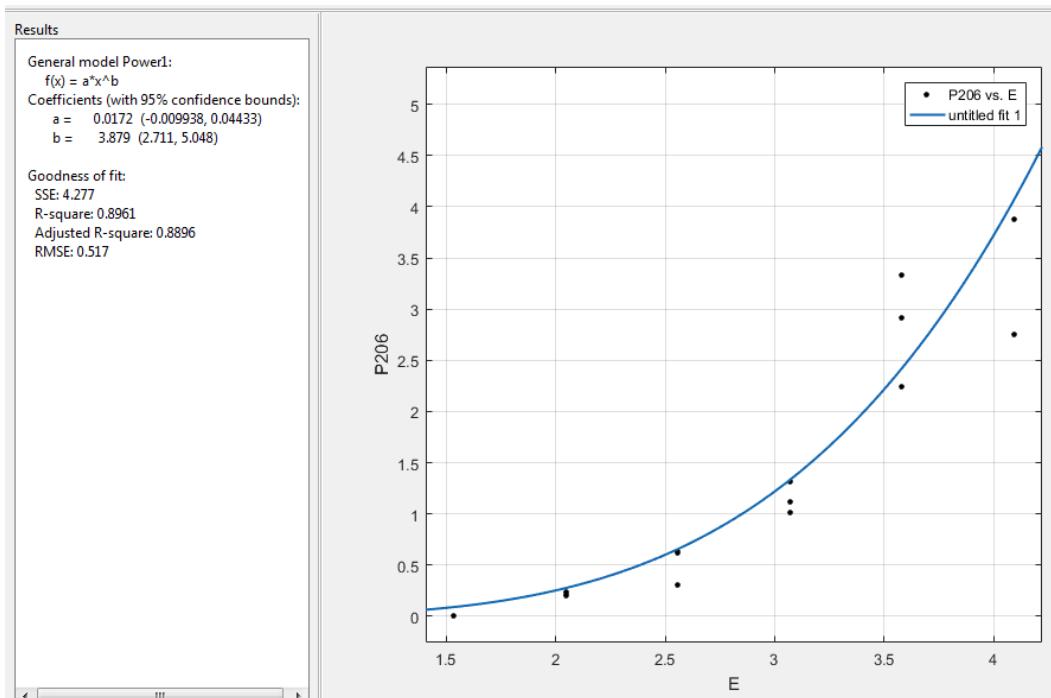


Рисунок 3.26 – Определение функции мощности ЧР от напряженности в Matlab Curve Fitting Tool после 206 часов старения.

Следующие измерения мощности частичных разрядов проводились после 420 часов с начала искусственного состаривания изоляции. Результаты измерения мощности частичных разрядов представлены в таблице 3.4, графики зависимостей мощности ЧР от напряжения на рисунке 3.27.

Таблица 3.4 – Результаты измерения мощности ЧР после 420 часов искусственного состаривания.

U, кВ	P, мВт Образец			Pср, мВт
	1	2	3	
6	0	0	0	0
8	0.247776315	0.078924	0.015133	0.113945
10	0.339062775	0.369922	0.235338	0.314774
12	0.778115509	1.587363	1.65766	1.341046
14	2.514907881	3.101765	2.592455	2.736376
16	5.444928737	4.421904	5.628799	5.165211

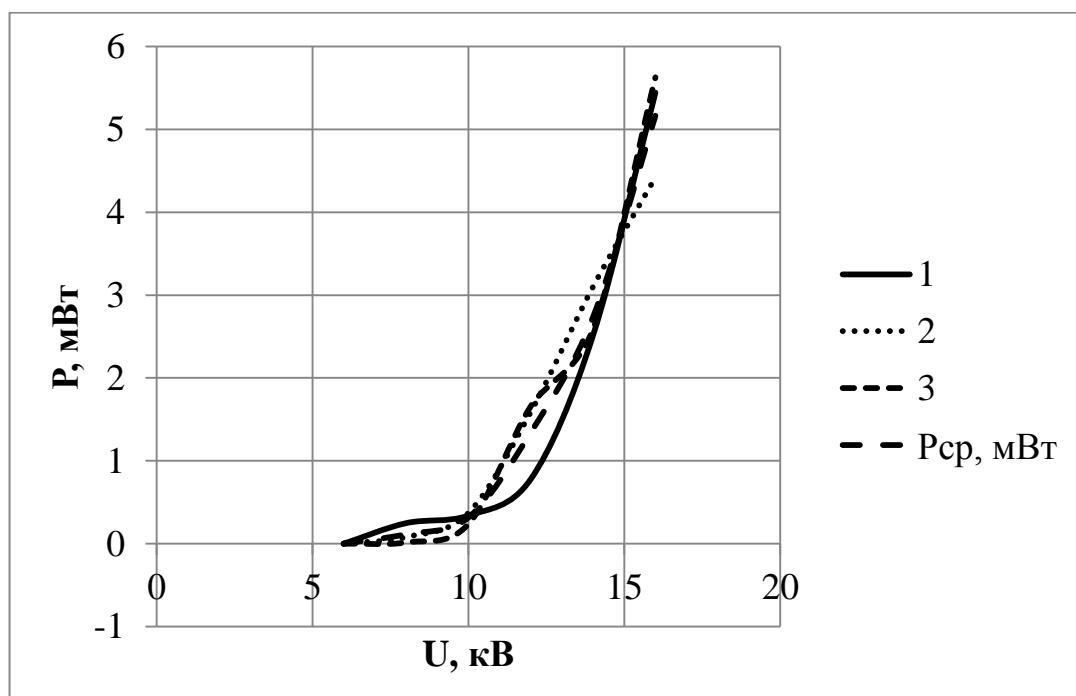


Рисунок 3.27 – Зависимость мощности ЧР от напряжения после 420 часов старения.

Зависимость мощности частичных разрядов от средней напряженности:

$$P_{IP} = 0.004816 \cdot E^{4.956} \quad (3.12)$$

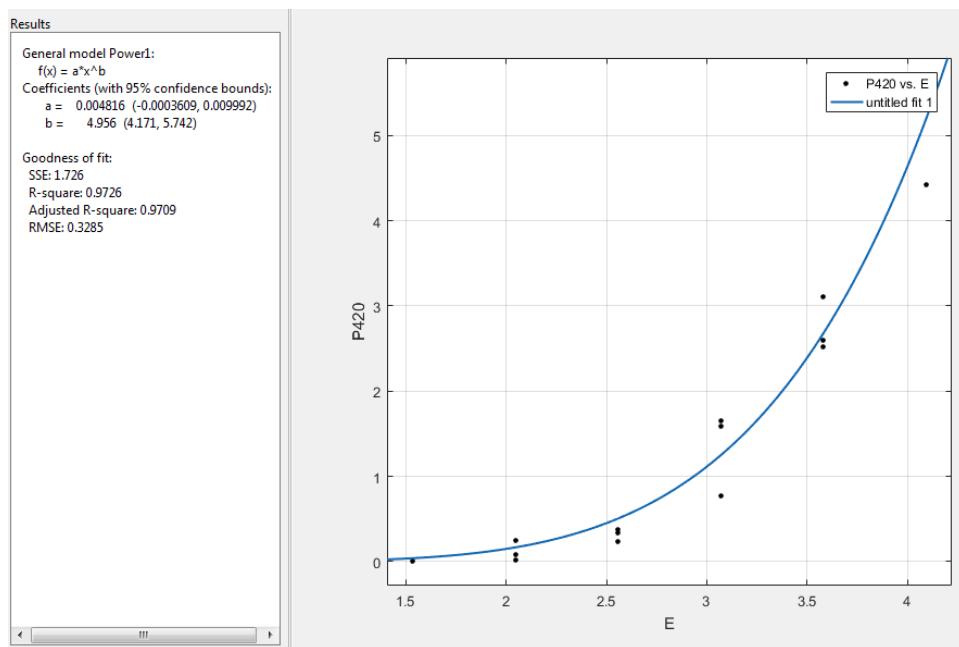


Рисунок 3.28 – Определение функции мощности ЧР от напряженности в Matlab Curve Fitting Tool после 420 часов старения.

Такое изменение функции зависимости мощности частичных разрядов от напряжения обусловлено снижением средней мощности ЧР на напряжениях 8-12 кВ и ее увеличением на напряжениях 14 и 16 кВ.

Следующее измерение проводилось после 653 часов старения изоляции. Результаты измерения представлены в таблице 3.5 и на рисунках 3.29. и 3.30.

Таблица 3.5 – Результаты измерения мощности ЧР после 653 часов искусственного состаривания.

U, кВ	P, мВт Образец			Pср, мВт
	1	2	3	
6	0	0	0	0
8	0.374549176	0.059481	0.46903	0.30102
10	0.979315567	0.62678	0.785066	0.797054
12	1.696779064	1.942229	1.425693	1.688234
14	2.534262419	4.814236	3.09502	3.481173
16	4.66163752	4.565554	5.283097	4.836763

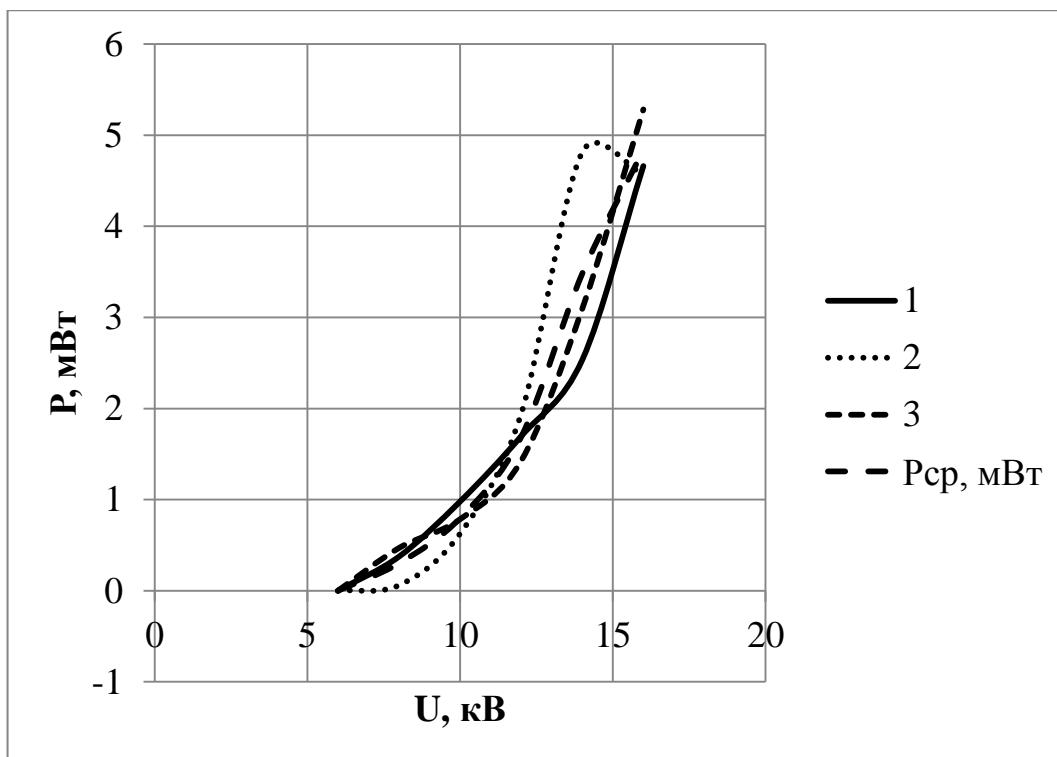


Рисунок 3.29 – Зависимость мощности ЧР от напряжения после 653 часов старения.

Зависимость мощности частичных разрядов от средней напряженности электрического поля также изменилась:

$$P_{QP} = 0.03182 \cdot E^{3.589} \quad (3.13)$$

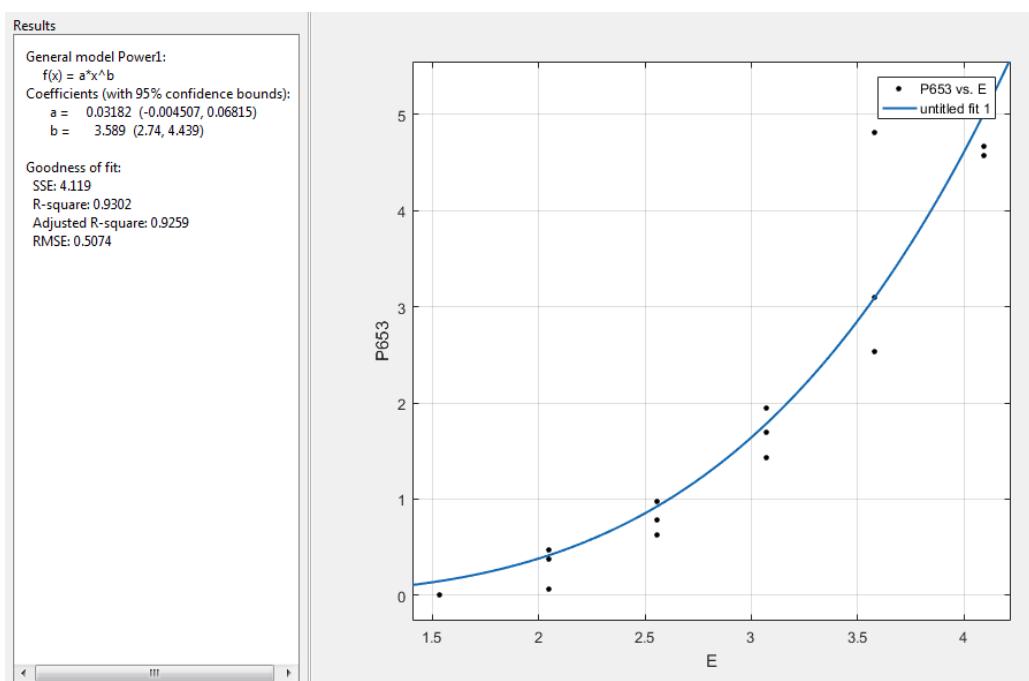


Рисунок 3.30 – Определение функции мощности ЧР от напряженности в Matlab Curve Fitting Tool после 653 часов старения.

Следующее измерение проводилось после 873 часов старения изоляции.

Результаты измерения представлены в таблице 3.6 и на рисунках 3.31. и 3.32.

Таблица 3.6 – Результаты измерения мощности ЧР после 873 часов искусственного состаривания.

U, кВ	P, мВт Образец			Pср, мВт
	1	2	3	
6	0	0	0	0
8	0.14250413	0.040332	0.073029	0.085288
10	0.347902044	0.516439	0.288935	0.384425
12	1.120871959	1.419987	1.130422	1.22376
14	3.161396118	4.819749	2.264867	3.415337
16	4.515968707	6.094075	4.429795	5.01328

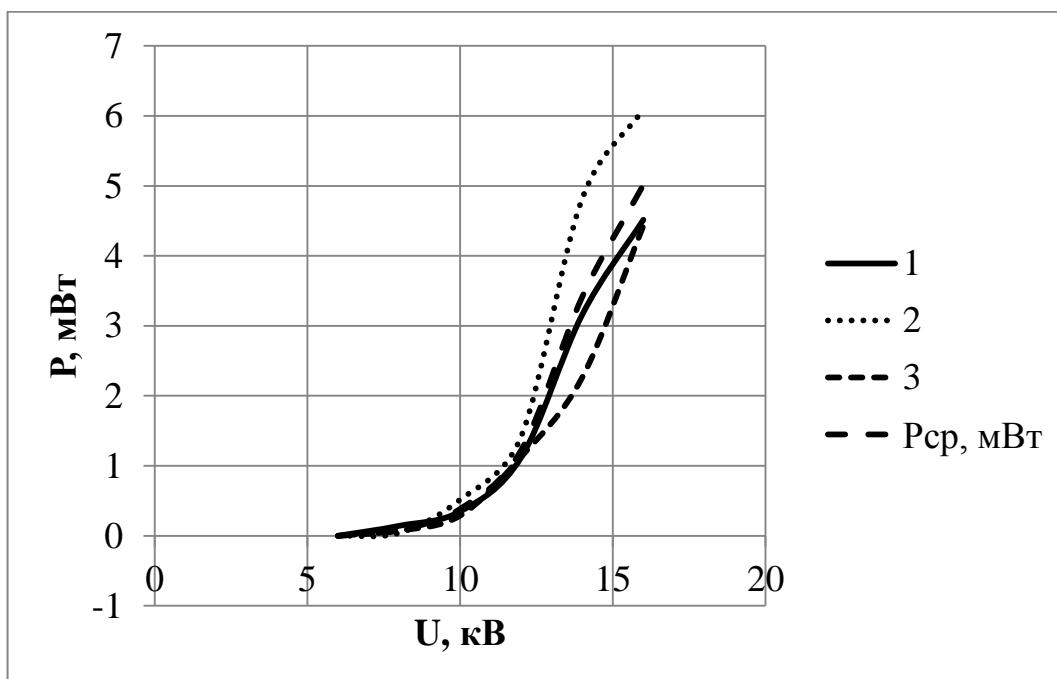


Рисунок 3.31 – Зависимость мощности ЧР от напряжения после 873 часов старения.

