

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»



Институт энергетический  
Направление подготовки электроэнергетика и электротехника  
Кафедра электротехнических комплексов и материалов

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

Тема работы
<b>Оценка влияния вариации свойств окружающей среды на надежность силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена</b>
УДК 621.315.211:621.315.616.9:504.75-047.37

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4В	Айтжанова Асель Булатовна		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель кафедры ЭКМ	Шуликин С.Н.			

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент кафедры менеджмента	Фигурко А.А.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель кафедры ЭБЖ	Романцов И.И.	к.т.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
электротехнических комплексов и материалов	Гарганеев А.Г.	профессор, д.т.н.		

## Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения (выпускник должен быть готов)
	<b>Профессиональные компетенции</b>
P1	<i>Применять углубленные естественнонаучные, математические, социально-экономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.</i>
P2	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P3	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электро-энергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P4	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P5	Проводить <i>технико-экономическое обоснование</i> проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P6	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электро-энергетического и электротехнического оборудования.
P7	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое <i>оборудование</i> ; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P8	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.
	<b>Универсальные компетенции</b>
P9	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой <i>интеллектуальный и общекультурный уровень</i> , добиваться <i>нравственного и физического совершенствования</i> своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P10	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P11	<i>Использовать</i> на практике <i>навыки и умения</i> в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P12	<i>Использовать</i> представление о методологических основах <i>научного познания и творчества</i> , роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением <i>современных информационных технологий</i> , синтезировать и критически резюмировать ин-формацию.

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт энергетический  
Направление подготовки (специальность) электроэнергетика и электротехника  
Кафедра электротехнических комплексов и материалов

УТВЕРЖДАЮ:  
Зав. кафедрой  
\_\_\_\_\_ Гарганеев А.Г.  
(Подпись) (Дата)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

магистерской диссертации
--------------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ4В	Айтжановой Асель Булатовне

Тема работы:

Оценка влияния вариации свойств окружающей среды на надежность силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	от 22.01.2016 №273/С

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2016
--	------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<p><b>Исходные данные к работе</b></p> <p><i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i></p>	<p>Объект исследования - силовой кабель на среднее напряжение с изоляцией из сшитого полиэтилена. Предмет исследования - изменение теплофизических свойств окружающей среды и их влияние на надежность силовых кабельных линий.</p>
---	---

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Анализ основных проблем эксплуатации кабельных линий на среднее напряжение</li> <li>2. Аналитический обзор по литературным источникам распределения тепловых полей в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена</li> <li>3. Анализ существующих методик решения задач теплообмена и алгоритмов определения температурного поля</li> <li>4. Моделирование распределения тепловых полей силовых кабелей с учетом изменения параметров окружающей среды</li> </ol>
<p><b>Перечень графического материала</b></p>	<p>Презентация в Microsoft PowerPoint</p>

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Фигурко А.А.
Социальная ответственность	Романцов И.И.
Раздел на английском языке	Федоринова З.В.

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

1 Теоретическое описание силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена
2 Основные проблемы эксплуатации кабельных линий на среднее напряжение
3 Тепловое старение силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена
4 Исследование процессов теплообмена
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
6 Социальная ответственность
7 Evaluation of the effect of variations in properties of the surrounding environment on the reliability of the power cable with XLPE

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	01.10.2014
--	------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель	Шуликин С.Н.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4В	Айтжанова А.Б.		

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа содержит: 125 страниц, 28 рисунков, 24 таблицы, 64 информационных источников, 1 приложение.

Ключевые слова: силовой кабель, тепловое поле, надежность, теплофизические свойства окружающей среды.

Объектом исследования является силовой кабель на среднее напряжение с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Цель работы – исследование надежности силовых кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена с учетом вариации теплофизических свойств окружающей среды.

В процессе исследования проводились изучение и систематизация информации по предмету и объекту исследования. Источники информации представлены в списке использованных источников.

Предлагается практический подход для уточненного определения термического сопротивления окружающей среды с учетом изменения его теплофизических свойств, которое впоследствии влияет на надежность кабеля в целом и на его ресурс.

В результате исследования представлена оценка взаимного влияния параметров окружающей среды и температуры, которая, в свою очередь, зависит от кабеля.

В перспективе, на основе анализа существующих методов моделирования теплового поля и расчета остаточного ресурса кабеля, планируется разработать критерии остаточного ресурса кабельных изделий, учитывающие наиболее важные с точки зрения старения диэлектрические свойства, и, в частности, влияние изменения параметров окружающей среды на ресурс кабельной линии.

## **Определения, обозначения, сокращения, нормативные ссылки**

В данной работе применены следующие термины с соответствующими определениями:

**силовой кабель:** Кабель для передачи электрической энергии токами промышленных частот.

**сшитый полиэтилен:** Полимер этилена с поперечно сшитыми молекулами.

**тепловое поле:** Распределение температур в объеме или на поверхности нагреваемого или охлаждаемого тела.

**термическое сопротивление:** Способность тела препятствовать распространению теплового движения молекул.

**надежность:** Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

## Оглавление

Введение.....	9
1 Теоретическое описание силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена .....	11
1.1 Описание конструкции кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена.....	11
1.2 Описание свойств материалов кабелей.....	13
2 Основные проблемы эксплуатации кабельных линий на среднее напряжение .....	16
2.1 Механическое нарушение целостности изоляции, оболочки кабеля .....	18
2.2 Избыточные температуры, нагрев кабеля.....	20
2.3 Влияние параметров окружающей среды на кабель.....	22
3 Тепловое старение силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена .....	26
3.1 Процессы теплового старения полимерных материалов .....	26
3.2 Тепловое старение оболочки кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена .....	30
3.3 Теплофизические свойства силового кабеля.....	32
3.4 Распределение теплового поля в кабелях с СПЭ изоляцией .....	37
4 Исследование процессов теплообмена.....	39
4.1 Математическое моделирование теплового поля силового кабеля .....	39
4.2 Проверка адекватности алгоритма работы программы и математической модели.....	47
4.3 Исследование влияния параметров окружающей среды на тепловое поле кабеля .....	51
4.4 Результаты моделирования с учетом вариации параметров среды.....	55
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение .....	63
5.1 Введение .....	64
5.2 Предпроектный анализ .....	64
5.2.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	64
5.2.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения .....	65
5.2.3 Технология QuaD .....	67
5.3 Планирование управления научно-техническим проектом .....	68
5.4 Бюджет научного исследования .....	72
5.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	78
6 Социальная ответственность.....	82
6.1 Введение.....	83
6.2 Профессиональная социальная безопасность .....	84
6.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования .....	84

6.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....	86
6.3 Экологическая безопасность .....	91
6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	92
6.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований .....	92
6.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований .....	93
6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	95
6.5.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства .....	95
6.5.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны .....	96
Заключение .....	98
Список использованных источников .....	99
Приложение А .....	105

## **Введение**

В процессе эксплуатации изоляция кабелей стареет под влиянием тепловых и электрических полей. Номинальный срок службы изоляции 25 лет, однако, из-за различных условий эксплуатации степень старения изоляции различна. В связи с этим возникает вопрос об очередности замены кабельных линий. Для этого необходимо знать остаточный ресурс кабелей находящихся в эксплуатации.

В настоящее время нет четко прописанных рекомендаций по проведению профилактических испытаний в процессе эксплуатации кабелей. Тем не менее, в каталогах и инструкциях по эксплуатации отечественных и зарубежных предприятий-изготовителей даются рекомендации по испытанию кабельных линий после их монтажа. Так же существуют стандарты, описывающие обобщенные методы испытаний материалов изоляции и оболочек электрических кабелей.

Но при этом существующие стандарты не учитывают повышения температуры и изменения теплофизических свойств окружающей среды. Например, летом 2010 года в течении нескольких месяцев средняя температура в восточной части России превышала 30 °С. То есть вне зависимости от метода нагрузки кабеля, он не всегда работает по рассчитанному номинальному значению. В связи с тем, что существуют циклические изменения температуры, можно судить о том, что это динамический процесс, и в большинстве случаев расчет остаточного ресурса кабеля не подчиняется статистическим данным. Между тем, при длительном тепловом старении в изоляции и оболочке кабеля происходят различные процессы, скорость протекания которых не может не зависеть от геометрических размеров и конструкции кабеля.

Исследованию влияния изменения параметров окружающей среды в процессе эксплуатации на надежность кабельной линии посвящена данная работа.

Объектом исследования является силовой кабель на среднее напряжение с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Предметом исследования является изменение теплофизических свойств окружающей среды за счет теплового поля кабеля и влияние данных изменений на надежность силовых кабельных линий.