Зависимость мощности частичных разрядов от средней напряженности электрического поля также изменилась:

$$P_{QP} = 0.01005 \cdot E^{4.435} \quad (3.14)$$

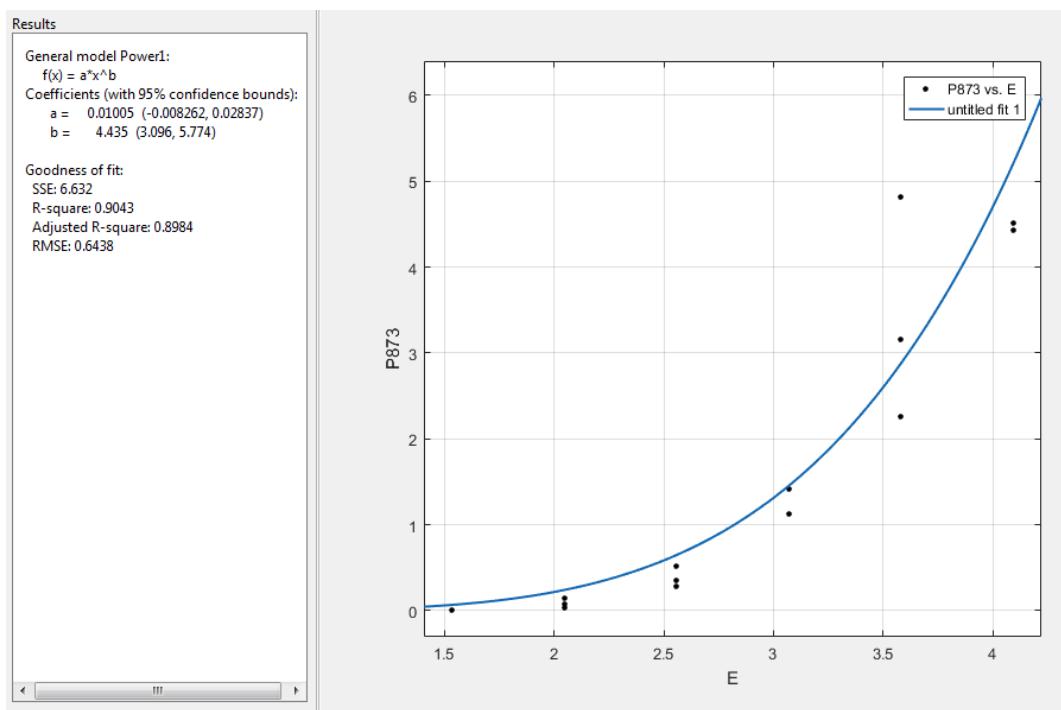


Рисунок 3.32 – Определение функции мощности ЧР от напряженности в Matlab Curve Fitting Tool после 873 часов старения.

Следующее измерение проводилось после 1058 часов старения изоляции. Результаты измерения представлены в таблице 3.7 и на рисунках 3.33. и 3.34.

Таблица 3.7 – Результаты измерения мощности ЧР после 1058 часов искусственного состаривания.

U, кВ	Р, мВт Образец			Рср, мВт
	1	2	3	
6	0	0	0	0
8	0.058143942	0.066642	0.049969	0.058252
10	0.186568499	0.288788	0.22121	0.232189
12	1.183337964	1.368708	1.291817	1.281288
14	2.935447775	2.211808	1.450014	2.19909
16	5.184286451	4.287612	3.488418	4.320105

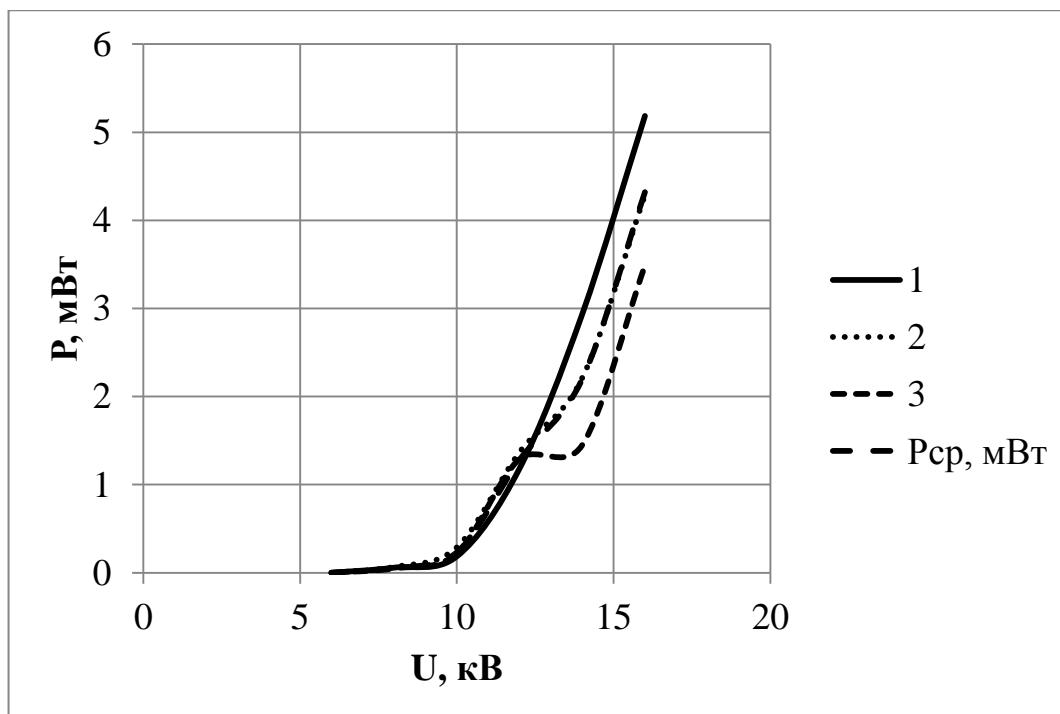


Рисунок 3.33 – Зависимость мощности ЧР от напряжения после 1058 часов старения.

Зависимость мощности частичных разрядов от средней напряженности электрического поля определяется формулой:

$$P_{IP} = 0.004425 \cdot E^{4.886} \quad (3.15)$$

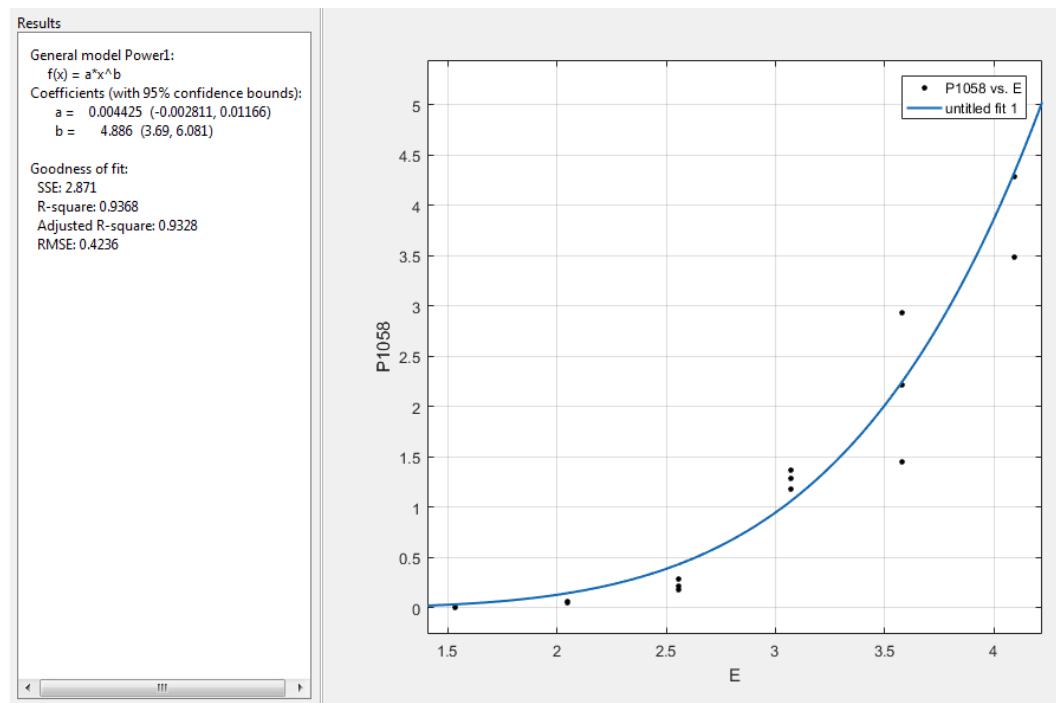


Рисунок 3.34 – Определение функции мощности ЧР от напряженности в Matlab Curve Fitting Tool после 1058 часов старения.

Учитывая большую временную протяженность экспериментальных исследований, после 1157 часов старения было решено повысить напряжение на образцах кабеля до 16 кВ. Следующее измерение мощности частичных разрядов проводилось после 1157 часов старения изоляции при напряжении 10.8 кВ и 68 часов старения при напряжении 16 кВ. Результаты измерения представлены в таблице 3.8 и на рисунках 3.35. и 3.36.

Таблица 3.8 – Результаты измерения мощности ЧР после 1157 часов искусственного состаривания при 10,8 кВ и 68 часов состаривания при 16 кВ.

U, кВ	P, мВт Образец			Pср, мВт
	1	2	3	
6	0	0	0	0
8	0.06126316	0.056713	0.022858	0.046945
10	0.258229601	0.257174	0.117872	0.211092
12	0.466497653	0.391459	0.046829	0.301595
14	0.745206425	1.856239	0.661178	1.087541
16	4.367139025	4.469798	2.83142	3.889453

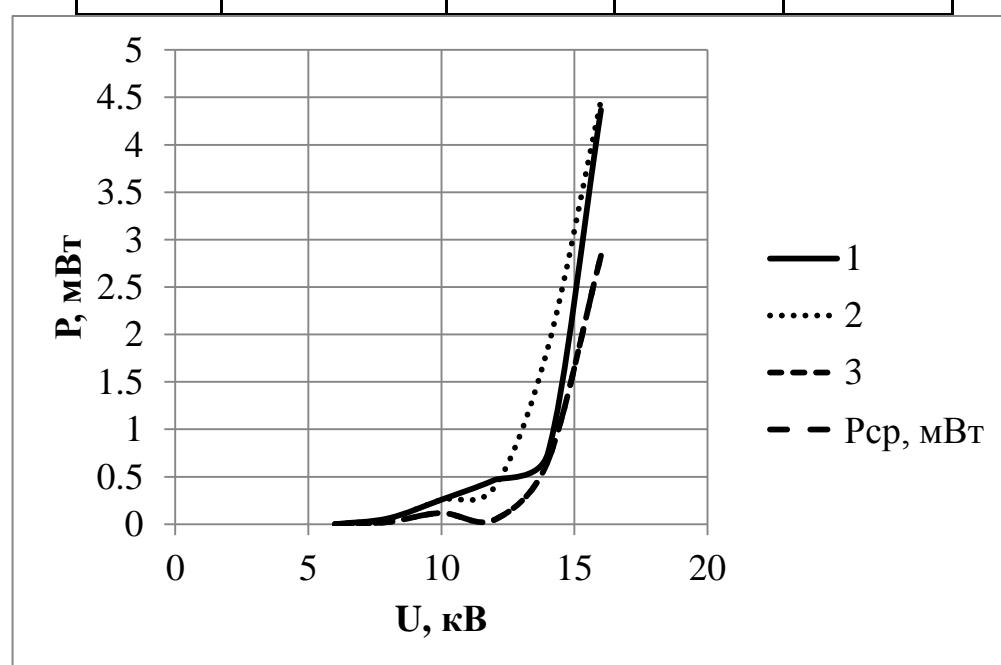


Рисунок 3.35 – Зависимость мощности ЧР от напряжения после 1157 часов старения при 10,8 кВ и 68 часов старения при 16 кВ.

Зависимость мощности частичных разрядов от средней напряженности электрического поля существенно изменилась:

$$P_{QP} = 0.000008543 \cdot E^{9.245} \quad (3.16)$$

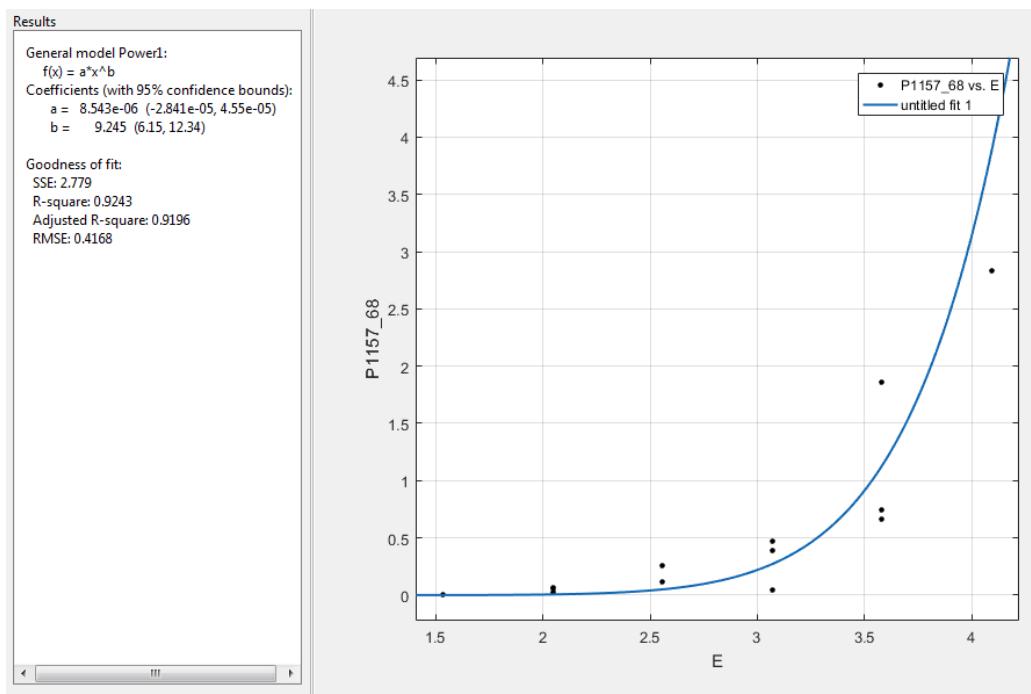


Рисунок 3.36 – Определение функции мощности ЧР от напряженности в Matlab Curve Fitting Tool после 1157 часов старения при 10,8 кВ и 68 часов старения при 16 кВ.

Существенное изменение функции мощности частичных разрядов обусловлено существенным снижением мощности ЧР на небольших напряжениях вследствие увеличения дефекта изоляции, возникающее незадолго до пробоя [37, 70, 72].

До следующего измерения мощности ЧР напряжение на образцах кабеля было решено повысить до 20 кВ с целью ускорения процесса старения. Следующее измерение мощности частичных разрядов проводилось после 1157 часов старения изоляции при напряжении 10.8 кВ, 68 часов старения при напряжении 16 кВ и 153 часов старения при 20 кВ. Стоит отметить, что в образце кабеля №3 образовался дендрит и произошел его пробой, после чего сразу проводились измерения мощности частичных разрядов. Результаты измерения представлены в таблице 3.9 и на рисунках 3.37. и 3.38.

Таблица 3.8 – Результаты измерения мощности ЧР после 1157 часов искусственного состаривания при 10,8 кВ, 68 часов состаривания при 16 кВ и 153 часов состаривания при 20 кВ.