Цель диссертационной работы состоит в исследовании надежности силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена с учетом вариации теплофизических свойств окружающей среды.

Для осуществления этой цели необходимо выполнить следующие задачи:

1. Анализ основных проблем эксплуатации кабельных линий на среднее напряжение с изоляцией из сшитого полиэтилена;
2. Аналитический обзор процессов теплового старения полимерных материалов конструктивных элементов;
3. Рассмотрение распределения тепловых полей в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена с учетом всех источников тепла;
4. Анализ существующих методик решения задач теплообмена и алгоритмов определения температурного поля;
5. На основе численных исследований оценить распределение тепловых полей кабелей с учетом нелинейных характеристик параметров окружающей среды.

При различных способах прокладки кабельной линии, динамика распределения тепловых полей разная, но на сегодняшний день при инженерных расчетах данные параметры принимаются как константы. Без учета влияния теплового поля кабеля на теплофизические свойства окружающей среды невозможно точно утверждать, насколько интенсивно происходит процесс теплового старения оболочки кабеля.

# **1 Теоретическое описание силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена**

## **1.1 Описание конструкции кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена**

В настоящее время на российском рынке кабельно-проводниковой продукции наблюдается стабильное увеличение производства-потребления кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена [1].

Современные кабели производятся с изоляцией из сшитого полиэтилена и используются в сетях различного класса напряжения (до 500 кВ). Испытания кабелей подобной конструкции объясняют их популярность в последние 10 лет. Основные преимущества кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ-кабелей) перед кабелями с бумажной пропитанной изоляцией (БПИ-кабелями) [2, 3]:

- термическая стойкость СПЭ-кабелей при токах короткого замыкания (КЗ) выше благодаря большей предельной температуре, удельная повреждаемость СПЭ-кабелей в 10—15 раз ниже, чем у БПИ-кабелей;
- большой срок службы СПЭ-кабеля (по данным заводоизготовителей более 50 лет);
- более легкие условия монтажа СПЭ-кабелей, обусловленные меньшими массой, диаметром, радиусом изгиба, отсутствием тяжелой свинцовой или алюминиевой оболочки;
- существенно меньшая повреждаемость при прокладке, что в настоящее время является основной причиной отказов КЛ;
- большая пропускная способность кабеля, достигнутая за счет увеличения допустимой температуры жилы (в зависимости от условий прокладки допустимые нагрузочные токи на 15-25% выше, чем у кабелей с бумажной изоляцией):
  - длительная нагрузка – 90 вместо 70°С;

- при перегрузке – 130 вместо 90°C;
- изоляционные электрические характеристики выше, а диэлектрические потери ниже (коэффициент диэлектрических потерь равен 0,001 вместо 0,008).



Рисунок 1- Кабель с изоляцией из сшитого полиэтилена

Повышенная термическая и механическая стойкость сшитого полиэтилена обусловлена созданием новых молекулярных связей в процессе вулканизации ("сшивки") изоляции.

Конструкция кабеля в однофазном исполнении с полиэтиленовой изоляцией представлена на рис. 2. [4]

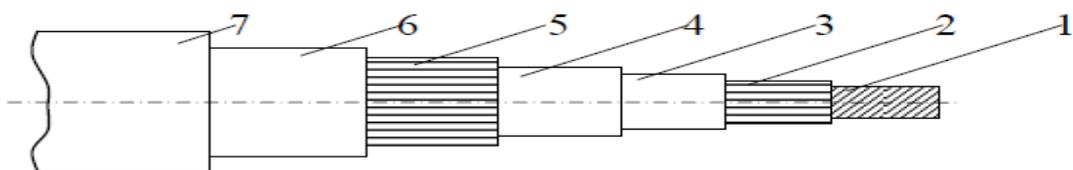


Рисунок 2 - Кабель с полиэтиленовой изоляцией:

1 – токоведущая жила; 2, 5 – экраны из полупроводящего полиэтилена; 3 – антиэмиссионный слой; 4 – изоляция (экструдированный полиэтилен); 6 – полупроводящая бумага; 7 – свинцовая оболочка.

Кабели СПЭ изготавливаются с площадью сечения от 35 до 3000 мм<sup>2</sup>, с толщиной изоляции до 35 мм. Их принято группировать по возможному для них напряжению, для которых изоляция изготавливается разной слоистости и толщины:

- От 6-ти до 35-ти кВ, с площадью сечения от 35-ти до 1600 мм<sup>2</sup>, толщиной от 3,4 до 8,5 мм,
- От 45-ти до 150-ти кВ, с площадью сечения от 70-ти до 2000 мм<sup>2</sup>, толщиной от 8,0 до 23,0 мм,

- Для 220-ти и 330-ти кВ, с площадью сечения от 400 до 2000 мм<sup>2</sup>, толщиной от 20,0 до 28,0 мм.

Также в настоящее время выпускаются высоковольтные кабели, рассчитанные на напряжение от 400 до 550 кВ, с площадью сечения от 630 до 3000 мм<sup>2</sup>, толщиной от 27-ми до 35 мм.

Экранирование элементов кабеля необходимо для электромагнитной совместимости кабеля с различными внешними цепями и для обеспечения симметрии электрического поля вокруг жилы кабеля и, следовательно, для создания более благоприятных условий работы изоляции. Внутренние экраны выполняются из полупроводящей пластмассы, внешний экран — из медных проволок и лент.

Кабели с пластмассовой изоляцией используются для распределения электроэнергии от подстанций к потребителям, в качестве судовых кабелей, т.к. полиэтилен и полихлорвинил обладают высокой влагостойкостью. В настоящее время в России освоено производство силовых кабелей на напряжение 110-500 кВ в однофазном исполнении с алюминиевой или медной токоведущей жилой, вместе с кабельной арматурой, с изоляцией из «сшитого» полиэтилена, что позволяет повысить рабочие градиенты и передаваемые мощности [4].

## **1.2 Описание свойств материалов кабелей**

Долговечность и работоспособность кабельного изделия в большей степени определяется способностью полимерных материалов и конструкции кабельного изделия противостоять внешним воздействиям и процессам старения. Типовая конструкция большинства электрокабелей представляет собой металлический проводник (медь или алюминий), окруженный диэлектрическим слоем изоляции и защитной оболочкой. Главные требования к материалу изоляции – высокие диэлектрические свойства, а к внешней оболочке – стойкость к воздействиям агрессивных факторов окружающей среды.

## 1) Полиэтилен

Все более широкое применение пластмасс для изготовления изоляции кабельных изделий открывает новые возможности экономии дефицитных материалов. В частности сшитый полиэтилен, т.е. полиэтилен, имеющий пространственную структуру молекул. Из всех известных полимерных материалов в настоящее время только полиэтилен может быть получен очень чистым, содержащим минимальное количество примесей, что позволяет применять его в изделиях, предназначенных для работы при высоких напряжениях электрического поля. [5]

Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена используются в сетях различного класса напряжения (до 500 кВ).

Электрические свойства сшитого полиэтилена находятся в пределах со свойствами термопластичного полиэтилена, а нагревостойкость выше [5]:

Таблица 1 – Электрические свойства материалов изоляции

	Длительная предельно допустимая температура, °С	Температура при токах короткого замыкания, °С
Полиэтилен	70	150
Сшитый полиэтилен	90	250
Поливинилхлорид	70	160
Этиленпропиленовая резина	90	250

В оболочке кабеля для внешней прокладки, как правило, используется полиэтилен высокой плотности (низкого давления), для подземной прокладки - полиэтилен низкой плотности (высокого давления) [6].

Полиэтилен низкого давления стоек к абразивному износу и обеспечивает более надежную защиту от механических воздействий. Поскольку чистый полиэтилен достаточно быстро стареет на свету и в нем появляются микротрещины, то для защиты оболочек от ультрафиолетового облучения применяются композиции светостабилизированного полиэтилена, содержащего не менее 2,5% мелкодисперсной сажи [6].

Сравнительная характеристика полиэтилена высокого и низкого давления (ПЭВД и ПЭНД) [7] представлена в Таблице 2:

Таблица 2 - Сравнительная характеристика полиэтилена высокого и низкого давления

Полиэтилен	Мол. масса	Плотность, г/м <sup>3</sup>	Температура плавления, °С	Модуль упругости, МПа	Относ. удлинение, %
Низкой плотности (ВД)	50-800 тыс.	0,913-0,914	102-105	100-200	100-800
Высокой плотности (НД)	50 тыс.- 3*10 <sup>6</sup>	0,919-0,973	125-137	400-1250	100-1200

По сравнению с поливинилхлоридными оболочками полиэтиленовая имеет более широкий диапазон рабочих температур и менее критична к резкому перепаду температур. Влагопоглощение оболочки из полиэтилена меньше в 20 раз, в сравнении с поливинилхлоридной оболочкой [6].

Полиэтилен как конструктивный материал имеет ограниченное применение из-за невысокого уровня механических свойств и вследствие старения, которое сопровождается понижением механических свойств и диэлектрических характеристик. Уменьшают старение полиэтилена введением стабилизатора (2-3% газовой сажи) [8].

## 2) Поливинилхлоридный пластикат

Поливинилхлорид (ПВХ) – это высокомолекулярное соединение линейного строения, относится к пластическим массам на основе полимеров хлорированных непредельных углеводородов (в основном этилена) [9, 10].

Кабели, покрытые оболочкой из ПВХ, наиболее просты в использовании и их часто относят к кабелям общего назначения. Такие типы кабелей предназначены для инсталляции в местах, где нет особых требований пожарной безопасности. При горении провода, покрытые ПВХ, могут выделять хлороводород. Хлор служит акцептором свободных радикалов и повышает жаростойкость материала [11].

Но поливинилхлоридные пластикаты применяются не только в качестве оболочек. Их применение в кабельных изделиях можно разделить на следующие группы:

— изоляционные — обладают высокими электрическими характеристиками в диапазоне рабочих температур;

— шланговые — применяемые для защиты элементов кабельных изделий от внешней среды;

— полупроводящие — используемые для изготовления экранов.

Поливинилхлорид является аморфным термопластичным полимером со слабой регулярностью. Твёрдый поливинилхлорид имеет высокое содержание хлора (около 57 %) и воспламеняется с трудом [12]. Разложение ПВХ начинается при нагревании выше 140 °С, сопровождающееся выделением хлористого водорода, что затрудняет его переработку, так как температура текучести полимера равна 150-160 °С [10].

Физико-химические свойства ПВХ в результате деструкции ухудшаются: возрастает хрупкость, уменьшается относительное удлинение при разрыве. Термостабильность ПВХ удается повысить, вводя специальные вещества – стабилизаторы, способные на определенный срок замедлить или предотвратить разложение полимера [10].

Для изоляции кабелей применяется мягкий поливинилхлорид или кабельный пластикат. Этот материал содержит 50 % различных добавлений (пластификаторов и др.), которые значительно меняют горючие свойства полимера. Пластификаторы начинают улетучиваться при температуре 200 °С и загораются [12].

## **2 Основные проблемы эксплуатации кабельных линий на среднее напряжение**

В настоящее время при строительстве трехфазных кабельных линий 6-500 кВ широко применяются однофазные кабели с изоляцией из сшитого

полиэтилена. В конструкции однофазного кабеля используется медный экран, который позволяет выравнивать электрическое поле по главной изоляции кабеля (изоляции «жила-экран»), а в случае заземления в одной или в нескольких точках – сравнить потенциал электрического поля на поверхности кабеля. Наличие заземленного медного экрана приводит к появлению специфических проблем КЛ с однофазными кабелями, одной из которых является вынос потенциала, т.е. распространение напряжения за пределы электрической установки по заземлителям или защитным проводникам [13].

В российской электроэнергетике физический износ кабельного парка находится на уровне 70-80%, а удельная повреждаемость кабельных линий (КЛ) в среднем составляет от 4,5 до 12 случаев на 100 км в год относительно высокая повреждаемость КЛ и значительная протяженность распределительных кабельных сетей, заставляют обслуживающий персонал работать в аварийно-восстановительном режиме эксплуатации КЛ. Это практически исключает возможность проведения плановых профилактических работ по своевременному выявлению электрически ослабленных мест в изоляции кабельной системы. Вместо плановых испытаний и своевременной диагностики технического состояния КЛ материальные и людские ресурсы задействуются на трудоемких аварийно-восстановительных работах (в основном в неудобный зимне-весенний период) по ликвидации повреждений КЛ [2].

По данным ОАО «Россети», кабельные линии в классах напряжения 0,4-110 (220) кВ в основном повреждаются по следующим причинам [2]:

- дефекты прокладки – 20%;
- естественное старение силовых кабелей – 31%;
- механические повреждения – 30%;
- заводские дефекты – 10%;
- коррозия – 9%.

Так же проблемным вопросом является получение вторичных повреждений (например, в момент аварии): кабель обжигается дугой,

деформируется внутренним давлением, поглощает влагу через поврежденное место и т.д [13].

В этой связи небольшая повреждаемость при прокладке, ввиду значительного меньшего веса, а также отсутствие коррозии оболочки кабелей с изоляцией из СПЭ существенно повышают надежность КЛ и снижают затраты на их обслуживание [2].

Внедрение кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена в электрические сети среднего напряжения должно производиться с учетом свойств и характеристик изоляции данного материала. Для увеличения срока службы таких кабелей рационально создавать более гибкие условия эксплуатации сети, другими словами максимально понизить или полностью исключить (по возможности) высокочастотные воздействия на изоляцию при возникновении электромагнитных переходных процессов.

Основные проблемы при эксплуатации кабеля на среднее напряжение можно условно разделить на 3 группы:

1. Механическое нарушение целостности оболочки кабеля;
2. Избыточные температуры самого кабеля;
3. Влияние параметров окружающей среды на кабель, в частности, повышенные температуры.

## **2.1 Механическое нарушение целостности изоляции, оболочки кабеля**

Выделяются следующие виды разрушения электрической изоляции силового кабеля из полиэтилена: термическое старение, электрические триинги, водные триинги.

По степени тяжести повреждения можно разделить на:

- внутренние повреждения изоляции, являющиеся результатом не должного исполнения правил эксплуатации (испытанием постоянным

напряжением), а также вызываемые естественным старением (появление триингов, водных деревьев);

- нарушение целостности оболочки (порез, задира, вырыв), не затрагивающее основного изоляционного слоя проводников;
- различные повреждения имеющегося защитного экрана кабеля.

В процессе длительной эксплуатации кабельных линий с изоляцией из СПЭ с выходом на поверхность основной изоляции, образуются микротрещины, так называемые триинги. Причин образования триингов много, это процессы полимеризации, остаточные механические напряжения, механические и тепловые нагрузки и т.п. По каналам триингов из окружающей среды поступает влага, поэтому с их ростом сопротивление изоляции в этом месте падает.

Подача рабочего напряжения приводит к суммированию напряжённостей электрических полей и может вызвать локальное превышение предела прочности изоляции, что вызовет появление "электрических древовидных структур" (водные триинги). Высокочастотные воздействия на изоляцию кабелей могут привести к ускорению развития водных триингов. Так же способствуют дальнейшему развитию водяных деревьев действия электрического поля, имеющейся воды, различные механические дефекты, время и другие факторы, приводящие через определённое время к пробое, который возникает собственно в месте концентрации водяных деревьев [14].

Кроме того, испытания повышенным выпрямленным напряжением кабелей с СПЭ-изоляцией практически бесполезны, так как сшитый полиэтилен обладает высокой электрической прочностью. И нельзя также определить наличие водных триингов в изоляции, так как они не нарушают целостности СПЭ-изоляции [14].

Далее, нарушение целостности оболочки кабеля. Данный тип повреждений связан с коррозионными процессами и их влиянием, а также с воздействиями механического характера, происходящими во время выполнения монтажа, ремонтных работ кабельных линий. Если вовремя не произвести

ремонт участка повреждённой оболочки кабеля, то основная изоляция утратит свои свойства и произойдёт пробой кабельной линии.

Последовательность и взаимосвязь процессов, обуславливающих электрическое старение и пробой изоляции, можно представить следующей схемой (Рисунок 3):

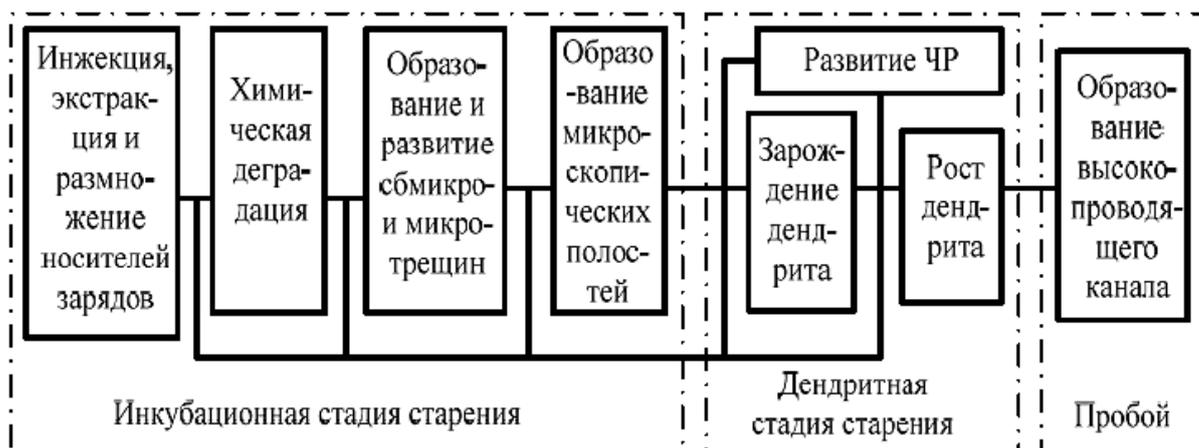


Рисунок 3 - Алгоритм электрического старения и пробоя изоляции

В целях увеличения срока службы кабеля и уменьшения разрушающих воздействий на него необходимо заменять испытания КЛ повышенным напряжением на современные неразрушающие методы диагностики.