U, кВ	P, мВт Образец		Pср, мВт
	1	2	
6	0	0	0
8	0.032974924	0.049718	0.041347
10	0.101900564	0.278934	0.190417
12	0.14906219	0.579124	0.364093
14	0.238425654	1.354254	0.79634
16	0.923453476	2.557233	1.740343
18	1.222518415	2.40902	1.815769
20	2.679397411	9.180506	5.929951

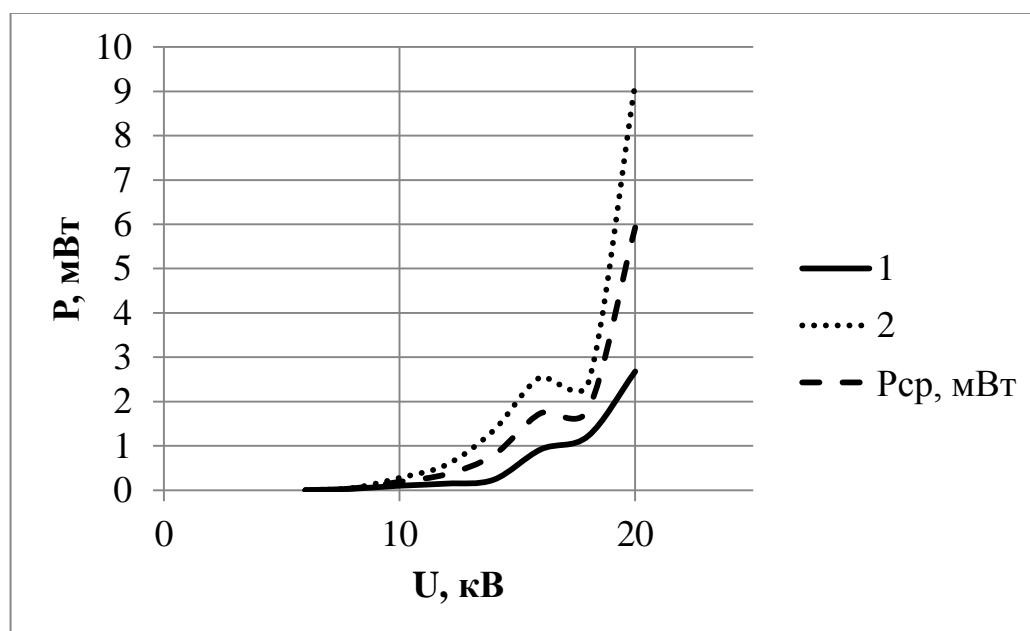


Рисунок 3.37 – Зависимость мощности ЧР от напряжения после 1157 часов старения при 10,8 кВ и 68 часах старения при 16 кВ.

Зависимость мощности частичных разрядов от средней напряженности электрического поля существенно изменилась:

$$P_{IP} = 0.00003907 \cdot E^{7.285} \quad (3.17)$$

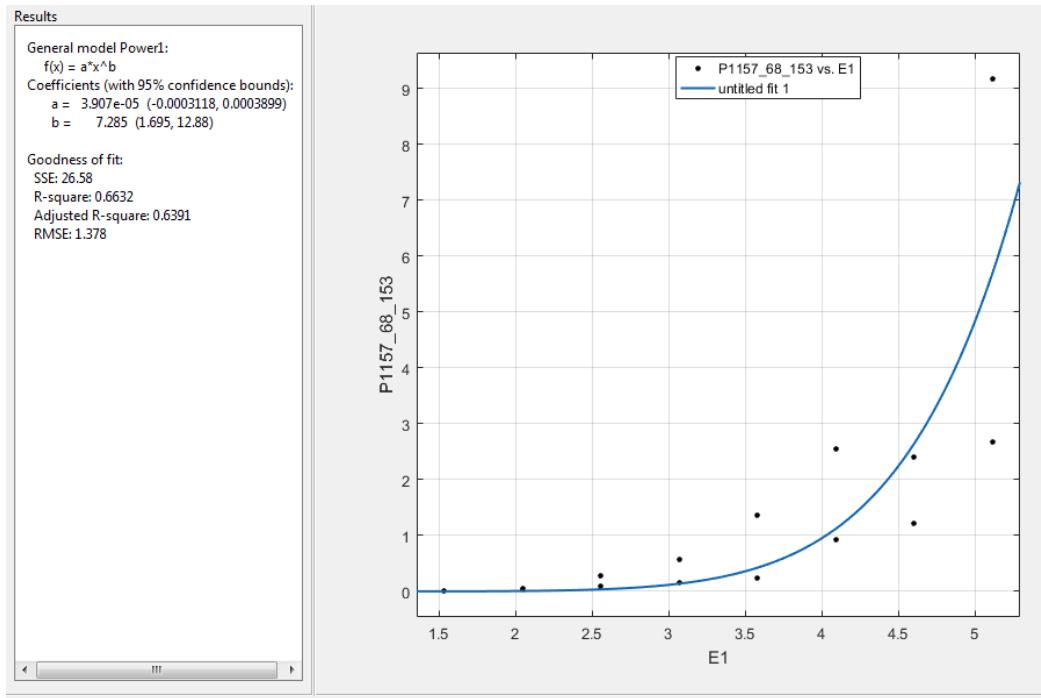


Рисунок 3.38 – Определение функции мощности ЧР от напряженности в Matlab Curve Fitting Tool после 1157 часов старения при 10,8 кВ и 68 часах старения при 16 кВ.

При последнем измерении мощности частичных разрядов зафиксирован существенный рост мощности ЧР у образца №2 на напряжении 20 кВ, очевидно, обусловленный возникновением его предпробойного состояния. После измерения мощности ЧР этот образец выдержал всего 2 часа под напряжением 20 кВ.

### 3.4 Анализ данных, полученных в ходе экспериментальных исследований

Для определения функции зависимости мощности ЧР от напряженности электрического поля было решено проанализировать все накопленные в процессе экспериментальных исследований данные. Предполагается, что в данном случае были получены наиболее достоверные данные, так как производилась обработка большой статистической выборки значений, полученных в разное время. Результаты анализа полученных данных представлены на рисунке 3.39.

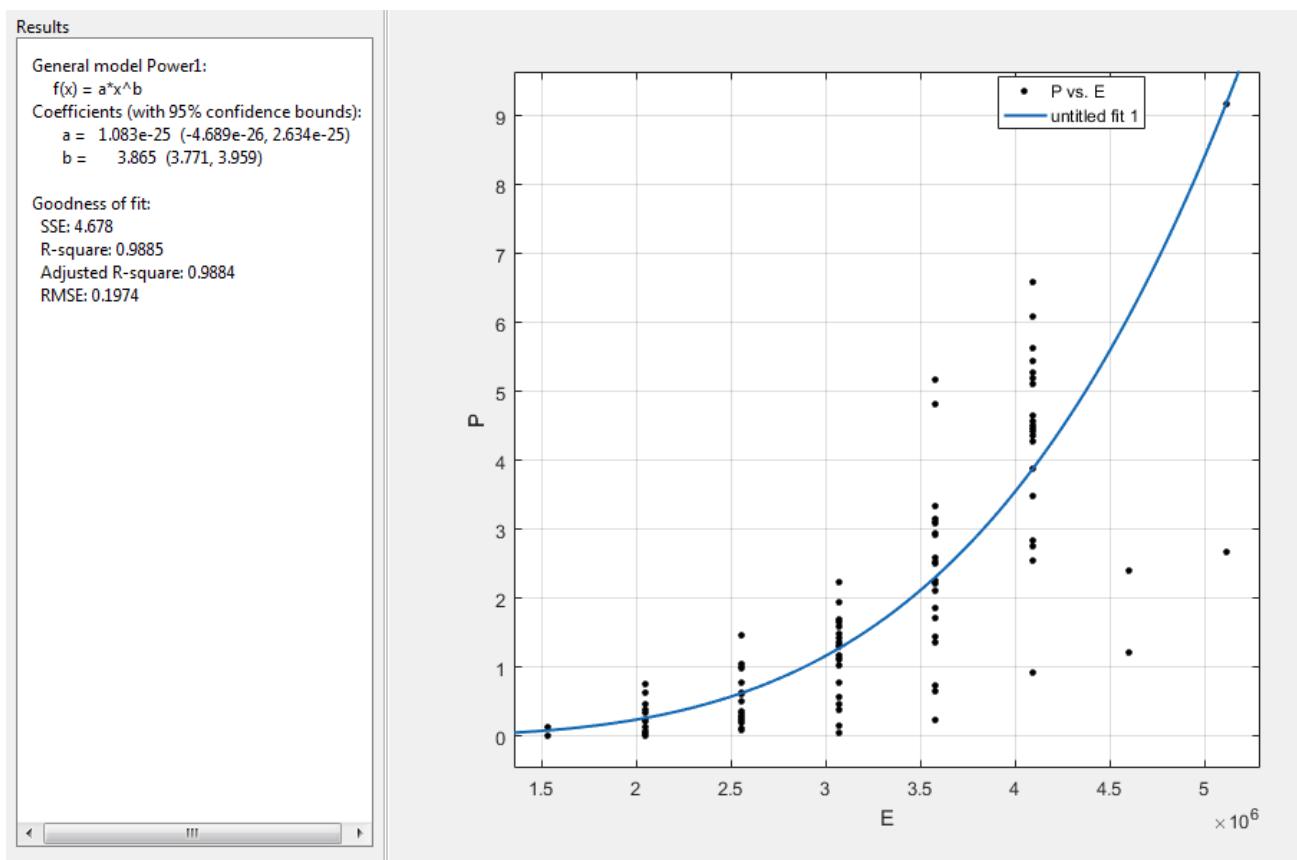


Рисунок 3.38 – Определение функции мощности ЧР от напряженности в Matlab Curve Fitting Tool за все время исследования.

Таким образом, функция мощности частичных разрядов, используемая в математической модели, выражена формулой:

$$P_{QP} = 1.83 \cdot 10^{-25} \cdot E^{3.87} \quad (3.18)$$

Один из образцов кабеля не был пробит за время искусственного состаривания изоляции, равное 2528 часов. Два других образца кабеля были пробиты спустя 1370 и 1382 часов соответственно, однако причиной их пробоя был рост дендрита в области концевой разделки кабеля.

В качестве оценки степени износа изоляции образца кабеля, который не был пробит, было решено определить его электрическую прочность, которая составила 15,9 кВ/мм, что составляет 31,8% от среднего пробивного напряжения полиэтилена, равного 50 кВ/мм [95].

Исходя из полученных результатов, был подобран коэффициент с. В результате функция изменения количества неразрушенных молекул под воздействием температуры и напряжения представлена формулой:

$$N_t = N_0 e^{-0.0000307 \cdot 1.08 \cdot 10^{-25} \cdot E^{3.87} \cdot 20854 e^{-6721 \cdot \frac{1}{373} \cdot t}} \quad (3.19)$$

Однако напряжение на кабеле менялось в течение экспериментальных исследований, тогда процент неразрушенных молекул менялся в кабеле согласно данным, представленным в таблице:

Таблица 3.9 – Зависимость процента неразрушенных молекул от времени в процессе старения изоляции.

Напряжение, кВ	10	16	20	35	50
Время старения, ч	1157	68	1153	110	40
Процент неразрушенных молекул	97.5	96.5	66.9	49.3	31.8

Для проверки достоверности полученных результатов, был проведен расчет прогнозируемого срока службы изоляции на основе данных, приближенных к реальным и описанным в параграфе 2.5. Однако было решено добавить к указанному массиву данных 1 час работы с перегрузкой для приближения указанных условий эксплуатации к реальным. Результат расчета показал, что в таких условиях кабель может проработать около 1000 лет, что, очевидно, невозможно. Полученная неточность расчета объясняется тем, что в математической модели не были учтены другие факторы воздействия на изоляцию, среди которых может быть влажность, механические воздействия, радиация и др.

Для приближения результатов расчета к реальным, решено ввести дополнительный коэффициент D, значение которого выбрано таким образом, чтобы для выбранного массива данных срок службы составил 30 лет, так как такой срок службы является паспортным для современной кабельной продукции:

$$\tau_{cl} = \frac{1.514D}{b} = \frac{1.514 \cdot 0.0325}{5.2 \cdot 10^{-11}} = 946250000 \text{ с} \approx 30 \text{ лет} \quad (3.20)$$

Соответственно, функция изменения количества неразрушенных молекул будет записана следующим образом:

$$\begin{aligned}
 N_t &= N_0 e^{-DcBE^{3.87} \cdot K_0 e^{-\frac{W_a}{kT}} \cdot t} = \\
 &= N_0 e^{-0.0325 \cdot 0.0000307 \cdot 1.08 \cdot 10^{-25} \cdot E^{3.87} \cdot 20854 e^{-6721 \cdot \frac{1}{373} \cdot t}}
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

### 3.5 Выводы по главе

1. Предложенная схема регистрации электрических сигналов частичных разрядов позволяет производить отстройку от помех. Следствием этого является регистрация ЧР, возникающих только в схеме измерения.
2. Разработанная специальная экспериментальная установка для термоэлектрического состаривания изоляции позволяет проводить экспериментальные исследования в широком диапазоне температур и напряжений.
3. Полученные результаты расчета мощности частичных разрядов позволяют оценить степень воздействия ЧР на разрушение изоляционного материала, а также уточнить математическую модель расчета срока службы изоляции.
4. Сопоставление результатов расчета с результатами экспериментальных исследований показало несовпадение результатов расчета и эксперимента, вызванное тем, что математическая модель не учитывает разрушающие изоляцию факторы, кроме напряжения и температуры. Для корректировки модели решено ввести коэффициент, учитывающий воздействие других факторов.

## **4 Программно-аппаратный комплекс для мониторинга остаточного ресурса изоляции кабелей 6 (10) кВ**

### **4.1 Адаптация разработанной модели старения изоляции для использования в устройстве и формирование требований к нему**

Как уже было сказано во 2 главе данной работы, напряжение и температура постоянно меняются в процессе эксплуатации кабеля. В связи с этим предлагается рассчитывать скорость разрушения материала с шагом в 1 секунду. Таким образом, будет определена функция скорости разрушения материала во времени. Тогда функция изменения количества неразрушенных молекул вещества будет определяться формулой (2.18). Однако интегрирование в устройстве возможно только при использовании численных методов, в связи с этим, функция количества неразрушенных молекул (2.18) будет преобразована к виду формулы расчета численного трапецидального интегрирования:

$$N_t(t) = N_0 - \int_0^t v(t) dt = N_0 - \Delta t \cdot \left( \frac{v_0 + v_n}{2} + \sum_{i=1}^{n-1} v_i \right) \quad (4.1)$$

Однако, учитывая большую временную протяженность процессов, для расчета по формуле (4.1) потребуется хранить большое количество данных. Кроме того, расчет по формуле (4.1) потребует существенной вычислительной мощности. В связи с этим, предлагается не накапливать данные о скорости для расчета количества неразрушенных молекул, а рассчитывать это количество также каждую секунду:

$$N_t(t_i) = N_{i-1} - \frac{v(i) + v(i-1)}{2} \cdot \Delta t \quad (4.2)$$

Таким образом, устройство расчета остаточного ресурса изоляции не потребует существенной вычислительной мощности или необходимости хранения большого объема данных для определения функции изменения количества неразрушенных молекул. Однако нахождение этой функции не является конечной задачей расчета математической модели. Далее требуется определить показательный параметр экспоненциальной функции для расчета

прогнозируемого срока службы. Для данной задачи есть два пути решения: накопление данных за весь период эксплуатации и нахождение параметров функции путем решения системы уравнений (2.23), или определять известные данные системы уравнений в процессе мониторинга параметров. Второй путь решения является более рациональным, так как требует меньшей вычислительной мощности и не требует хранения большого объема данных.

Дальнейший расчет предполагает определение показательного параметра эмпирической функции, определяемого по формуле (2.23):

$$b \sum_{i=1}^n t_i + n \cdot \ln N_0 = \sum_{i=1}^n \ln N_i$$

Слагаемые, представленные суммой в данном уравнении предлагается рассчитывать параллельно с расчетом количества неразрушенных молекул по формуле (4.2).

Тогда, после расчета параметра  $b$  будет производиться определение прогнозируемого срока безотказной работы изоляции, прогнозируемого срока службы изоляции и ее остаточного ресурса.

## **4.2 Устройство мониторинга остаточного ресурса кабельной линии**

Использование разработанной математической модели расчета остаточного ресурса изоляции кабелей требует определения напряженности электрического поля в изоляции кабеля и ее температуры. Как было описано выше, для определения напряженности электрического поля достаточно знать геометрические размеры сечения кабеля и приложенное к нему напряжение.

Определение температуры изоляции кабелей является более сложной задачей, так как для расчета распределения теплового поля кабеля требуется производить измерение тока во всех токоведущих частях кабеля и температуры в какой-либо из его точек.

Учитывая необходимость мониторинга напряжения на кабеле для расчета напряженности электрического поля, решено использовать наиболее простое решение – резистивный делитель напряжения. Выходной сигнал с резистивного

делителя напряжения подается на АЦП электронного устройства, производящего обработку сигнала и рассчитывающего действующее значение напряжения.