Основной причиной выхода из строя кабелей с полиэтиленовой изоляцией, находящихся при длительном воздействии повышенной температуры и механических нагрузок, является *растрескивание оболочек и изоляции*.

В результате термомеханического старения происходят изменения надмолекулярной структуры полиэтилена, что, в свою очередь, приводит к изменению теплофизических и механических динамических характеристик.

## 2.2 Избыточные температуры, нагрев кабеля

При нагреве в изоляции протекают различные химические реакции, называемые процессом теплового старения, который приводит к постепенному

изменению структуры и свойств материалов и, как следствие, - к ухудшению свойств изоляции в целом.

При нарушении равновесия между теплом, выделяющимся внутри всего объёма изоляции, и теплом, отводимым в окружающую среду, возможно тепловое разрушение диэлектрика. Подобное нарушение приводит к повышению температуры диэлектрика и заканчивается его пробоем.

Так же при устойчивом равновесии между выделением и отводом тепла по всему объёму изоляции, возможен значительный перегрев отдельных областей изоляции, в результате чего возникает местное термическое разрушение материала изоляции. Этот вид пробоя развивается постепенно и заканчивается в тех местах, где повышение температуры проходит особенно интенсивно вследствие роста диэлектрических потерь.

Широкое внедрение в последние годы силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена обнаружило *проблему термической стойкости* трехфазных кабельных линий. Повышенный нагрев, возникающий в линиях, выполненных из однофазного кабеля, объясняется значительными токами, которые индуцируются в защитных металлических экранах. Поскольку сечение этих экранов значительно меньше сечения токоведущей жилы, то в них возникает существенное тепловыделение, которым принято сегодня объяснять случаи выхода из строя кабельных линий по причине превышения рабочих температур.

Повышенные токовые нагрузки силовых СПЭ кабелей на среднее напряжение обеспечиваются за счет максимально допустимой температуры нагрева ТПЖ  $90^{\circ}\text{C}$ . Но ввиду малой толщины изоляции и, как следствие, относительно небольшого теплового сопротивления кабеля он разогревается на поверхности до температур  $70-85^{\circ}\text{C}$ . избыточные температуры оказывают негативное влияние на условия прокладки (высыхание грунта, повышение температуры воздуха и т.д.) и сопутствующие кабельные системы.

### **2.3 Влияние параметров окружающей среды на кабель**

Изменения свойств изоляции при эксплуатации происходят за счет энергии от источников внешних нагрузок: электрические и тепловые поля, поле механических напряжений, химические взаимодействия с окружающей средой.

Основное влияние на изменение параметров кабельной линии оказывают колебания температуры окружающей среды. В процессе эксплуатации кабель, проложенный в земле, подвергается воздействию положительных и отрицательных температур, воздействию влаги, слабых растворов щелочей и кислот, содержащихся в грунте, что может привести к необратимым изменениям механических и электрических параметров кабеля, то есть к его старению.

При прокладке кабелей в туннелях и каналах учитывается общий нагрев окружающего воздуха [15].

Высокая температура воздуха оказывает влияние на температуру грунта не только в течение года, но и ежедневно. Изменение температуры слоя грунта вокруг кабельной линии вызывает повышение температуры в самом кабеле, приводя тем самым к повреждению линии, которая уже находится на грани выработки своего ресурса.

Суточные вариации температуры грунта на глубине прокладки кабелей практически отсутствуют, в то время как сезонные могут быть значительными.

Кабель, проложенный в проточной воде, находится в наилучших условиях. Вода обеспечивает хороший отвод тепла с поверхности кабеля. Благодаря наличию в воде течений и конвекционных токов теплового поля вокруг кабеля в воде практически не образуется. В этом случае при расчете допустимой нагрузки на кабель тепловое сопротивление окружающей среды приравнивают нулю. При наличии отдельных участков кабеля, не находящихся в воде, расчет их производят по условиям с наивысшим тепловым сопротивлением [15].

Наименее благоприятны условия охлаждения при прокладке кабеля в бетонных блоках, находящихся в земле. В этом случае тепловой поток, выходящий из кабеля, преодолевая сначала сопротивление прослойки воздуха, проходит через стенки блока в окружающую почву [15].

Распределение температуры в грунте зависит от целого ряда параметров, которые включают теплофизические свойства грунта, характеризующиеся тремя типичными параметрами [16].

*Объёмная теплоёмкость* ( $C$ , Дж/м<sup>3</sup>К) — количество теплоты, которое нужно подвести к единице объёма грунта, чтобы нагреть его на один градус.

*Коэффициент теплопроводности* ( $k$ , Дж/(м<sup>2</sup>сК/м)) — количество теплоты, передаваемой через единицу площади поверхности теплопроводящего тела за единицу времени при градиенте температуры, равном одному градусу на метр.

*Коэффициент температуропроводности или коэффициент диффузии (рассеяния)*  $D_h$  — равен тому повышению температуры, которое произойдёт в единице объёма вещества за единицу времени при тепловом потоке, равном коэффициенту теплопроводности. Коэффициент температуропроводности можно охарактеризовать как параметр, зависящий от коэффициента теплопроводности и объёмной теплоёмкости ( $D_h = k/C$ ).

Теплофизические свойства во многом зависят от типа и состава грунта. Например, наличие влаги, воздуха и органических веществ оказывает большое влияние на его теплофизические свойства. Ввиду постоянного изменения концентрации влаги и воздуха в почве теплопроводность также является переменной величиной, зависящей от времени. Поэтому значение коэффициента теплопроводности изменяется в зависимости от глубины и во времени. Содержание влаги и распределение тепла — взаимозависимые процессы. Они взаимодействуют между собой и оказывают друг на друга взаимное влияние. Такая взаимозависимость может привести к перемещению, как влаги, так и тепла в почве, что вызывает изменение её теплофизических свойств.

Источник тепла, например, находящийся в эксплуатации кабель вследствие движения влаги из мест с более высокой температурой к местам с более низкой может оказать влияние на параметры почвы. Следовательно, распространение тепла (местное) в почве изменяется и может привести к изменению градиента влажности. Таким образом, эти процессы взаимовлияющие и взаимосвязанные.

Кроме теплофизических свойств почвы, величиной, зависимой от местных метеорологических условий, является её температура. Это означает, что суточные и сезонные перепады температуры оказывают сильное влияние на состояние почвы. Погодные явления, например дождь, поверхность почвы (лес, дорожное покрытие) и человеческий фактор также влияют на температурный режим почвы. Всё это необходимо учитывать при комплексном математическом моделировании.

Суточные изменения, обусловленные толщиной слоя, накладываются на годовые колебания температуры на этой же глубине. На рис. 4 показаны годовые графики изменения температуры почвы для глубин 5, 50 и 100 см. Для построения этих графиков приняты средние термические параметры из литературы [17]. В зависимости от сезона распределение температуры на разной глубине в течение года может меняться.

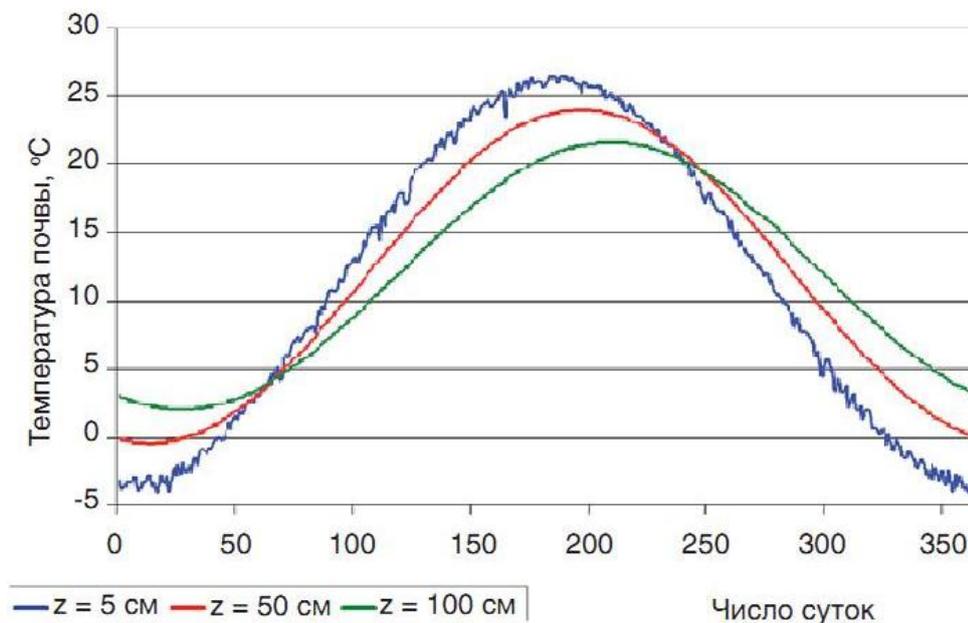


Рисунок 4 - Изменение температуры почвы на разной глубине в течение года при среднесуточных температурах окружающей среды [17]

Используя при моделировании показатели температуры воздуха, можно недооценить значение температуры почвы. Точно так же при увеличении глубины в модели уменьшается влияние суточных колебаний температуры. Этот эффект можно наблюдать при сравнении фактической (измеренной) температуры почвы в течение года с расчётными значениями.

Теплофизические свойства почвы вокруг кабеля оказывают большое влияние на температурный режим самого кабеля и должны учитываться при расчёте его нагрузочной способности. Почва вносит свой вклад в тепловой поток, проходящий между кабелем и внешней средой. Термическое сопротивление (величина обратная теплопроводности) почвы оказывает большое влияние на тепловое состояние кабеля. Оно может меняться в зависимости от глубины прокладки кабеля, наличия параллельно проложенных кабелей и типа самой почвы. Удельное сопротивление почвы зависит от следующих факторов:

- наличия в грунте воздуха, обладающего высоким удельным тепловым сопротивлением. Для уменьшения термического сопротивления почва вокруг кабелей должна быть хорошо уплотнена;

- замены воздуха водой, что приводит к снижению теплового сопротивления, но все же вода не обладает достаточной теплопроводностью;
- наличия в почве органических веществ, которые обладают высоким удельным тепловым сопротивлением, даже если имеют повышенную влажность;
- засыпаемых в траншее грунтов, причём наименьшее сопротивление имеет кварцевый песок.

Из вышесказанного, термические характеристики почвы могут значительно изменяться по всей протяжённости трассы кабеля. Огромное значение при определении термических характеристик почвы играет влага. При высоком содержании влаги удельное термическое сопротивление достаточно стабильно и незначительно меняется в зависимости от её содержания. Однако при достижении некоторого критического значения (нижнего предела) содержания влаги термическое сопротивление резко возрастает. Почва вокруг кабеля осушается, и его нагрев происходит при меньшем объёме влаги, что приводит к дополнительному нагреву кабеля. В конечном итоге это может закончиться неуправляемым нагревом и термической нестабильностью кабеля. Фактически, чем больше глубина прокладки кабеля, тем лучше для него будут температурные условия среды.

### **3 Тепловое старение силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена**

#### **3.1 Процессы теплового старения полимерных материалов**

При длительной эксплуатации электроизоляционных устройств происходит старение твердой изоляции, которое выражается в уменьшении кратковременной электрической прочности, увеличении проводимости и диэлектрических потерь и, как следствие, в ограничении срока службы изоляционных конструкций. В связи с этим при разработке и изготовлении

оборудования высокого напряжения, а также при организации его эксплуатации должны предусматриваться меры, снижающие темпы старения изоляции. [11].

Отказ (выход из строя) кабеля происходит вследствие накопления старения в процессе эксплуатации или ускоренных испытаний. Изменения свойств изоляции при эксплуатации происходят за счет энергии от источников внешних нагрузок: электрические и тепловые поля, поле механических напряжений, химические взаимодействия с окружающей средой [11].

Причины старения изоляции представлены ниже:

1. развитие частичных разрядов при перенапряжении и рабочем напряжении;
2. тепловая деструкция материала;
3. увлажнение изоляции и водный триинг (рост древовидных насыщенных водой фигур);
4. повреждения за счет электродинамических усилий, вибраций и т.п.

Старение полимерного материала - совокупность физических и химических процессов, происходящих в полимерном материале и приводящих к необратимым изменениям свойств [18].

Факторы, способствующие старению полимерных материалов, можно разделить на внутренние и внешние. К внутренним факторам относят состав и структуру полимеров, молекулярно-массовое распределение (ММР), наличие внутренних дефектов, обусловленных неравномерным распределением вводимых наполнителей и различных добавок, внутренние напряжения. Воздействие внутренних факторов можно свести к минимуму путем соблюдения соответствующих требований на стадии переработки полимерного материала. Более существенное влияние оказывают внешние факторы, к которым относят температуру и влажность воздуха, световую и проникающую радиацию, кислород, агрессивные среды, механические нагрузки.

По типу активатора и основного агента, вызывающих разрушение полимеров, различают следующие виды старения:

- термическая деструкция;

- атмосферное (озонное) старение;
- световое;
- радиационное;
- гидролитическая деструкция;
- старение под влиянием механических нагрузок (устоление);
- биологическая деструкция полимерных материалов.

Среди физических факторов, способных инициировать химические реакции в полимерах, тепловое воздействие занимает важное место, так как является причиной одной из важнейших характеристик полимеров - их термостабильности, которая определяет верхнюю температурную границу пределов эксплуатации изделий из полимеров. Распад молекулярной структуры полимеров при тепловых воздействиях на них является одной из причин старения полимеров, которая приводит к снижению механических свойств и невозможности эксплуатировать дальше то или иное полимерное изделие в конкретных условиях его работы. Это тоже приводит к снижению сроков службы полимерных изделий.

Вопрос о влиянии температуры усложняется, если при нагревании материал разлагается. Наиболее важными реакциями, протекающими при разложении, являются деструкция и структурирование эти реакции оказывают прямо противоположное влияние на свойства полимера. При длительной выдержке полимера при постоянной температуре или при постепенном повышении температуры его прочность может сначала уменьшиться вследствие деструкции цепей, а затем вновь увеличиться благодаря структурированию. В конце концов, прочность вновь понижается в результате полного разложения полимера.

Тепловое старение полиэтилена приводит к образованию трещин на поверхности изделий, что является одним из недостатков полиэтилена. Под влиянием кислорода воздуха, света и тепла полиэтилен теряет эластические свойства и пластичность, становится жестким и хрупким (происходит старение). Для замедления процесса старения в полиэтилен добавляют

небольшие количества термостабилизаторов (ароматические амины, фенолы, сернистые соединения) и светостабилизаторов (сажа, графит).

Механизм теплового старения ПВХ пластикатов сильно зависит от температуры. При  $T \sim 100^{\circ}\text{C}$  основными процессами являются диффузия и испарение пластификатора. Небольшие молекулы пластификатора диффундируют из объема пластиката к поверхности, часть пластификатора испаряется в окружающую среду и его концентрация на поверхности становится постоянной. При более высокой температуре  $T \sim 140^{\circ}\text{C}$  ослабевает действие стабилизаторов, что приводит к сшиванию и деструкции макромолекул материала. В результате этих процессов происходит усадка материала, ухудшение электрических и механических характеристик [19].

В кабелях, предназначенных для преимущественной эксплуатации при воздействии низких температур или при резкой смене температур, применение поливинилхлоридного пластиката нежелательно [6]. Возникающие градиенты температур из-за различия теплофизических характеристик могут оказывать влияния на физические и химические процессы теплового старения.

Защитить от старения полимер можно также путем изменения его физической структуры, подвергая для этого полимер специальной механической или термической обработке или с помощью введения в него добавки [20].

При всех разрешенных режимах работы изоляционной конструкции наибольшие температуры ее элементов не должны превышать допустимые значения. Необходимо, чтобы выделяющееся в ней тепло надежно отводилось в окружающую среду. Иначе происходит ускоренное тепловое старение и сокращение ресурса изоляционной конструкции или нарушение ее тепловой устойчивости.

Ресурс электрической изоляции определяет фактическую наработку кабеля, а срок службы характеризует календарное время с момента ввода кабеля в эксплуатацию независимо от наработки и коэффициента нагрузки. Ресурс электрической изоляции существенно зависит от температуры и от

напряженности электрического поля, но методика, основанная на этих параметрах, является разрушающей и подходит только для вновь разрабатываемых кабелей, проходящих ресурсные испытания в лабораториях или на полигонах. Кроме того, необходимо учитывать, что каждый действующий кабель работает в индивидуальных условиях, а расчётные параметры изменяются в широких пределах.