Для измерения температуры изоляции возможны несколько технических решений, а также необходимо учитывать ряд рекомендаций по измерению температуры изоляции. Особое внимание измерению температуры изоляции кабеля необходимо уделить в местах возможного перегрева. Среди них могут быть [96]:

- Места пересечения кабеля с тепло- и паропроводами;
- Пучки действующих кабельных линий;
- Участки трасс с сухим или имеющим большое тепловое сопротивление грунтом;
- Концевые и промежуточные муфты;
- Распределительные шкафы и подстанции.

При наличии прямого доступа к кабелю возможно применение контактного и бесконтактного метода измерения (пирометрия) температуры. Однако при отсутствии прямого доступа возможно только косвенное измерение температуры, например, с помощью оптоволоконной жилы.

Контактный способ измерения температуры предполагает использование термических датчиков, в основу работы которых могут быть заложены термопара, термометр сопротивления и др. Погрешность измерения термопары составляет от 1 до 4 °С. Такая величина погрешности измерения недопустима для целей мониторинга температуры. В то же время погрешность измерения температуры термометром сопротивления составляет от 0.1 до 1°С. Следовательно, благодаря более высокой точности измерения температуры, целесообразно использовать этот тип датчика для измерения температуры.

Однако выходным сигналом таких датчиков является аналоговый сигнал, что является их недостатком, так как использование этих датчиков для мониторинга температуры изоляции высоковольтных кабелей может повлиять на точность измерения температуры ввиду возможного образования помех в аналоговом сигнале кабеля. Таким образом, рациональным решением в данном

случае является использование контактного датчика температуры с преобразованием их аналогового сигнала в цифровой [97]. Структурная схема устройства мониторинга температуры поверхности соединительной кабельной муфты представлена на рисунке 4.1.

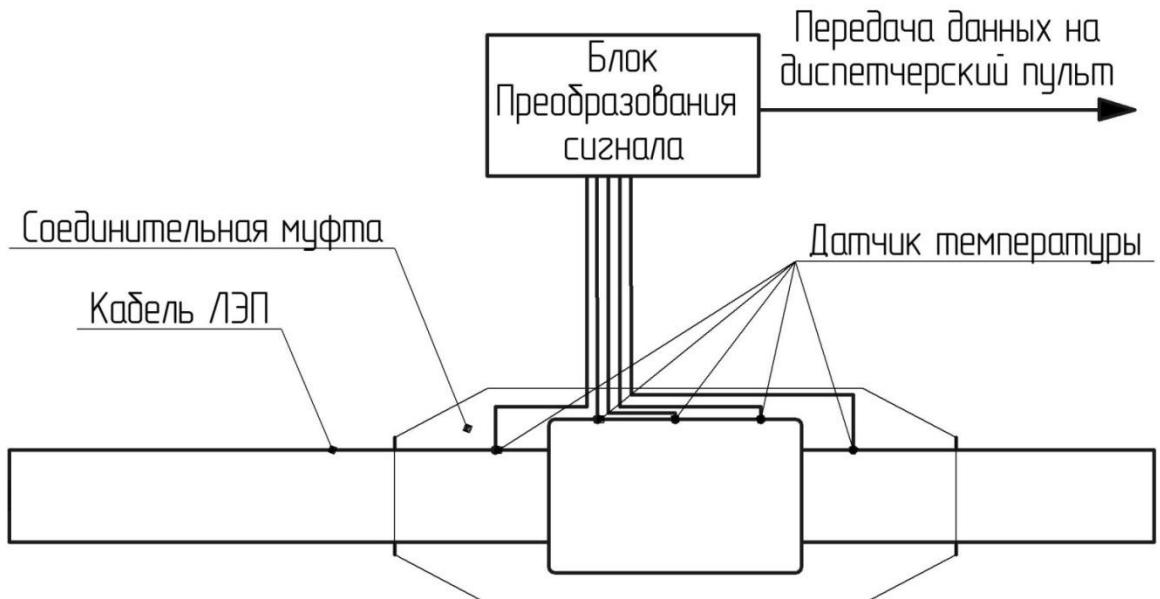


Рисунок 4.1 – Структурная схема измерения температуры кабеля в области соединительной муфты.

При измерении температуры токоведущих частей кабеля следует учитывать необходимость изготовления корпусов датчиков температуры из изоляционных материалов для защиты от действия электрического поля высокой напряженности, а так же необходимо предусмотреть защиту блока преобразования сигнала на случай пробоя изоляции датчика температуры.

Метод оптической пирометрии в данном случае имеет преимущество перед контактными датчиками температуры, так как пирометры не имеют контакта с объектом измерения, что исключает пробой датчиков и делает данный метод измерения безопаснее как при монтаже, так и при эксплуатации. Однако пирометрические датчики имеют ряд недостатков:

- Погрешность измерений в диапазоне температур до 200 °C составляет до 4°C [97].
- Эксплуатационная температура окружающей среды от 5 до 50 °C.

- Отсутствие защиты от пыли, влаги и атмосферных осадков.

Таким образом, применение пирометров для постоянного мониторинга возможно только в отапливаемых помещениях, что сужает их применимость для контроля температуры кабеля, проложенного в земле или по эстакаде.

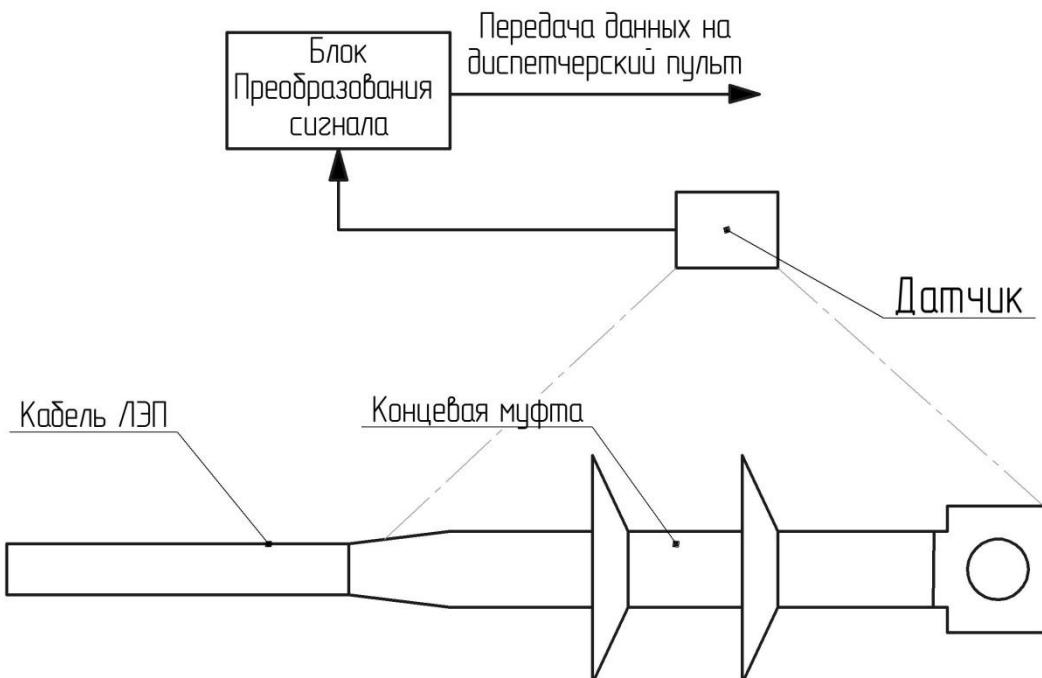


Рисунок 4.2 – Структурная схема устройства мониторинга температуры концевой муфты пирометром

Также одним из известных способов контроля температуры изоляции кабеля является использование оптоволоконного модуля, встроенного в кабель или проложенного вместе с кабельной системой. Принцип измерения температуры изоляции таким способом заключается в анализе соотношения интенсивностей основного светового сигнала, а также его стоксовской и антистоксовской составляющих, так как известно, что оно зависит от температуры и расстояния от измерительного оборудования [98,99].

Применение оптоволокна позволит производить мониторинг температуры и определять место нагрева кабеля на десятках километров кабельной линии. Измерение температуры возможно как снаружи кабеля (рисунок 4.3), так и внутри, если применять в кабели со встроенным оптическим волокном (рисунок 4.4) [100].

Основная сложность измерения и контроля температуры изоляции кабелей этим способом заключается в необходимости анализа спектра излучения с высокой точностью.

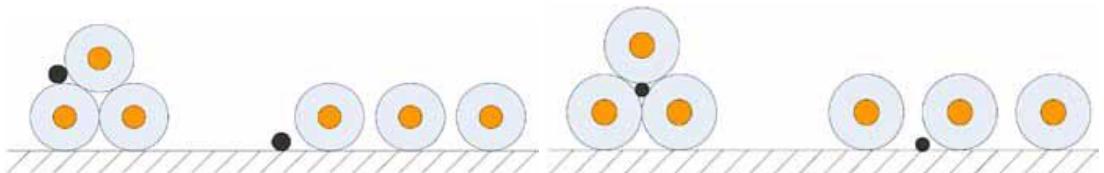


Рисунок 4.3 – Расположение волоконно-оптического модуля вне кабельной системы.



Рисунок 4.4 – Пример конструкции кабеля с изоляцией из спитого полиэтилена с оптоволоконной жилой.

Проанализировав возможные варианты мониторинга температуры изоляции, решено использовать мониторинг температуры изоляции с использованием цифровых контактных датчиков температуры. Использование пирометров в данном случае нецелесообразно ввиду их требований к условиям эксплуатации и относительно высокой погрешности измерения температуры. Измерение температуры с использованием оптоволоконной жилы возможно в

данном случае, однако следует учитывать, что этот метод измерения температуры является относительно новым и доля кабельных линий с оптоволоконными жилами невелика. Кроме того, чаще всего оптоволоконная жила внедряется в кабельные линии высокого напряжения. Тем не менее, при наличии оптоволоконной жилы в кабельной линии, на которую устанавливается устройство определения остаточного ресурса изоляции, возможно использование этого метода измерения температуры кабеля.

Для измерения температуры предлагается использовать датчики DS18B20 от фирмы Dallas Semiconductor. Указанный датчик температуры работает по 1-Wire® интерфейсу, на шину которого может быть подключено до 250 датчиков, что позволяет контролировать температуру большого количества кабельных линий. Так как датчик температуры дает на выходе цифровой сигнал для передачи по 1-Wire® интерфейсу, для обработки такого сигнала требуется цифровое устройство. Для указанных целей решено использовать микроконтроллер. При выборе микроконтроллера определяющими факторами являются производительность, разрядность, тактовая частота. Структурная схема измерения температуры поверхности кабеля с использованием многозонного датчика температуры, состоящего из 10 датчиков DS18B20 представлена на рисунке 4.5.

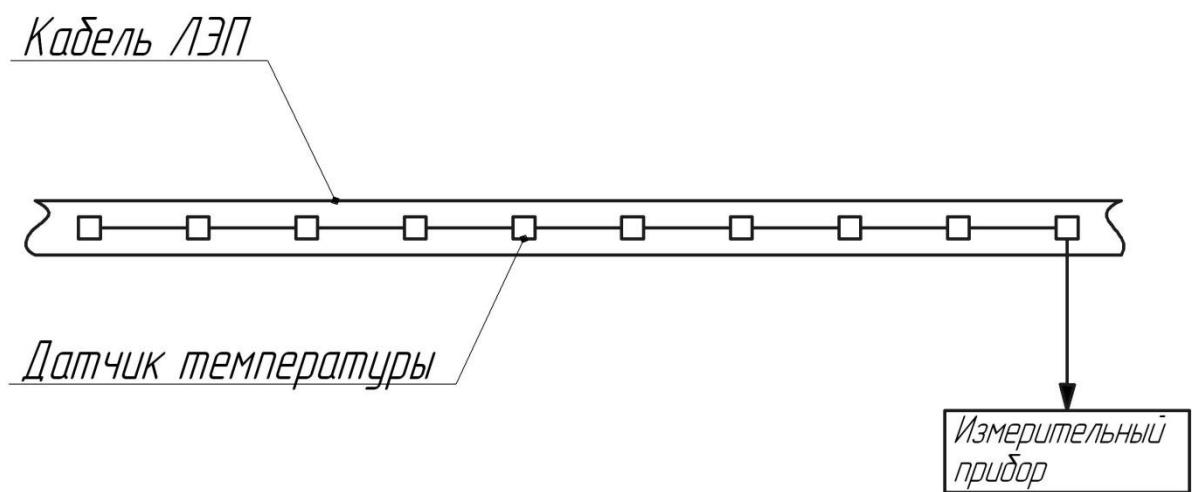


Рисунок 4.5 – Структурная схема измерения температуры кабеля с использованием многозонного датчика температуры.

Учитывая необходимость расчета распределения температуры изоляции кабеля на основе измеренных температуры поверхности оболочки кабеля, тока жилы и тока экрана, требуется использовать алгоритм расчета распределения температуры. Предлагается за основу расчета температуры взять алгоритм, предложенный в [101]. В данной работе авторы предлагают выразить плотность тока кусочно-заданной функцией, так как в расчете рассматривается сечение кабеля, а ток протекает только в жиле и экране:

$$\delta = \begin{cases} \delta_{\mathcal{K}} = \frac{I_{\mathcal{K}}}{S_{\mathcal{K}}}, & 0 < r < R_1 \\ \delta_u = 0, & R_1 < r < R_2 \\ \delta_{\vartheta} = \frac{I_{\vartheta}}{S_{\vartheta}}, & R_2 < r < R_3 \\ \delta_o = 0, & R_3 < r < R_4 \end{cases} \quad (4.3)$$

Где  $r_1, r_2, r_3, r_4$  – геометрические размеры сечения кабеля (рисунок 2.11).

Авторы работы [101] предлагают рассчитывать распределение температуры в изоляции кабеля, используя граничное условие третьего рода, для которого задаются температура окружающей среды и закон теплообмена. Однако, учитывая, что предполагается производить мониторинг температуры поверхности кабеля, предлагается использовать граничное условие первого рода, приняв температуру поверхности кабеля равномерной и равной измеряемой. Тогда температура изоляции будет определяться системой уравнений (4.4).

Однако расчет распределения температуры в изоляции кабеля не обязателен для создания программного обеспечения устройства расчета остаточного ресурса. Предполагается в расчет принимать температуру по радиусу, расположенному по средней линии толщины изоляции. Тогда решение системы уравнений (4.4) сводится к определению граничных условий  $t(r_3), t(r_2)$ , являющихся частными случаями решения первого и второго уравнений системы (4.4). А средняя температура изоляции определяется путем решения третьего уравнения системы. Тогда расчет температуры сводится к решению системы уравнений (4.4).

$$t(r) = \begin{cases} t(r_4) + \frac{\frac{\delta_{\mathcal{H}}^2}{\gamma_{\mathcal{H}}} \cdot S_{\mathcal{H}} + \frac{\delta_{\mathcal{E}}^2}{\gamma_{\mathcal{E}}} \cdot S_{\mathcal{E}}}{2\pi\lambda_o} \ln\left(\frac{r_4}{r}\right), & r_3 \leq r \leq r_4 \\ t(r_3) + \frac{\frac{\delta_{\mathcal{H}}^2}{\gamma_{\mathcal{H}}} \cdot S_{\mathcal{H}} - \frac{\delta_{\mathcal{E}}^2}{\gamma_{\mathcal{E}}} r_2^2 \pi}{2\pi\lambda_{\mathcal{E}}} \ln\left(\frac{r_3}{r}\right) + \frac{\delta_{\mathcal{E}}^2}{\gamma_{\mathcal{E}} \cdot 4\lambda} (r_3^2 - r^2), & r_2 \leq r \leq r_3 \\ t(r_2) + \frac{\frac{\delta_{\mathcal{H}}^2}{\gamma_{\mathcal{H}}} \cdot S_{\mathcal{H}}}{2\pi\lambda_u} \ln\left(\frac{r_2}{r}\right), & r_1 \leq r \leq r_2 \\ t(r_1) + \frac{\delta_{\mathcal{H}}^2}{\gamma_{\mathcal{H}} \cdot 4\lambda_{\mathcal{H}}} (r_1^2 - r^2), & 0 \leq r \leq r_1 \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\begin{cases} t(r_3) = t(r_4) + \frac{\frac{\delta_{\mathcal{H}}^2}{\gamma_{\mathcal{H}}} \cdot S_{\mathcal{H}} + \frac{\delta_{\mathcal{E}}^2}{\gamma_{\mathcal{E}}} \cdot S_{\mathcal{E}}}{2\pi\lambda_o} \ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right) \\ t(r_2) = t(r_3) + \frac{\frac{\delta_{\mathcal{H}}^2}{\gamma_{\mathcal{H}}} \cdot S_{\mathcal{H}} - \frac{\delta_{\mathcal{E}}^2}{\gamma_{\mathcal{E}}} r_2^2 \pi}{2\pi\lambda_{\mathcal{E}}} \ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right) + \frac{\delta_{\mathcal{E}}^2}{\gamma_{\mathcal{E}} \cdot 4\lambda} (r_3^2 - r_2^2) \\ t_{\text{расч}} = t(r_2) + \frac{\frac{\delta_{\mathcal{H}}^2}{\gamma_{\mathcal{H}}} \cdot S_{\mathcal{H}}}{2\pi\lambda_u} \ln\left(\frac{2r_2}{r_1 + r_2}\right) \end{cases} \quad (4.5)$$

где  $\lambda_o$ ,  $\lambda_i$ ,  $\lambda_{\mathcal{E}}$ ,  $\lambda_{\mathcal{H}}$  - теплопроводности оболочки, изоляции, экрана и жилы соответственно.

Расчетная температура, определенная в третьем уравнении системы (4.5) вместе с рассчитанной на основе геометрии и напряжения кабеля подставляется формулу расчета скорости разрушения материала (2.33). Затем определяется количество неразрушенных молекул материала по формуле (4.2) и параллельно рассчитывается показательный параметр эмпирической функции изменения количества неразрушенных молекул (2.23). Исходя из полученных расчетов, определяется время безотказной работы, прогнозируемый срок службы и остаточный ресурс кабеля.

Учитывая необходимость мониторинга температуры изоляции, напряжения на изоляции, тока в жиле и тока в экране кабеля, была разработана структурная схема аппаратно-программного комплекса устройств расчета остаточного ресурса изоляции (рисунок 4.6). Принцип измерения электрических величин реализован на базе разработанного датчика тока и напряжения [102].

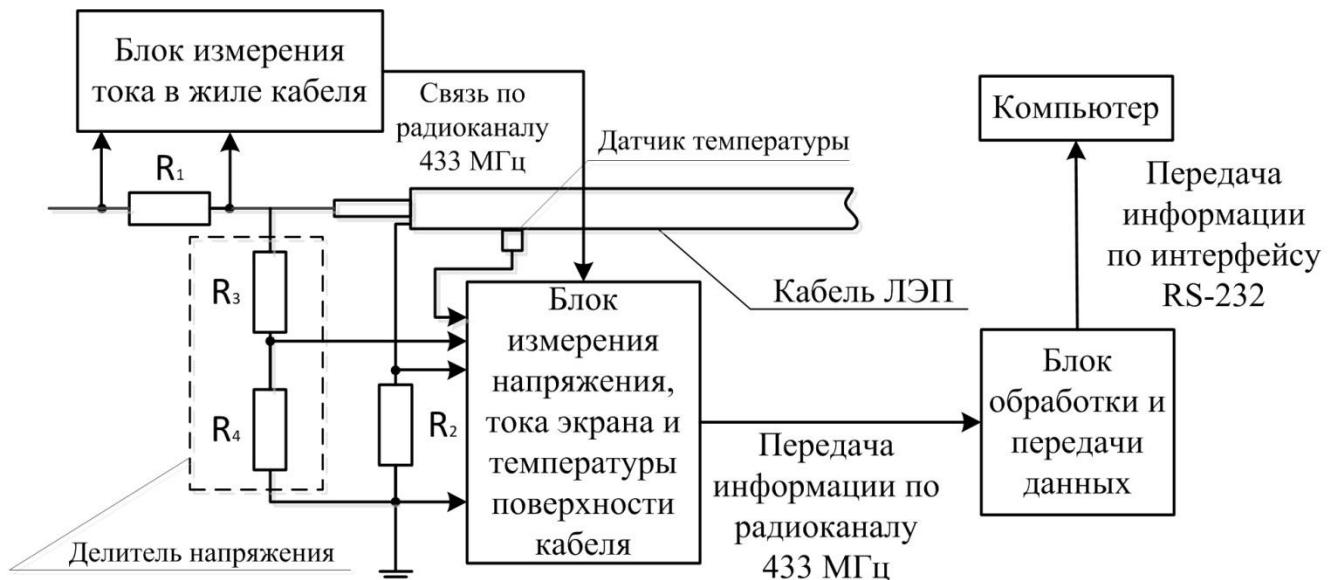


Рисунок 4.6 – Структурная схема аппаратно-программного комплекса устройств определения остаточного ресурса изоляции.

Тестовый образец устройства реализован на базе трех широко распространенных платформ Arduino Uno R3, каждая из которых представлена блоками измерения тока жилы, измерения тока экрана, напряжения и температуры и блока обработки и передачи информации.

Напряжение с токового шунта  $R_1$  подается напрямую на АЦП платы Arduino Uno, которая производит обработку сигнала напряжения и вычисляет действующее значение тока. Так как этот блок подключается к стороне высокого потенциала, питание тестового образца устройства осуществляется от аккумулятора. Полученные результаты измерения передаются с использованием передатчика по каналу 433 МГц.

Выходное напряжение делителя и напряжение с токового шунта  $R_2$  подаются на АЦП второй платы Arduino Uno, который в данном случае запрограммирован на измерение по двум каналам. Кроме того, к этой же плате

подключен цифровой датчик температуры DS18B20. Также к плате подключены приемник и передатчик 433 МГц. После приема данных о токовом сигнале в жиле микроконтроллер платы формирует пакет данных и передает их на третью плату Arduino Uno.

Третья плата принимает данные и передает их по интерфейсу RS-232 на компьютер, который считывает данные с СОМ-порта и рассчитывает остаточный ресурс изоляции кабеля. Программа расчета остаточного ресурса имеет дружественный интерфейс, в ней можно задавать коэффициенты деления токов и напряжения, в случае временного отключения устройств вводить данные о времени отключения для повышения точность прогнозирования. Также программа записывает необходимые данные в файл для их возможного восстановления и обработки после выхода устройства из строя или завершения периода тестирования устройства в эксплуатации. Внешний вид окна программы в процессе работы представлен на рисунке 4.7.

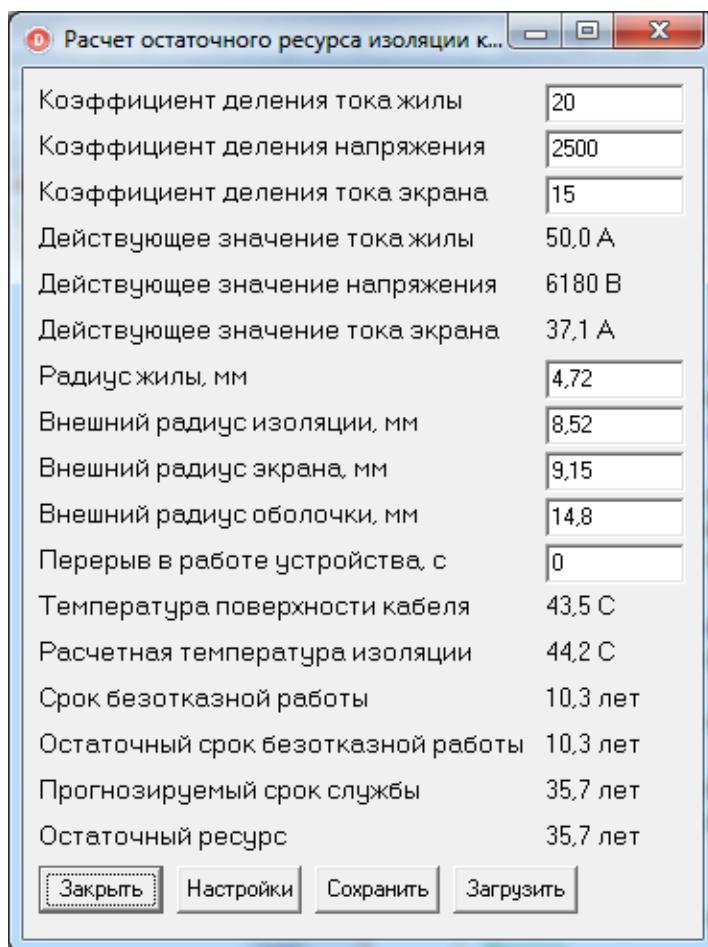


Рисунок 4.7 – Окно программы расчета остаточного ресурса изоляции.

### 4.3 Оценка погрешности расчета остаточного ресурса изоляции кабелей

Для оценки достоверности полученных результатов необходимо произвести оценку погрешности расчета мощности частичных разрядов и остаточного ресурса изоляции кабелей.

#### 4.3.1 Оценка погрешности расчета мощности частичных разрядов

Оценка погрешности расчета мощности частичных разрядов требует определения уравнения преобразования. Исходя из уравнений (3.6) – (3.8), уравнение преобразования можно записать в виде:

$$P = \frac{\sum W}{t_{изм}} \quad (4.6)$$

Где  $W$  – энергия единичного ЧР,  $t_{изм}$  – время измерения.

Для оценки погрешности измерения мощности ЧР решено взять записанный сигнал тока ЧР и напряжения на кабеле. Тогда абсолютная погрешность мощности ЧР будет определяться формулой:

$$\Delta P = \frac{dP}{dW} \cdot \Delta W \quad (4.7)$$

Минимальная зафиксированная энергия частичного разряда составляет менее 1 мкДж, таким образом, шаг изменения энергии ЧР  $\Delta W = 1$  нДж. Учитывая малый шаг изменения регистрируемой энергии ЧР, для получения значительной погрешности значение производной должно быть очень большим, что маловероятно в данном случае, так как приращение мощности является незначительной величиной (от десятых долей до единиц мВт). Энергия импульсов ЧР составляет не более 1 мДж. Следовательно, при расчете абсолютной погрешности по формуле (4.7) значение будет составлять единицы мкВт, что несущественно, по сравнению с измеряемой мощностью ЧР.

### 4.3.2 Оценка погрешности расчета остаточного срока службы кабеля

Учитывая формулы (2.24) и (2.26), срок службы изоляции кабеля зависит только от эмпирического показательного параметра  $b$ . В работе решено определять его методом наименьших квадратов на основе данных о напряжении на кабеле, токах в жиле и экране и температуре поверхности кабеля. Однако перечисленные параметры изменяются хаотически и не могут быть описаны какими-либо уравнениями. Поэтому, для оценки погрешности математической модели, примем допущение, что параметры, влияющие на остаточный ресурс кабеля неизменны во времени. Тогда, учитывая (2.17) и (2.20):

$$b = -cBE^n K_0 e^{-\frac{W_a}{kT}} \quad (4.8)$$

Однако полученная формула требует преобразования для дальнейшего расчета. В частности, требуется выразить напряженность электрического поля через напряжение кабеля и расчетную температуру через температуру поверхности кабеля и токи в жиле и экране. Напряженность электрического поля решено взять по среднему радиусу кабеля. Тогда, с учетом (2.11), напряженность электрического поля в изоляции кабеля будет подчиняться выражению:

$$E = \frac{U}{\frac{R_1 + R_2}{2} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} = XU \quad (4.9)$$

То есть

$$X = \frac{1}{\frac{R_2 + R_1}{2} \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \quad (4.10)$$

Исходя из системы уравнения (4.5), расчетная температура изоляции равна:

$$T = T_{noe} + I_{\mathcal{H}C}^2 Y + I_{\mathcal{E}}^2 Z \quad (4.11)$$

где

$$Y = \frac{\lambda_3 \lambda_u \ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right) + \lambda_o \lambda_u \ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right) + \lambda_3 \lambda_o \ln\left(\frac{2R_2}{R_1 + R_2}\right)}{2\pi \lambda_o \lambda_u \lambda_3 S_{jk} \gamma_{jk}} \quad (4.12)$$

$$Z = \frac{2S_3 \lambda_3 \lambda_u \ln\left(\frac{R_4}{R_3}\right) - 2\pi R_2^2 \lambda_o \lambda_u \ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right) + (R_3^2 - R_2^2) \lambda_3 \lambda_o \ln\left(\frac{2R_2}{R_1 + R_2}\right)}{2\pi \lambda_o \lambda_u \lambda_3 S_3^2 \gamma_3} \quad (4.13)$$

Тогда, с учетом уравнения (4.8), уравнением преобразования будет:

$$\tau_{cl} = \frac{1.514}{W_a} e^{-\frac{k(T_{noe} + I_{jk}^2 Y + I_3^2 Z)}{cB(XU)^n K_0}} \quad (4.14)$$

Следовательно, абсолютная погрешность срока службы изоляции будет рассчитываться по формуле [103]:

$$\Delta \tau_{cl} = \sqrt{\left(\frac{\partial \tau_{cl}}{\partial U} \cdot \Delta U\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau_{cl}}{\partial T_{noe}} \cdot \Delta T_{noe}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau_{cl}}{\partial I_{jk}} \cdot \Delta I_{jk}\right)^2 + \left(\frac{\partial \tau_{cl}}{\partial I_3} \cdot \Delta I_3\right)^2} \quad (4.15)$$

Учитывая, что известно аналитическое выражение для срока службы изоляции, решено рассчитывать частные производные аналитически:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_{cl}}{\partial U} &= \frac{\partial}{\partial U} \frac{1.514}{W_a} e^{-\frac{k(T_{noe} + I_{jk}^2 Y + I_3^2 Z)}{cB(XU)^n K_0}} = \\ &= \frac{1.514 \cdot (-n)}{W_a} e^{-\frac{k(T_{noe} + I_{jk}^2 Y + I_3^2 Z)}{cBX^n U^{n+1} K_0}} \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_{cl}}{\partial T_{noe}} &= \frac{\partial}{\partial T_{noe}} \frac{1.514}{W_a} e^{-\frac{k(T_{noe} + I_{jk}^2 Y + I_3^2 Z)}{cB(XU)^n K_0}} = \\ &= -\frac{W_a}{k(T_{noe} + I_{jk}^2 Y + I_3^2 Z)^2} \frac{1.514}{cB(XU)^n K_0} e^{\frac{W_a}{k(T_{noe} + I_{jk}^2 Y + I_3^2 Z)}} \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial \tau_{cl}}{\partial I_{\mathcal{K}}} = \frac{\partial}{\partial I_{\mathcal{K}}} \frac{1.514}{cB(XU)^n K_0 e^{-\frac{W_a}{k(T_{noe} + I_{\mathcal{K}}^2 Y + I_{\mathcal{O}}^2 Z)}}} =$$

$$(4.18)$$

$$= -\frac{2I_{\mathcal{K}} Y W_a}{k(T_{noe} + I_{\mathcal{K}}^2 Y + I_{\mathcal{O}}^2 Z)^2} \frac{1.514}{cB(XU)^n K_0} e^{\frac{W_a}{k(T_{noe} + I_{\mathcal{K}}^2 Y + I_{\mathcal{O}}^2 Z)}}$$

$$\frac{\partial \tau_{cl}}{\partial I_{\mathcal{O}}} = \frac{\partial}{\partial I_{\mathcal{O}}} \frac{1.514}{cB(XU)^n K_0 e^{-\frac{W_a}{k(T_{noe} + I_{\mathcal{K}}^2 Y + I_{\mathcal{O}}^2 Z)}}} =$$

$$(4.19)$$

$$= -\frac{2I_{\mathcal{O}} Z W_a}{k(T_{noe} + I_{\mathcal{K}}^2 Y + I_{\mathcal{O}}^2 Z)^2} \frac{1.514}{cB(XU)^n K_0} e^{\frac{W_a}{k(T_{noe} + I_{\mathcal{K}}^2 Y + I_{\mathcal{O}}^2 Z)}}$$

Следующим этапом является оценка относительной погрешности расчета прогнозируемого срока службы изоляции, которая определяется формулой:

$$\varepsilon_{\tau_{cl}} = \frac{\Delta \tau_{cl}}{\tau_{cl}} \quad (4.20)$$

Погрешность необходимо определить в области рабочих значений измеряемых величин, которыми являются напряжение, токи в жиле и экране и температура поверхности кабеля. Исходя из полученных результатов расчета (рисунки 4.8 – 4.11), с помощью разработанного устройства и математической модели рекомендуется оценивать сроки службы кабелей, эксплуатируемых в умеренном и холодном климате и проложенных в земле. В данном случае оцениваемая погрешность расчета срока службы изоляции составит порядка 14%.