В России существуют методики по ускоренному тепловому испытанию, описанные в ГОСТах или нормах (например, ГОСТ Р МЭК 60811-1-2-2006) [21]. В дальнейшей практической работе планируется использовать данные методики для обработки результатов, а именно входные данные, которые позволят определить остаточный ресурс кабеля.

### **3.2 Тепловое старение оболочки кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена**

В ходе эксплуатации, проложенные в грунте кабели, испытывают воздействия влаги, низких и высоких температур, слабых растворов кислот и щелочей, имеющих в грунте. Эти воздействия могут вызвать необратимые изменения электрических и механических параметров кабеля, что и называется старением кабеля. Первыми воздействию окружающей среды подвергается защитная оболочка кабеля.

Пластмассовые оболочки кабелей предназначены для защиты изоляции жил от воздействия света, влаги, различных химических веществ, а так же механических воздействий. По сравнению с металлическими оболочками, имеют лучшую гибкость и меньший вес, но при этом уступают по влагопроницаемости [22].

Среди наиболее важных свойств внешней (защитной) оболочки кабельных изделий следует отметить стойкость к действию огня, высоких температур и химических агентов. В настоящее время в качестве электрической изоляции и защитной оболочки проводов и кабелей разных марок применяют

три класса полимеров: традиционные резины, классические термопласты (поливинилхлоридные пластикаты, полиолефины, фторопласты и др.) и термопластичные эластомеры (ТПЭ).

Обычно прогнозирование срока службы кабелей низкого напряжения сводится к задаче прогнозирования срока службы полимерных материалов, применяемых для изоляции и оболочки этих изделий.

При включении кабеля под нагрузку вначале нагреваются его жилы, а затем изоляция и оболочка. Опытными измерениями установлено, что перепад температуры между жилой и оболочкой кабеля напряжением 6 кВ примерно 15 °С, а для кабелей 10 кВ — 20 °С. Поэтому в практических условиях обычно ограничиваются измерением температуры оболочки, учитывая, что температура жилы кабеля выше на 15 — 20 °С.

Оболочка во многом определяет электрические и механические характеристики кабеля, физически защищает внутренние компоненты кабеля, придает внешний вид и обеспечивает устойчивость к горению. Кроме того она защищает от внешних воздействий и неприятностей при монтаже.

В качестве оболочки силовых кабелей с полиэтиленовой изоляцией применяют поливинилхлоридный пластикат. Такие оболочки имеют большую стойкость к тепловому старению, не распространяют пламени, устойчивы против кислот и других корродирующих веществ. Толщину оболочки принимают значения с 1,8 мм и выше в зависимости от диаметра кабеля. Поверх оболочки кабелей, предназначенных для прокладки в земле, накладывают защитные покровы, аналогичные применяемым для силовых кабелей с пропитанной бумажной изоляцией

Испытания оболочки кабельной линии с СПЭ-изоляцией проводятся повышенным напряжением постоянного тока, а в случае пробоя осуществляется локальный поиск места повреждения.

Испытания защитных пластмассовых оболочек кабелей 10-20 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена осуществляются:

- перед включением КЛ в эксплуатацию;

- после ремонтов основной изоляции КЛ;
- в случаях проведения раскопок в охранной зоне КЛ и связанного с этим возможного нарушения целостности оболочек;

Диагностика оболочки кабеля проводится перед подключением, затем через 3 года после подключения, а дальше через каждые 4 года эксплуатации.

Однако практика показывает, что планово-предупредительные испытания повышенным напряжением не только не гарантируют работу КЛ, но и сокращают срок службы КЛ. Более эффективным и экономичным является щадящий метод испытаний напряжением сверхнизкой частоты 0,1 Гц, которое по величине не превышает более чем в 2 раза номинальное напряжение КЛ. Испытания при очень низких частотах со сменой полярности позволяют выявлять дефекты в изоляции без формирования объемных зарядов в структуре полиэтиленовой изоляции [1].

### **3.3 Теплофизические свойства силового кабеля**

Силовые кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена имеют ряд преимуществ: повышенная рабочая температура, вследствие чего более высокая пропускная способность; повышенная стойкость при аварийных режимах работы; надежность в эксплуатации; снижение себестоимости прокладки, сравнительно меньшая масса [23].

Для того чтобы реализовать преимущества силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, необходимо прогнозировать работоспособность кабельной линии. Пропускная способность кабельной линии напрямую зависит от температурного поля кабеля.

Математическое моделирование и анализ температурных полей в кабельном канале не возможно без определения теплофизических характеристик элементов конструкции кабеля.

На сегодняшний день наиболее полно исследованы теплофизические свойства проводниковых материалов, используемых для токопроводящих

жил, металлических экранов кабелей. Необходимые сведения содержатся в справочных материалах [24].

Наиболее важными и общепринятыми для оценки эксплуатационных свойств электрокабелей, рассчитанных на напряжение до 150 кВ, являются следующие параметры: удельное сопротивление изоляции, диэлектрическая постоянная, тангенс угла диэлектрических потерь и электрическая прочность на пробой, изменение тока утечки [25].

Таблица 3 - Электроизоляционные свойства полимерных материалов

Материал	Уд. объемное электрическое сопротивление, Ом*см	Электрическая прочность, кВ/мм	Тангенс угла диэлектрических потерь при 1 КГц	Диэлектрическая проницаемость
ПВХ-пластикаты	$10^{11}-10^{14}$	14-20	$(50-90)*10^{-3}$	3-10
Полиэтилен	$10^{15}-10^{17}$	18-30	$(0,1-0,3)*10^{-3}$	2,3
Сшитый полиэтилен	более $10^{15}$	25-98	$0,3*10^{-3}$	2,3-2,4
Полипропилен и его сополимеры	$10^{14}-10^{15}$	25-30	$(0,2-0,3)*10^{-3}$	2,3-2,4
Фторопласты: ПВДФ (Ф-2) ПТФЭ (Ф-4)	более $10^{14}$ более $10^{16}$	10-37 20-30	$(10-20)*10^{-3}$ $(0,2-0,3)*10^{-3}$	7,5-13 2,0

Электрическое сопротивление изоляции является основной характеристикой электроизоляционных материалов. Электрическое сопротивление изоляционных материалов рассматривается как их внутреннее свойство, обусловленное, в первую очередь, химической структурой макромолекул. Чаще всего оценивают удельное объемное сопротивление изоляции ( $\rho_v$ ) при постоянном напряжении согласно ASTM D257.

Для кабелей управления и контрольных как и для подавляющего большинства других кабельных изделий, предъявляется требование по максимальному значению электрического сопротивления изоляции. Необходимость этого требования обусловлена тем, что с уменьшением электрического сопротивления изоляции растут токи утечки между жилами, имеющими разные потенциалы, а также токи утечки на землю; это приводит не

только к потерям мощности в цепях контроля и управления, но и к искажению передаваемых сигналов [16].

Сопротивление изоляции измеряется при постоянном токе между данной жилой и другими жилами кабеля, а также между жилой кабеля и его оболочкой. По мере старения изоляции жил кабеля и воздействия внешних условий сопротивление изоляции падает.

Величина сопротивления изоляции зависит от температуры диэлектрика и с повышением температуры резко уменьшается по экспоненте (Рисунок 5) [26]. В среднем сопротивление изоляции уменьшается в 1,5 раза при увеличении температуры на каждые 10 °С и так же возрастает при соответствующем уменьшении температуры.

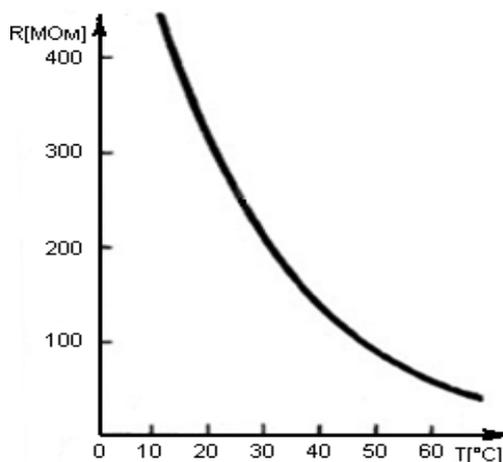


Рисунок 5 - Зависимость сопротивления от температуры

Показатель диэлектрической постоянной для полимеров, являющийся мерой способности материала сохранять энергию в электрическом поле, существенно зависит от температуры и влажности окружающей среды и в нормальных условиях, как правило, соответствуют интервалу значений от 2 до 5 (ASTM D150) [4].