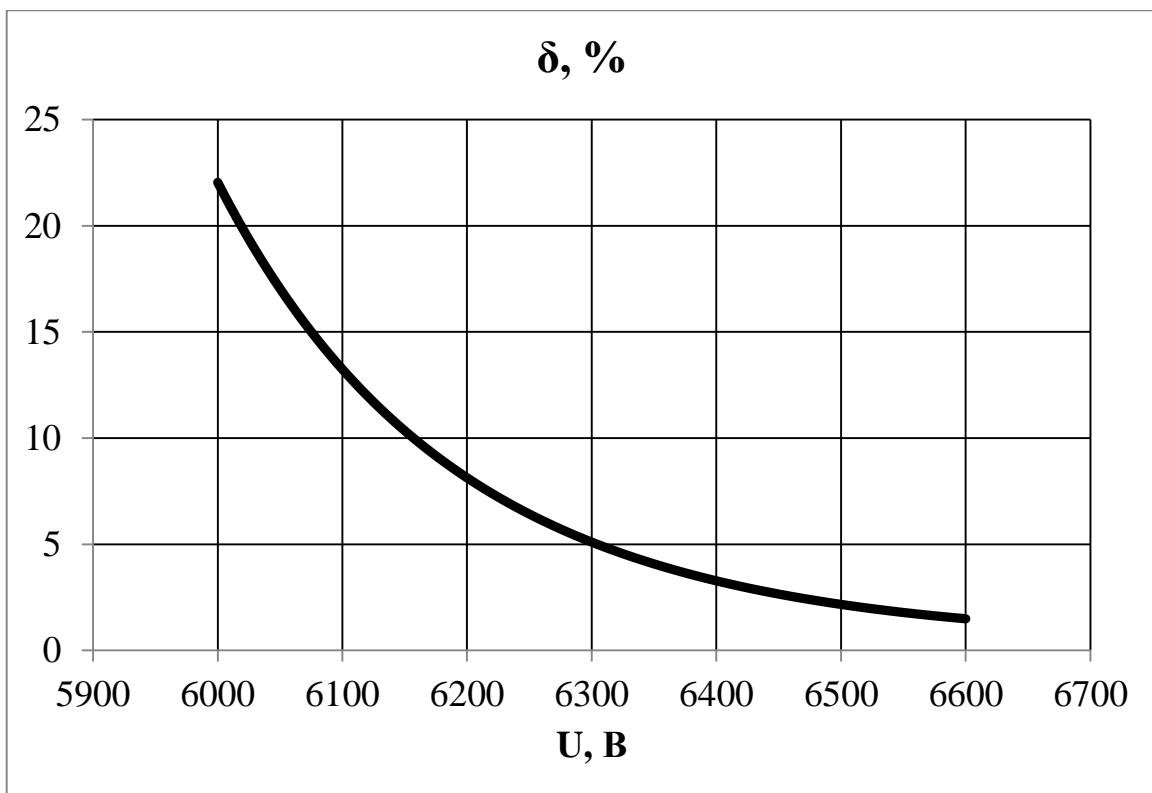


Рисунок 4.8 – Зависимость относительной погрешности от напряжения.

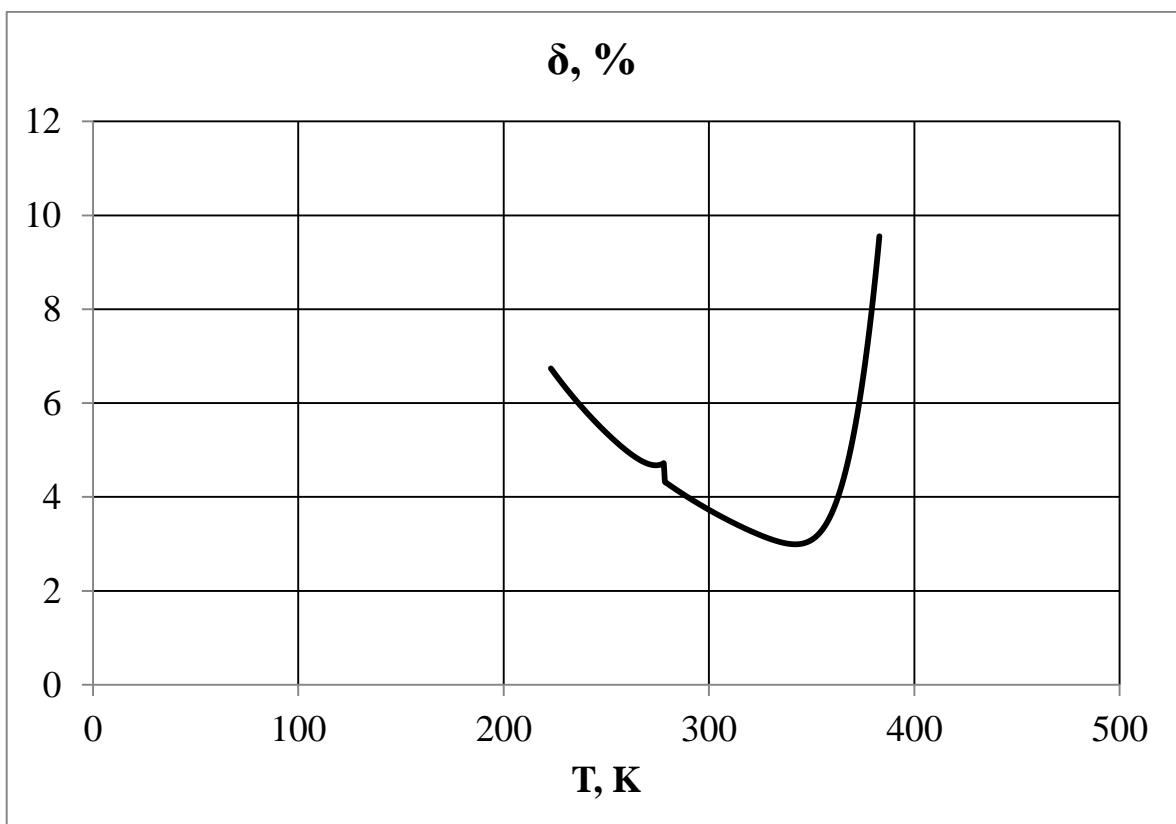


Рисунок 4.9 – Зависимость относительной погрешности от температуры поверхности кабеля.

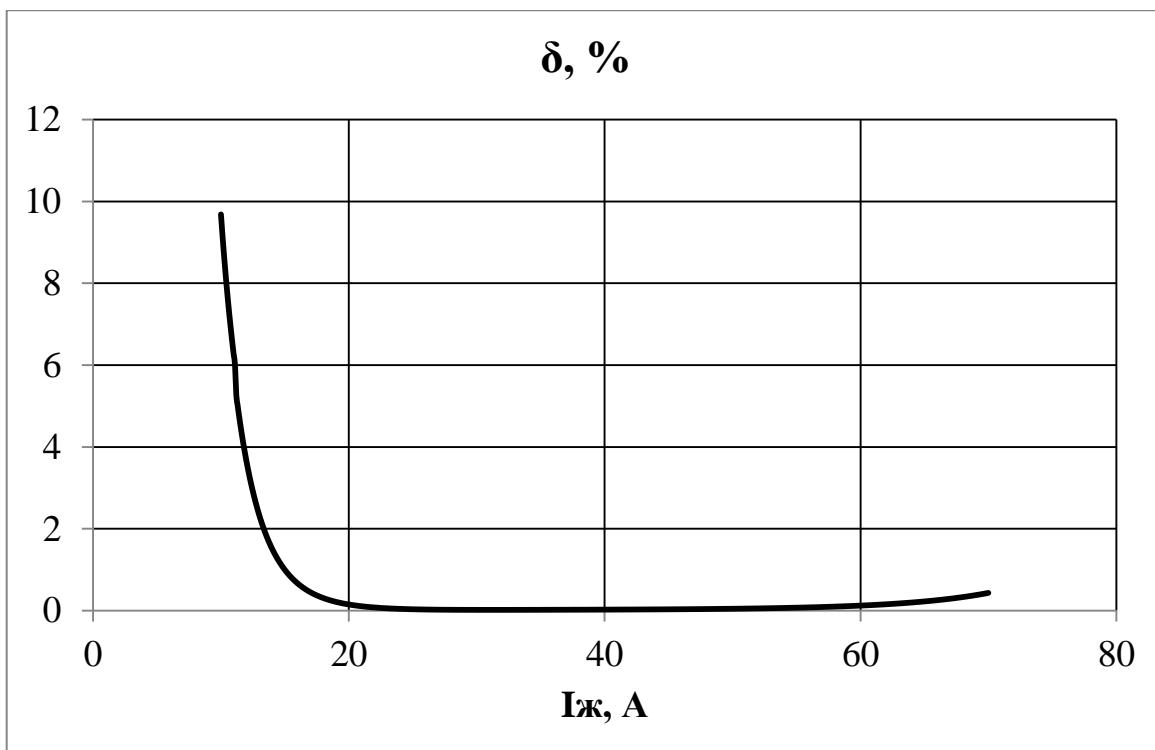


Рисунок 4.10 – Зависимость относительной погрешности от тока в жиле кабеля.

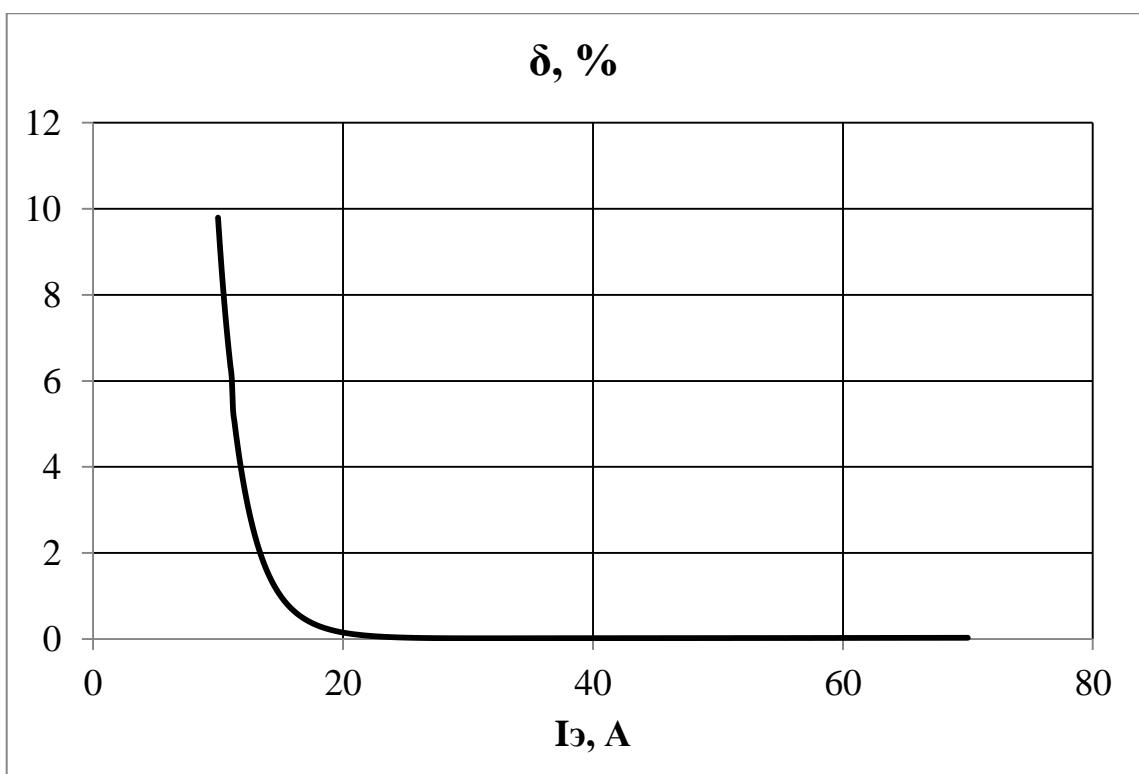


Рисунок 4.11 – Зависимость относительной погрешности от тока в экране кабеля.

#### **4.4 Выводы по главе**

1. Предложено изменение математической модели расчета срока службы изоляции для реализации ее работы в аппаратно-программном комплексе устройств, производящем расчет прогнозируемого срока службы изоляции.
2. Предложено техническое решение по реализации предложенного аппаратно-программного комплекса устройств для определения остаточного ресурса изоляции кабелей из спитого полиэтилена на базе датчика тока и напряжения, защищенного патентом [102].
3. Произведена оценка погрешности производимых расчетов. Результаты показали, что погрешностью расчета мощности ЧР можно пренебречь. Погрешность расчета срока службы изоляции составляет около 14%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Известное многообразие методов диагностики и контроля состояния изоляции подтверждает актуальность исследования по их разработке, а также может послужить основой для разработки методов определения остаточного ресурса диэлектрика. Многие из перечисленных испытаний являются разрушающими для изоляции и могут привести к быстрому выходу кабеля из строя, в связи с этим, актуальным является вопрос разработки неразрушающих методов контроля состояния изоляционного материала.
2. Анализ известных математических моделей старения изоляции показал схожий характер изменения срока службы в зависимости от воздействующих параметров. В качестве опорной математической модели решено использовать модель Кучинского Г. С., так как она основывается на энергетических воздействиях на изоляцию.
3. Разработанная математическая модель расчета остаточного ресурса изоляции кабеля позволяет спрогнозировать износ изоляции и необходимость ее замены с учетом корректировок, внесенных после анализа результатов экспериментальных исследований. Важным достоинством модели является ее реализуемость в устройстве мониторинга остаточного ресурса изоляции.
4. Предложенная схема регистрации электрических сигналов частичных разрядов позволяет производить отстройку от помех, наводимых из сети и от источника питания. Благодаря этому производится регистрация частичных разрядов, возникающих только в схеме измерения.
5. Разработанная экспериментальная установка для термоэлектрического состаривания изоляции позволяет проводить экспериментальные исследования в широком диапазоне температур и напряжений, а также в течение длительного времени (время проводимых экспериментальных исследований более 2500 часов).

6. Полученные результаты расчета мощности частичных разрядов позволяют оценить степень воздействия ЧР на разрушение изоляционного материала, а также уточнить математическую модель расчета срока службы изоляции путем определения функции зависимости мощности ЧР от напряженности электрического поля в изоляции.
7. Результаты экспериментальных исследований потребовали произвести корректировку математической модели определения остаточного ресурса изоляции, так как наблюдалось несовпадение результатов расчета и эксперимента, вызванное тем, что математическая модель не учитывает разрушающие изоляцию факторы, кроме напряжения и температуры. Для корректировки модели решено ввести коэффициент, учитывающий действие других факторов.
8. Предложено техническое решение по реализации разработанного аппаратно-программного комплекса устройств для определения остаточного ресурса изоляции кабелей из сшитого полиэтилена на базе датчика тока и напряжения, защищенного патентом на изобретение.
9. Оценка показала, что погрешность расчета срока службы изоляции составляет около 14%.

## Библиографический список

1. Правила устройства электроустановок. - М.: НЦ ЭНАС, 2000. - 552 с.
2. Михель, А.А. Обзор методов диагностики кабельных линий напряжений 6 и 10 кВ / А.А. Михель, А.В. Авдонин, Д.М. Левин // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. - 2009. - № 2. - С. 31–39.
3. Пономарев Н.В. Анализ методов диагностики состояния силовых высоковольтных кабельных линий / Н.В. Пономарев// Вестник КузГТУ. - 2012. - № 5(93). - С. 68–71.
4. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях / Г.С. Кучинский. - Л.: «Энергия». Ленингр. Отд-ние., 1979. - 224 с.
5. Койков, С.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков. / С.Н. Койков, А.Н. Цикин М. - Л.: Энергия, 1968. -186 с.
6. Вдовико В.П. Частичные разряды в диагностировании высоковольтного оборудования / В.П. Вдовико. - Новосибирск: Наука, 2007. - 155 с.
7. Пат. 2215296 Российская Федерация МПК G01R 27/26 (1995.01). Устройство для определения тангенса угла диэлектрических потерь. / Михеев Г. М. – № 2002100545/09; заявл. 03.01.2002; опубл. 27.07.2003, бюл. №21. – 2 с.
8. Пат. 2115131 Российская Федерация МПК G01R 27/26 (1995.01). Устройство для определения тангенса угла диэлектрических потерь. / Михеев Г. М.; – № 94032785/09; заявл. 08.09.1994; опубл. 10.07.1998. – 2 с.
9. Степанов, В.М. Определение электрического сопротивления изоляции и емкости кабелей / В.М. Степанов, С.В. Ершов // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2010. - № 3–5. - С. 62–64.
10. Соломенцев, К.Ю. Измеритель тока для исследования токов абсорбции в диэлектриках / К.Ю. Соломенцев и др. // Современные энергетические системы и комплексы и управление ими: материалы 13-ой Международной научно-практической конференции. - 2015. - С. 97–99.
11. Власов, А.Б. Факторный анализ диагностической модели тепловизионного контроля электрической машины / А.Б. Власов, Е.А. Мухин, Б.Д. Царев // Вестник МГТУ. - 2013. - № 1. - С. 46–51.