При повышении температуры величина диэлектрической проницаемости жидкостей плавно снижается.

Тангенс угла диэлектрических потерь характеризует способность материала к поляризации под действием внешнего электрического поля.

Изоляционные материалы должны обладать как можно меньшим значением этого параметра при определенной частоте тока.

По мере увеличения времени теплового старения тангенс угла диэлектрических потерь снижается в максимумах температурной и частотной зависимостей, но положение максимумов сохраняется при той же температуре и частоте.

Среди наиболее важных свойств внешней (защитной) оболочки кабельных изделий следует отметить стойкость к действию огня, высоких температур и химических агентов [4].

Состояние изоляции кабеля оценивается током утечки и его асимметрией (разницей токов) по фазам. При удовлетворительном состоянии изоляции сила тока утечки в момент подъема напряжения на каждой ступени резко возрастает за счет заряда емкости кабеля, а затем быстро падает: у кабеля напряжением 6... 10 кВ — до 500 мкА, у кабеля напряжением 20... 35 кВ — до 800 мкА. При наличии дефектов сила тока утечки падает медленно и даже может возрасти. Запись значения тока утечки производится на последней минуте испытаний.

Асимметрия у кабеля с неповрежденной изоляцией не должна превышать 50 %. Изоляция дефектного кабеля обычно пробивается при подъеме напряжения, испытательная установка в этот момент автоматически отключается.

Кабельная линия считается выдержавшей испытания, если во время них не произошло пробоя или перекрытия по поверхности концевых муфт и значения токов утечки и их асимметрии не превысили нормированных значений, а также не наблюдалось резких изменений силы тока.

Для полимеров характерна сильная температурная зависимость свойств даже в небольших температурных диапазонах.

Следует отметить, что в доступной литературе мало представлено информации о температурных зависимостях теплофизических свойств сшитого полиэтилена.

Работа [27] посвящена анализу зависимостей удельного теплового сопротивления и удельной теплоемкости от температуры для сшитого полиэтилена. Утверждается, что эта зависимость существенна и обязательно должна быть учтена в расчетах тепловых процессов кабелей. Приводятся экспериментальные графики этих зависимостей.

На рис. 6 – 7 представлены зависимости коэффициента теплопроводности, удельной теплоемкости [28-30].

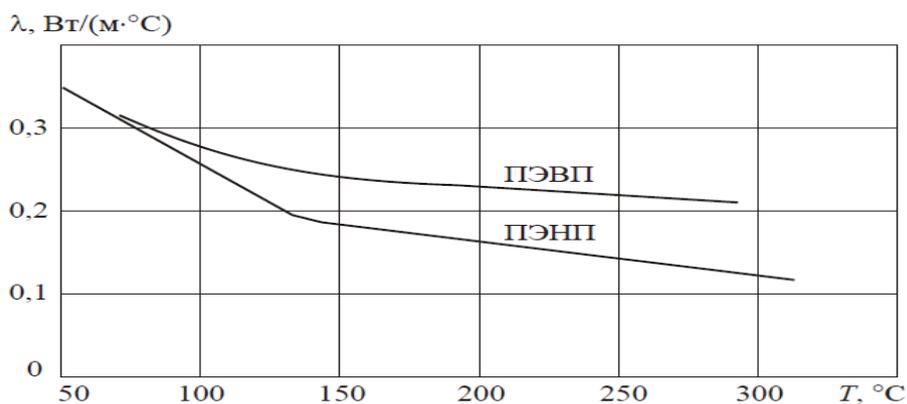


Рисунок 6 - Зависимость коэффициента теплопроводности от температуры

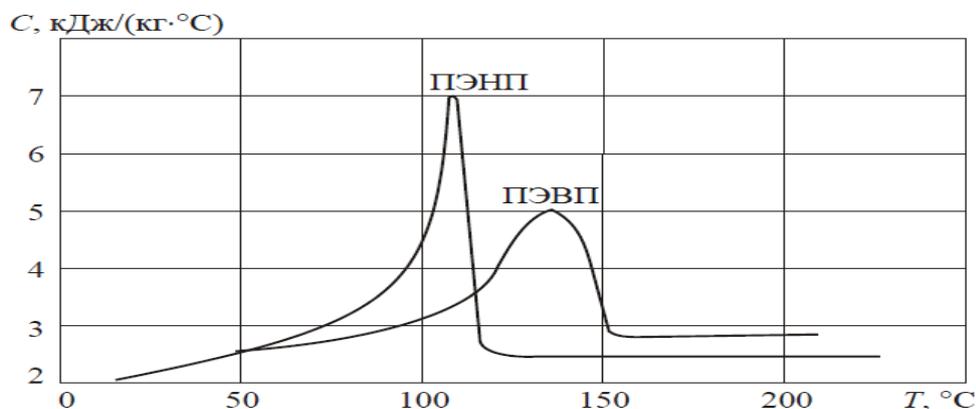


Рисунок 7 - Зависимость удельной теплоемкости от температуры

Из представленных зависимостей видно, что даже для изолирующих материалов, имеющих одинаковую полимерную основу, теплофизические параметры могут значительно отличаться. Очевидно, что результаты расчетов температурного поля в кабельном канале, температура изоляции и величина допустимой токовой нагрузки силовых кабелей существенно будут зависеть от заданных величин характеристик исследуемых материалов.

Таким образом, для разработки полной математической модели исследуемых процессов необходимо знание зависимостей теплофизических характеристик изоляционных материалов силового кабеля от температуры.

Необходимо оценивать влияние зависимостей теплофизических и электрических характеристик материалов от температуры.

### **3.4 Распределение теплового поля в кабелях с СПЭ изоляцией**

Развитие современной энергетики и новых отраслей техники сопровождается резким повышением теплонапряженности элементов конструкций. Диапазон температур изменяется от температур близких к абсолютному нулю, до трех-четырёх тысяч градусов, при значительных перепадах во времени и пространстве. Изменение теплового состояния элементов конструкций вызывается внешними и внутренними воздействиями [32]. Одной из основных причин выхода кабельных линий из строя является повышенное тепловыделение в проводящих экранах, внутри которых расположены токоведущие жилы. Токи, индуцируемые в таком экране токами соседних фаз, могут вызвать высокие джоулевы потери, приводящие к термической деструкции.

Тепловой режим и пропускная способность кабельной линии среднего и высокого напряжения будут определяться [20]:

- током линии;
- сечением жил и экранов;
- схемой заземления экранов;
- геометрией размещения жил;
- средой, в которой прокладывается линия;
- наличием внешних проводников и устройств, приводящих к ограничению теплообмена (проводящие или диэлектрические трубы для прокладки в области препятствий).

Процесс передачи тепла в кабеле с многослойной изоляцией происходит путем теплопроводности. Между ее слоями могут находиться зазоры и неровности, приводящие к появлению контактных термических сопротивлений. Особенно нежелательны в изоляции кабелей и проводов (за исключением кабелей связи) воздушные пузырьки или пленки [25]. Идеальной изоляцией кабелей, особенно высоковольтных и высокочастотных, явилась бы изоляция из однородного диэлектрика без потерь. И хотя изготовить такой диэлектрик невозможно, при проектировании и изготовлении кабельных изделий стремятся получить как можно более однородную изоляцию и с возможно меньшими потерями (например, используя полиэтилен, полистирол и т. д.) [32].

При постоянной нагрузке в кабеле существует стационарное тепловое поле. Во время работы нагрузка может периодически изменяться. Если генерируемое в кабеле тепло больше отводимого, то кабель нагревается и его температура повышается. Если же потери в окружающую среду превышают выделение тепла, то кабель охлаждается и его температура понижается [15].

Источником теплового поля внутри и снаружи кабеля являются электрические токи, протекающие по всем металлическим элементам конструкции: по жиле кабеля и экрану из медных проволок [33].

Кабель, проложенный в земле, охлаждается путем передачи тепла от наружной поверхности к окружающей его среде. С целью обеспечения более плотного облегания грунтом кабель укладывают на дно траншеи на подушку из песка и засыпают мягкой землей с последующей тщательной утрамбовкой ее. Наличие крупных кусков земли около кабеля или неплотное ее прилегание к кабелю повышает удельное тепловое сопротивление среды; это приводит к ухудшению охлаждения кабеля во время эксплуатации. Если в одной траншее укладывается несколько кабелей, то расстояние между ними должно быть не меньше диаметра кабеля [15].

Для моделирования теплового поля в кабеле существует множество инструментов, среди которых Ansys, Асоника-Т, предназначенная для моделирования тепловых процессов, а так же Elcut. Ведущие

электромашиностроительные заводы страны применяют ELCUT для расчета электромагнитных параметров и тепловых режимов электрических машин. Необходимость в анализе поля возникает при расчёте для оптимизации существующих машин, либо при расчёте машин нетрадиционных конструкций.