12. Уразов, Д.Ю. О преимуществах тепловизионного метода анализа работы электрооборудования / Д.Ю. Уразов // Вестник ВГУИТ. - 2012. - №3. - С. 51–53.
13. Сотников, В.В. Математическое моделирование системы локализации и типизации повреждений работающей силовой сети / В.В. Сотников // Вестник СГТУ. - 2011. - № 4(62). - С. 165–169.
14. Гудков, В.В. Особенности методик и средств испытаний кабелей с СПЭ-изоляцией / В.В. Гудков // Энергобезопасность и энергосбережение. - 2009. - № 6. - С. 9–11.
15. Коробейников, С.М. Физика возникновения, характеристики и классификация частичных разрядов в высоковольтном оборудовании / С.М. Коробейников, М.В. Вечёркин // ЭС и К. - 2010. - № 1. - С. 204–212.
16. Сиялов, Н.В. Совершенствование метода регистрации частичных разрядов / Н.В. Сиялов, Н.А. Фоменко, С.А. Словесный // Труды VI международной молодежной научно-технической конференции «ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА ГЛАЗАМИ МОЛОДЕЖИ». - 2015. - Т. 1. - С. 576–581.
17. Моногаров, О.И. Выбор датчика частичных разрядов для диагностики кабельной изоляции / О.И. Моногаров // Наука и современность. - 2016. - №46. - С. 86–90.
18. Shafiq, M. Effect of geometrical parameters on high frequency performance of Rogowski coil for partial discharge measurements / M. Shafiq и др.// Meas. J. Int. Meas. Confed. - 2014. - Т. 49. - № 1. - С. 126–137.
19. Куценко, С.М. Характеристики частичных разрядов в изоляторах из фарфора и поликарбоната / С.М. Куценко, Н.Н. Климов, В.И. Муратов // Известия ТПУ. - 2006. - № 2. - С. 82–87.
20. Ashraf, S.A. Study of propagation behaviour of Partial Discharge acoustic signals in a 3-D model tank / S.A. Ashraf и др. // Proc. 2009 44th Int. Univ. Power Eng. Conf. - 2009. - № 1. - С. 3–7.
21. Veloso, G.F.C. Identification of wavefronts in Partial Discharge acoustic signals using discrete wavelet transform / G.F.C. Veloso и др. // 2008 IEEE Int. Symp.

Ind. Electron. - 2008. - № 1. - C. 1003–1008.

22. Kundu, P. Wavelet based Fractal Analyzing Method of Partial Discharge Acoustic Emission Signal / P. Kundu, P.N.K. Kishore, P.A.K. Sinha // Processing. - 2007. - August. C. 8–11.
23. He, X. Online partial discharge detection and location system using Wireless Sensor Network / X. He, G. Xie, Y. Jiang // Energy Procedia. - 2011. - T. 12. - C. 420–428.
24. Danouj, B. Using a new generation of piezoelectric sensors for partial discharge detection / B. Danouj, S. Tahan, E. David // Measurement. - 2013. - T.46. - №1. - C. 660–666.
25. McDermid, W. Response of capacitive couplers on a generating unit to various sources of partial discharge / W. McDermid, J.C. Bromley, T. Black // Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. - 2006. - C. 73–76.
26. Tian, Y. Partial discharge detection in cables using VHF capacitive couplers / Y. Tian и др. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2003. - T.10. - №2. - C. 343–353.
27. Mota, H.D.O. Partial discharge signal denoising with spatially adaptive wavelet thresholding and support vector machines / H.D.O. Mota и др. // Electr. Power Syst. Res. - 2011. - T. 81. - № 2. - C. 644–659.
28. Su, M.-S. Phase determination of partial discharge source in three-phase transmission lines using discrete wavelet transform and probabilistic neural networks / M.-S. Su, J.-F. Chen, Y.-H. Lin // Int. J. Electr. Power Energy Syst. - 2013. - T. 51. - C. 27–34.
29. Wei, Z. Partial Discharge Signal Obtain Based on Adaptive Wavelet with Mathematical Morphology / Z. Wei и др. // Phys. Procedia. - 2012. - T.24, - 2011. - C. 912–917.
30. Carvalho, A.T. Identification of partial discharges immersed in noise in large hydro-generators based on improved wavelet selection methods / A.T. Carvalho и др. // Meas. J. Int. Meas. Confed. Elsevier Ltd. - 2015. - T. 75. - C. 122–133.

31. Chen, H.-C. A novel extension neural network based partial discharge pattern recognition method for high-voltage power apparatus / H.-C. Chen, F.-C. Gu, M.-H. Wang // Expert Syst. Appl. - 2012. - T.39. - № 3. - C. 3423–3431.
32. Venkatesh, S. Orthogonal least square center selection technique - A robust scheme for multiple source Partial Discharge pattern recognition using Radial Basis Probabilistic Neural Network / S. Venkatesh, S. Gopal // Expert Syst. Appl. - 2011. - T. 38. - № 7. - C. 8978–8989.
33. Perpiñán, O. Signal analysis and feature generation for pattern identification of partial discharges in high-voltage equipment / O. Perpiñán и др. // Electr. Power Syst. Res. - 2013. - T. 95. - C. 56–65.
34. Gu, F.C. Partial discharge pattern recognition of power cable joints using extension method with fractal feature enhancement / F.C. Gu и др. // Expert Syst. Appl. - 2012. - T. 39 - № 3. - C. 2804–2812.
35. Chen, H.C. Pattern recognition with cerebellar model articulation controller and fractal features on partial discharges / H.C. Chen, F.C. Gu // Expert Syst. Appl. - 2012. - T. 39. - № 7. - C. 6575–6584.
36. Nafar, M. Using correlation coefficients for locating partial discharge in power transformer / M. Nafar, T. Niknam, A. Gheisari // Int. J. Electr. Power Energy Syst. - 2011. - T. 33. - № 3. - C. 493–499.
37. Ji T.Y. Partial discharge location using a hybrid transformer winding model with morphology-based noise removal / T.Y. Ji, W.H. Tang, Q.H. Wu // Electr. Power Syst. Res. - 2013. - T. 101. - C. 9–16.
38. Ardila-Rey, J.A. Partial discharge and noise separation by means of spectral-power clustering techniques / J.A. Ardila-Rey и др. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2013. - T. 20. - № 4. - C. 1436–1443.
39. Deshpande, A.S. Partial discharge analysis using energy patterns / A.S. Deshpande, H.A. Mangalvedekar, A.N. Cheeran // Int. J. Electr. Power Energy Syst. - 2013. - T. 53. - C. 184–195.
40. Kundu P. Identification of two simultaneous partial discharge sources in an oil-pressboard insulation system using acoustic emission techniques / P. Kundu,

- N.K. Kishore, A.K. Sinha // Appl. Acoust. - 2012. - Т. 73. - № 4. - С. 395–401.
41. Biswas, S. An approach based on rough set theory for identification of single and multiple partial discharge source / S. Biswas и др. // Int. J. Electr. Power Energy Syst. - 2013. - Т. 46. - С. 163–174.
  42. Ouatah, E. Characteristics of partial discharge pulses propagation in shielded power cable / E. Ouatah и др. // Electr. Power Syst. Res. Elsevier B.V. - 2013. - Т. 99. - С. 38–44.
  43. Cselkó, R. Challenges of partial discharge diagnostics of low-voltage cables / R. Cselkó, I. Berta // J. Electrostat. Elsevier Ltd. - 2013. - Т. 71. - № 3. - С. 558–563.
  44. Sha, Y. Measurement and simulation of partial discharge in oil-paper insulation under the combined AC-DC voltage / Y. Sha и др. // J. Electrostat. Elsevier Ltd. - 2013. - Т. 71. - № 3. - С. 540–546.
  45. Исмагилов, Ф.Р. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика / Ф.Р. Исмагилов, Д.В. Максудов // Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. - 2011. - Т. 3, - № 43. - С. 98–100.
  46. Беспрозванных, А.В. Анализ структуры поля и обоснование напряжений диагностики по частичным разрядам изоляции экранированных витых пар / А.В. Беспрозванных, А.Г. Кессаев // ЕiЕ. - 2014. - № 6. - С. 61–65.
  47. Борисов, П.А. Водные триинги и принцип определения участков кабельной линии содержащих водные триинги при трассировке кабельных линий / П. А. Борисов// Известия ТулГУ. Технические науки. - 2013. - Т. 2. - №12. - С. 176–182.
  48. Кучерявая, И.Н. Компьютерное моделирование частичного разряда в полимерной изоляции с воздушным включением / И.Н. Кучерявая // Праці інституту електродинаміки національної академії наук України. -2013. - № 34.
  49. Нагдалян, А.А. Исследование характеристик электроимпульсного разряда в водных растворах хлористого натрия / А.А. Нагдалян и др. // Научный

журнал КубГАУ. - 2013. - № 86. - С. 1–10.

50. Najafi Pour, A. A comprehensive circuit model for partial discharge activities in cable insulation due to electrical treeing / A. Najafi Pour, S.M. Shahrtash // Int. J. Electr. Power Energy Syst. Elsevier Ltd. - 2013. - Т. 44. - № 1. - С. 646–655.
51. Резинкина, М.М. Зависимость фазы появления частичных разрядов в полиэтиленовой изоляции от стадии роста дендрита / М.М. Резинкина, О.Л. Резинкин, М.И. Носенко // Журнал технической физики. - 2001. - Т. 71. - № 3. - С. 69–71.
52. Fan, W. Dielectric loss angle data processing based on adaptive weighted data fusion algorithm of the aging mine cable / W. Fan, X. Ma // 2017 29th Chinese Control And Decision Conference (CCDC). - 2017. - С. 5739–5742.
53. Лимаренко, Н.А. Исследование диэлектрических свойств электретов на основе эпоксидных полимеров / Н.А. Лимаренко и др. // Вестник Казанского технологического университета. - 2013. - № 2.
54. Yi, H. An novel in-service cable dielectric loss measurement / H. Yi, C. Zhou // 2017 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). - 2017. - С. 119–122.
55. ГОСТ 16336-2013 Композиции полиэтилена для кабельной промышленности. Технические условия. - М.: Стандартинформ. - 31 с.
56. Сороколетов, И.Н. Диагностика кабелей с изоляцией из спитого полиэтилена / И.Н. Сороколетов, П.Н. Бондаренко // Труды Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. - 2012. - № 514. - С. 43–46.
57. Suguna, M. Fault localisation of electrical equipments using thermal imaging technique / M. Suguna, S.M.M. Roomi, I. Sanofer // 2016 International Conference on Emerging Technological Trends (ICETT). - 2016. - С. 1–3.
58. Гефле, О.С. Диагностика предпробивного состояния полимерных диэлектриков по тепловым эффектам / О.С. Гефле, Е.И. Черкашина // Известия ТПУ. - 2005. - № 1. - С. 54–59.
59. Da Costa, E.G. Characterization of polymeric insulators using thermal and UV imaging under laboratory conditions / E.G. Da Costa и др. // IEEE Trans.

- Dielectr. Electr. Insul. - 2009. - Т. 16. - № 4. -С. 985–992.
60. Thomas, G. Synthetic aperture ultrasound imaging of XLPE insulation of underground power cables / G. Thomas и др. // IEEE Electr. Insul. Mag. - 2010. - Т. 26. - № 3. - С. 24–34.
  61. Аникушин Д.Г. Анализ методов определения мест повреждения кабельных линий на основе неразрушающей диагностики / Д.Г. Аникушин // Известия ТулГУ. Технические науки. - 2012. - Т. 3. - № 12. - С. 78–84.
  62. Конкин, А.А. Полиолефиновые волокна / А.А. Конкин, М.П. Зверев - 3-е изд. - Л.: Химия, 1966. - 280 с.
  63. Тагер, А.А. Физико-химия полимеров / А.А. Тагер; под ред. А.А. Аскадского - М.: Научный мир, 2007. - 576 с.
  64. Whitman, L.C. Calculation of life characteristics of insulation / L.C. Whitman, P. Doigan // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics. - 1954. - Т. 73. - № 3. - С. 193–198.
  65. Жанчишев, Б.Д. Радиационная электризация диэлектриков / Б.Д. Жанчишев, К.А. Истомин // Ресурсоэффективные системы в управлении и контроле взгляд в будущее научные труды III Международной конференции школьников, студентов, аспирантов, молодых ученых. - Томск: Изд-во ТПУ - 2014. - Т. 1. - С. 83–90.
  66. Михеев, Г.М. Эффективность применения кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена взамен токопровода из алюминиевых шин / Г.М. Михеев и др. // Вестник ЧГУ. - 2010. - № 3.
  67. Luo, P. Thermal and mechanical properties analysis for EHV XLPE cables with different operating years / P. Luo и др. // 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. - Т. 3. - С. 47–51.
  68. Shimada, A. Degradation distribution in insulation materials of cables by accelerated thermal and radiation ageing / A. Shimada и др. // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2013. - Т. 20. - № 6. - С. 2107–2116.
  69. Aras, F. Aging of 154 kV underground power cable insulation under combined thermal and electrical stresses / F. Aras и др. // IEEE Electr. Insul.

Mag. - 2007. - T. 23. - № 5. - C. 25–33.

70. Kim, C. Investigation of dielectric behavior of thermally aged XLPE cable in the high-frequency range / C. Kim и др. // Polym. Test. - 2006. - T. 25. - №4. - C. 553–561.
71. Chen, J. Method of estimating the remaining life of the 10 kV XLPE cable operated 10 years / J. Chen, S. Wang // Proc. 6th Int. Conf. Prop. Appl. Dielectr. Mater. (Cat. No.00CH36347). - 2000. -T. 1. - C. 204–208.
72. Langlois, V. Thermooxidative aging of crosslinked linear polyethylene: Stabilizer consumption and lifetime prediction / V. Langlois и др. // Polym. Degrad. Stab. - 1993. - T. 40. - № 3. - C. 399–409.
73. Gulmine, J. V. Correlations between structure and accelerated artificial ageing of XLPE / J. V. Gulmine, L. Akcelrud // Eur. Polym. J. - 2006. - T.42. - №3. - C. 553–562.
74. Celina, M. Accelerated aging and lifetime prediction: Review of non-Arrhenius behaviour due to two competing processes / M. Celina, K.T. Gillen, R.A. Assink // Polym. Degrad. Stab. - 2005. - T. 90. - № 3. - C. 395–404.
75. Sugimoto, M. Product analysis for polyethylene degradation by radiation and thermal ageing / M. Sugimoto и др. // Radiat. Phys. Chem. Elsevier. - 2013. - T.82. - № 1. - C. 69–73.
76. Mazzanti, G. Analysis of the combined effects of load cycling, thermal transients, and electro-thermal stress on life expectancy of high-voltage AC cables / G. Mazzanti // IEEE Trans. Power Deliv. - 2007. - T. 22. - № 4. - C. 2000–2009.
77. Montanari, G.C. Progress in electrothermal life modeling of electrical insulation during the last decades / G.C. Montanari, G. Mazzanti, L. Simoni // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 2002. - T. 9. - № 5. - C. 730–745.
78. Mazzanti, G. The combination of electro-thermal stress, load cycling and thermal transients and its effects on the life of high voltage AC cables / G. Mazzanti // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. -2009. - T. 16. - № 4. - C. 1168–1179.
79. Crine, J.-P. On the interpretation of some electrical aging and relaxation phenomena in solid dielectrics / J.-P. Crine // IEEE Trans. Dielectr. Electr.

Insul. - 2005. - Т. 12. - № 6. - С. 1089–1107.

80. Parpal, J.L. Electrical aging of extruded dielectric cables: A physical model / J.L. Parpal, J.P. Crine, C. Dang // IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. - 1997. - Т. 4. - № 2. - С. 197–209.
81. Zhurkov, S.N. Kinetic concept of the strength of solids / S.N. Zhurkov // Int. J. Fract. - 1984. - Т. 26. - № 4. - С. 295–307.
82. Zhurkov? S.N. Kinetic Concept of Strength of Solids / S.N. Zhurkov // Intern. J. Fract. Mech. - 1965. - Т. 1. - С. 311–323.
83. Закревский, В.А. Электрическое разрушение тонких полимерных пленок / В.А. Закревский, Н.Т. Сударь // Физика твердого тела. - 2005. - Т.47. - №5. - С. 931–936.
84. СТО 56947007- 29.060.20.020-2009 Методические указания по применению силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на напряжение 10 кВ и выше. - СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ ОАО «ФСК ЕЭС» - 50 с.
85. Chen, X. Nonlinear time series analysis of partial discharges in electrical trees of XLPE cable insulation samples / X. Chen, Y. Xu, X. Cao // Dielectr. Electr. Insul. IEEE Trans. - 2014. - Т. 21. - № 4. - С. 1455–1461.
86. Никитин, К. И. Определение срока службы изоляции / К. И. Никитин, Д. А. Поляков // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 3. – С. 129-132.
87. Mosch, W. Statistical Techniques for HV Engineering / W. Mosch, W. Hauschild London, UK: Peter Peregrinus. - 1992.
88. Поляков, Д. А. Математическая модель расчета остаточного ресурса сшитой полиэтиленовой изоляции кабелей / Д. А. Поляков // Омский научный вестник. Приборы, машины и технологии. - 2017. – №4 (154) - С. 66-69.
89. Madorsky, S.L. Thermal degradation of organic polymers / S.L. Madorsky - 1964. - 315 с.
90. Ahmed, Z. Analysis of partial discharge signals in medium voltage XLPE cables / Z. Ahmed и др.// Proceedings - 2016 17th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE - 2016. - doi: 10.1109/EPE.2016.7521817
91. Ismagilov, F.R. A method for estimation of insulation residual operation

- capability of electrical equipment / F.R. Ismagilov, D.V. Maksudov // Russ. Electr. Eng. - 2012. - T. 83. - № 2. - C. 118–120.
92. Поляков, Д.А. Измеритель мощности частичных разрядов / Д.А. Поляков и др. // Актуальные вопросы энергетики: материалы Международной научно-практической конференции. - 2017. - С. 290–293.
93. Мэнли, Р. Анализ и обработка записей колебаний / Р. Мэнли - Перевод с английского. Второе русское дополненное издание. - М.: Машиностроение, 1972. - 368 с.
94. Левин, Б.Р. Теория случайных процессов и ее применение в радиотехнике / Б.Р. Левин - М.: Советское радио, 1957. - 496 с.
95. Справочник по электротехническим материалам / под ред. Ю. В. Корицкого и др. - Л.: «Энергия», 1976. - Т.1. - Изд. 2-е, перераб. - М.: Энергия. - 584 с. ил.
96. Новодворец, Л.А. Испытание и проверка силовых кабелей / Л. А. Новодворец - М.: Энергия, 1970. - 112 с.
97. Приборы для измерения температуры и их поверка: инструктивные материалы / под ред. А.Н. Гордова, Б.И. Пилипчука - М.: Стандартгиз. - 1957. - 470 с.
98. Катыс, Г.П. Оптические датчики температуры / Г.П. Катыс - М.: ГосЭнергоИздат, 1959. - 111 с.
99. Мокански, В. Силовой кабель высокого напряжения со встроенным волоконно-оптическим модулем / В. Мокански // Наука и техника. - 2009. - № 2. - С. 14–17.
100. Barinov, V.M. Fiber optic temperature monitoring system of power cable lines V.M. Barinov и др. // 2017 10th Int. Symp. Adv. Top. Electr. Eng. - 2017. - С. 641–644.
101. Зайцев, Е.С. Моделирование тепловых процессов в кабеле с изоляцией из спитого полиэтилена средствами Matlab и Simulink / Е.С. Зайцев и др. // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: материалы V междунар. науч. конф. - Харьков: НТУ «ХПИ». -2011. - С. 615–

622.

102. Пат. 2608335 Российская Федерация, МПК G01R 19/00. Оптико-электронный датчик тока и напряжения. / Никитин К. И., Поляков Д. А., Довбня Б. Я., Клецель М. Я., Максимов В. М. № 2015116387, заявл. 29.04.2015; опубл. 17.01.2017. Бюл. № 2.
103. Зайдель, А.Н. Погрешности измерений физических величин / А.Н. Зайдель - Л.: Наука, 1985. -112 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

Утверждаю  
 Заместитель главного  
 инженера по эксплуатации –  
 начальник департамента  
 эксплуатации и ТОиР филиала  
 ПАО «МРСК Сибири» –  
 «Омскэнерго»

*М.Н. Болков*  
 «4» 09 2017 г.



**АКТ**  
**внедрения результатов научных исследований,**  
**проведенных старшим преподавателем кафедры ТиОЭ**  
**ФГБОУ ВО ОмГТУ Поляковым Д. А.**

Комиссия в составе начальника службы диагностики департамента эксплуатации и ТОиР Шевченко А.В., начальника отдела технологического развития и инноваций Мурина И.В., составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Полякова Д. А. внедрены в систему электроснабжения для проведения тестовых испытаний разработанного аппаратно-программного комплекса устройств, выполняющего следующие функции:

1. Мониторинг действующего значения напряжения на одножильном коаксиальном кабеле из сшитого полиэтилена, токов в жиле и экране кабеля и температуры его поверхности;
2. На основе данных мониторинга перечисленных величин рассчитывается прогнозируемый и остаточный срок службы изоляции кабеля.

Использование аппаратно-программного комплекса устройств позволит скорректировать ППР по ремонту и замене кабельных линий электропередачи.

Начальник службы диагностики  
 департамента эксплуатации и ТОиР



Шевченко А.В.

Начальник отдела технологического  
 развития и инноваций



Мурина И.В.

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

Утверждаю

Ректор ФГБОУ ВО ОмГТУ

А. В. Косых

« 2017 г.

**АКТ**

**внедрения результатов научных исследований,  
проведенных старшим преподавателем кафедры ТиОЭ  
ФГБОУ ВО ОмГТУ Поляковым Д. А.**

Комиссия в составе главного энергетика Пономарева И. А., ведущего инженера ОГЭ Деркача В. В. составили настоящий акт в том, что результаты диссертационной работы Полякова Д. А. внедрены в систему электроснабжения учебно-лабораторного корпуса №6 ОмГТУ для проведения тестовых испытаний разработанного аппаратно-программного комплекса устройств, выполняющего мониторинг остаточного ресурса изоляции кабелей.

Использование аппаратно-программного комплекса устройств позволит скорректировать ППР по ремонту и замене кабельных линий электропередачи, а также продлить срок эксплуатации некоторых кабельных линий.

Главный энергетик

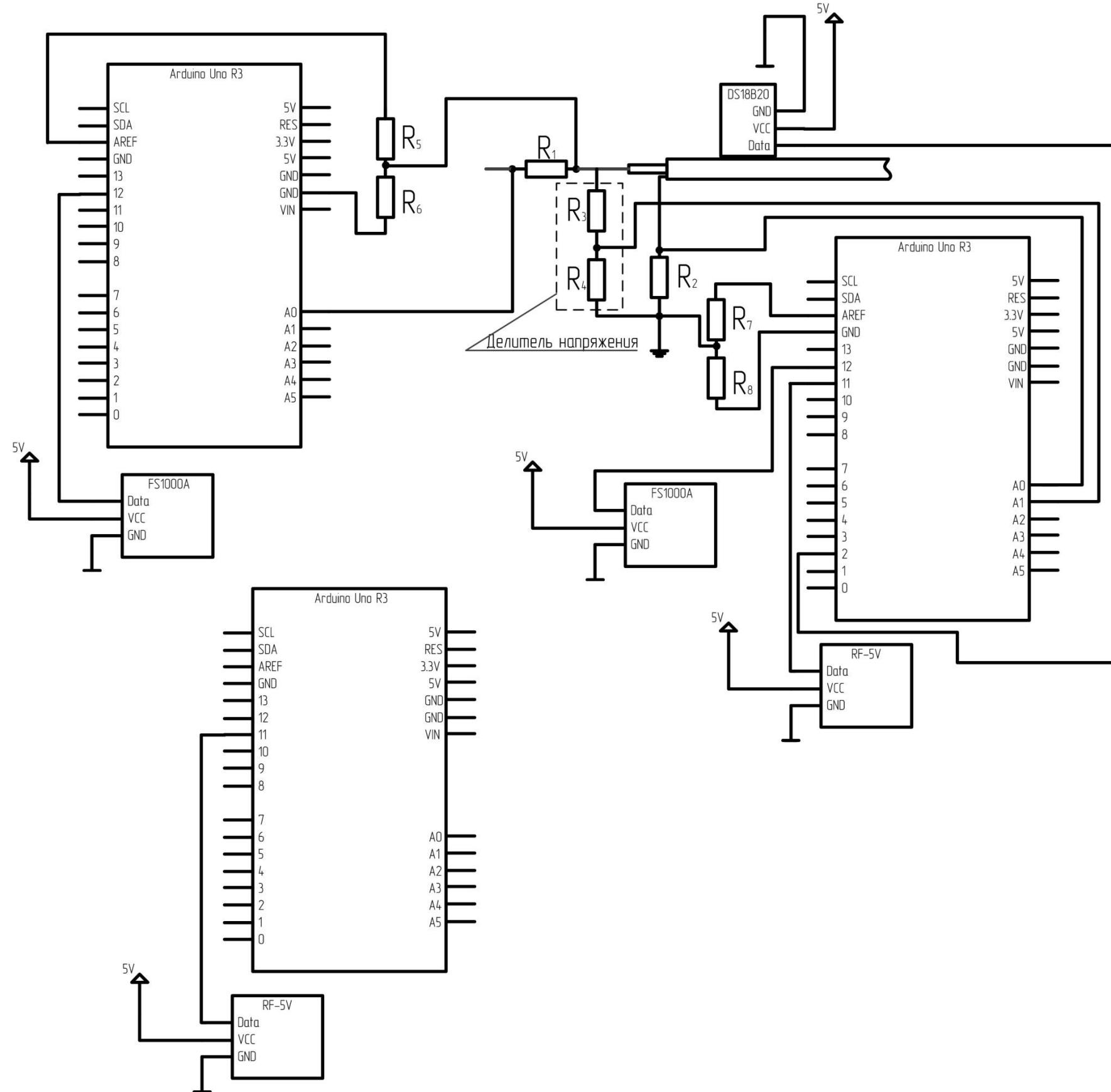
Пономарев И. А.

Ведущий инженер ОГЭ

Деркач В. В.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

## Принципиальная электрическая схема аппаратно-программного комплекса для определения остаточного ресурса изоляции кабелей из сшитого полиэтилена.



## ПРИЛОЖЕНИЕ Г

В данном приложении приведены фотографии, сделанные в процессе экспериментальных исследований.



Рисунок Г.1 – Фотография процесса регистрации сигналов частичных разрядов.



Рисунок Г.2 – Фотография процесса записи сигналов ЧР осциллографом.

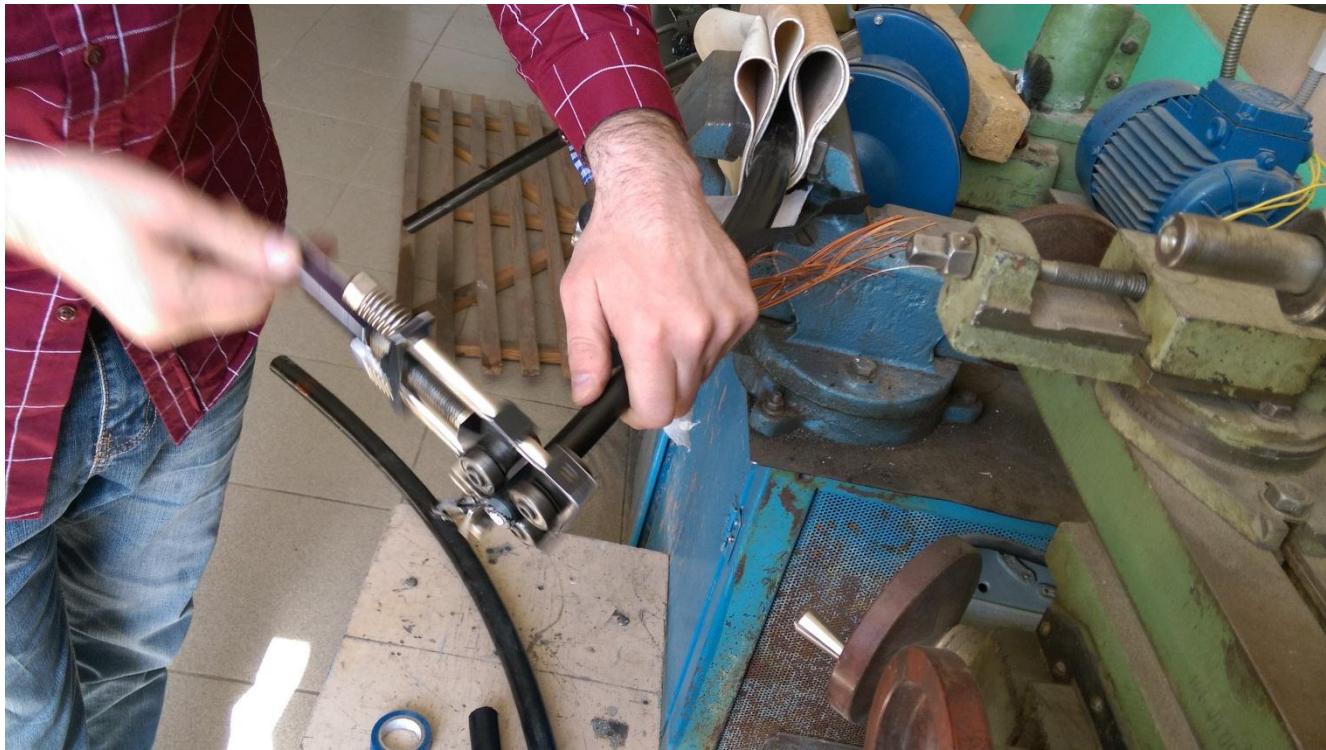


Рисунок Г.3 – Фотография процесса концевой заделки образцов кабеля.



Рисунок Г.4 – Фотография процесса искусственного состаривания образцов кабеля.



Рисунок Г.5 – Фотография пробоя кабеля в области концевой заделки.

## ПРИЛОЖЕНИЕ Д

[www.danomsk.ru](http://www.danomsk.ru)

Россия, Омск, Большничный переулок, 6, блок 2, 4-й этаж  
 Оптовый отдел (3812) 40-90-90 (многоканальный). E-mail: sales@danomsk.ru  
 Розничный магазин (3812) 40-99-99. E-mail: magazin@danomsk.ru



## СЧЁТ №СЧ6-008080 от 12.12.2016

Продавец: ООО "ДАН"  
 ИНН/КПП: 5503012474/550301001  
 Р.сч.: 40702810824000366101  
 К.сч.: 30101810500000000816  
 Банк: Сибирский филиал ПАО "Промсвязьбанк"  
 БИК: 045004816

Покупатель: ООО НТЦ "Электроник"  
 ИНН/КПП: 5506043978/550601001  
 Адрес: 644021, г.Омск, ул. 4-я Транспортная, 2А  
 Телефон: 44-32-69, ф.44-32-69

№ п/п	Наименование	Кол-во	Цена без НДС	Сумма	Срок поставки
1	Прибор АКИП-4127/2 ОСЦИЛЛОГРАФ	1,00	64915,25	64915,25	2 недели
	Итого по листу			64915,25	

Сумма: 64 915,25

Итого с НДС: 76 599,99

НДС: 11 684,74

Всего к оплате: Семьдесят шесть тысяч пятьсот девяносто девять рублей 99 копеек

Руководитель предприятия: \_\_\_\_\_ /Алещенко Андрей Александрович/

Гл. бухгалтер: \_\_\_\_\_ /Симонова Светлана Сергеевна/

Выдал: \_\_\_\_\_ /Рязанкова Наталья Петровна/

## Примечание:

Перед оплатой счета обязательно проверьте все предложенные замены и соответствие выписанных позиций Вашей заявке. Указанный в счете товар находится в резерве в течение 3 банковских дней. Резерв сохраняется при условии поступления денег на р./сч. или уведомления об оплате. При несоблюдении этого условия резерв снимается, и товар отпускается из свободного наличия на складе по ценам, действующим на день поступления денег. Сразу после оплаты счета сообщите номер и дату платежного поручения, это значительно ускорит обработку Вашего заказа. По платежному поручению товар не выдается.

Рисунок Д.1 – Информация о дате приобретения осциллографа для проведения экспериментальных исследований.