Программный комплекс ELCUT включает в себя следующие задачи:

1. Набор для магнитных расчетов (Магнитостатика; Магнитное поле переменных синусоидальных токов; Нестационарное магнитное поле)

2. Набор для электрических расчетов (Электростатика и электрическое поле постоянных токов; Электрическое поле переменных синусоидальных токов; Нестационарное электрическое поле)

3. Набор для тепловых и механических расчетов (Стационарная теплопередача; Нестационарная теплопередача; Анализ упругих деформаций)

Решение задачи включает в себя следующие этапы:

1. Построение геометрической модели кабеля;
2. Задание физических свойств материалов;
3. Получение результата – распределение поля.

Тепловые расчеты с помощью ELCUT успешно используют при проектировании систем обогрева с помощью нагреваемых кабелей, специализированных и комбинированных систем контроля температуры, вентилируемых фасадов, ограждающих конструкций в строительстве и архитектурном проектировании.

## **4 Исследование процессов теплообмена**

### **4.1 Математическое моделирование теплового поля силового кабеля**

Кабельные линии, расположенные в грунте, воздухе или блоке, при нагрузке являются источниками теплового воздействия. Пропускная способность кабеля определяется температурой в среде, величина которой

зависит от ряда факторов: геометрических параметров, теплофизических характеристик, свойств окружающей среды, условий теплообмена и других.

Основой расчета двумерных стационарных температурных полей методом конечных элементов является общее дифференциальное уравнение теплопроводности [4], которое в декартовой системе координат имеет вид:

$$\frac{d}{dx} \left( r \lambda_x \frac{dT}{dx} \right) + \frac{1}{r} \lambda_x \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dy} \left( \lambda_y \frac{dT}{dy} \right) = q \quad (4.1)$$

где  $\lambda_x$ ,  $\lambda_y$  – коэффициенты теплопроводности в текущей точке расчетной области в направлении осей координат  $x$  и  $y$  соответственно;  $q$  – объемная плотность источников нагрева.

В результате решения уравнения (4.1) с граничными условиями определяется искомое температурное поле в установившемся тепловом режиме.

Для теплового расчета МКЭ использован Elcut версии 5.1. Объектом численного моделирования являются силовые кабели, проложенные различными способами. В качестве расчетного варианта рассмотрено расположение кабелей в горизонтальной плоскости в блоке и в воздухе, в так же расположение треугольником в грунте и в блоке. Рассмотренный кабель имеет конструкцию с параметрами, представленными в Таблице 4.

Таблица 4 – Параметры силового кабеля

1. Токопроводящая жила	
Материал	Медь электропроводящая
Номинальное сечение жилы	$S_H = 240 \text{ мм}^2$ ;
Диаметр жилы	$D_{ж} = 20.515 \text{ мм}$
2. Экран по жиле	
Материал	Медь электропроводящая
Толщина электропроводящего экрана по жиле	$\Delta_{э1} = 1.25 \text{ мм}$
Диаметр по электропроводящему экрану на жиле	$D_{э1} = 23.015 \text{ мм}$ ;
3. Изоляция	
Материал	Сшитый полиэтилен
Толщина электрической изоляции	$\Delta_{из} = 16 \text{ мм}$ ;
Диаметр по изоляции	$D_{из} = 55.015 \text{ мм}$ ;

Продолжение Таблицы 4	
<b>4. Экран по изоляции</b>	
Материал	Металлический, из медных проволок
Толщина электропроводящего экрана по изоляции	$\Delta_{мэ} = 1.25$ мм;
Диаметр по металлическому экрану	$D_{мэ} = 57.515$ мм;
<b>5. Разделительный слой</b>	
Материал	Слюдосодержащая лента
Толщина по разделительному слою	$\Delta_{мэ} = 0.25$ мм;
Диаметр по разделительному слою	$D_{мэ} = 58,015$ мм;
<b>6. Наружная оболочка</b>	
Материал	Полимерная композиция
Толщина оболочки	$\Delta_{об} = 3.4$ мм
Диаметр кабеля	$D_{каб} = 64.815$ мм

В зависимости от условий прокладки возникают различные типы теплоотвода, которые учитываются при определении максимального допустимого тока исходя из условия теплового баланса.

Решение задачи проводилось с учетом естественной конвекции воздуха и теплообмена.

Исходными данными для решения прямой задачи, помимо тепловыделений, являлись геометрическая модель кабеля (геометрические параметры указаны в Таблице 4) и данные о тепловых характеристиках материалов и окружающей среды. Граничные условия задавались в зависимости от условий прокладки.

В результате, для моделирования в программе Elcut создано 8 блоков и 2 граничных условия (Рисунок 8). Аналогично для моделирования в блоке и воздухе, граничные условия заданы в соответствие с условием прокладки, элементы конструкции кабеля неизменны.

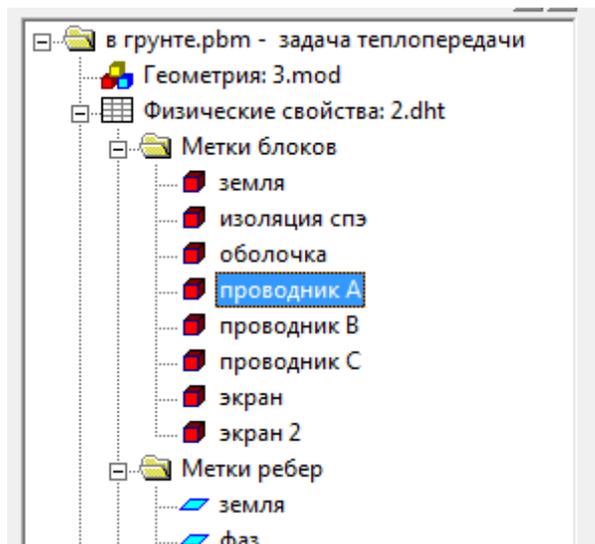


Рисунок 8 – Свойства задачи стационарной теплопередачи

Согласно приказу Минэнерго РФ от 19.06.2003 [41] температура воздуха внутри кабельных туннелей, каналов и шахт в летнее время должна быть выше температуры наружного покрова земли не более чем на  $10^{\circ}\text{C}$ . В зимнее время разница в температурах может быть и большей. В действительности температурный режим может быть рассчитан на основе математического моделирования процессов, протекающих в кабельном канале, с учетом сезонных колебаний температур.

Значение температуры выбирается в соответствии с ТУ на кабель: обычно для прокладки в грунте —  $15^{\circ}\text{C}$ , для прокладки в воздухе –  $25^{\circ}\text{C}$ , температура воздуха в блоке –  $0^{\circ}\text{C}$ . Температура жилы кабеля составляет  $90^{\circ}\text{C}$ . На рис. 9–11 представлены геометрические модели, построенные в системе ELCUT для различных способов прокладки фаз. Рис. 12-13 иллюстрирует работу в программе. В аналогичном активном окне задаются параметры для каждого элемента конструкции и для граничных условий.

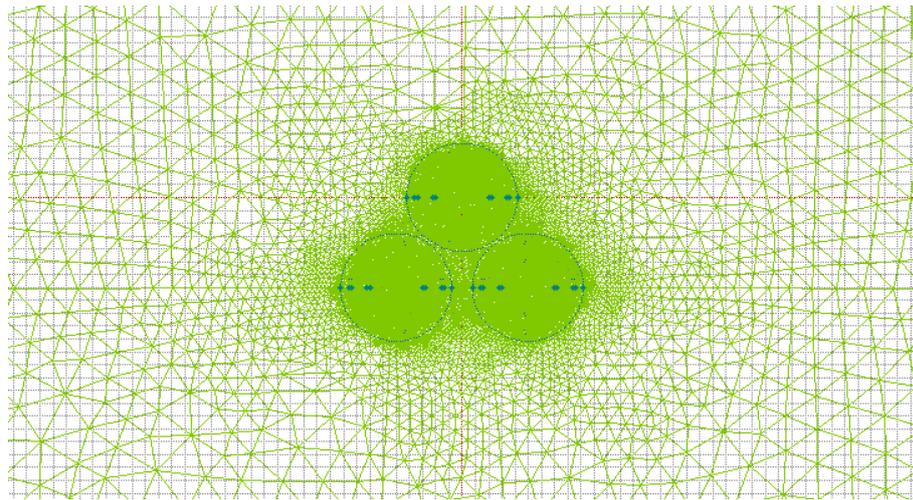


Рисунок 9 – Прокладка треугольником встык с дискретизацией расчетной области

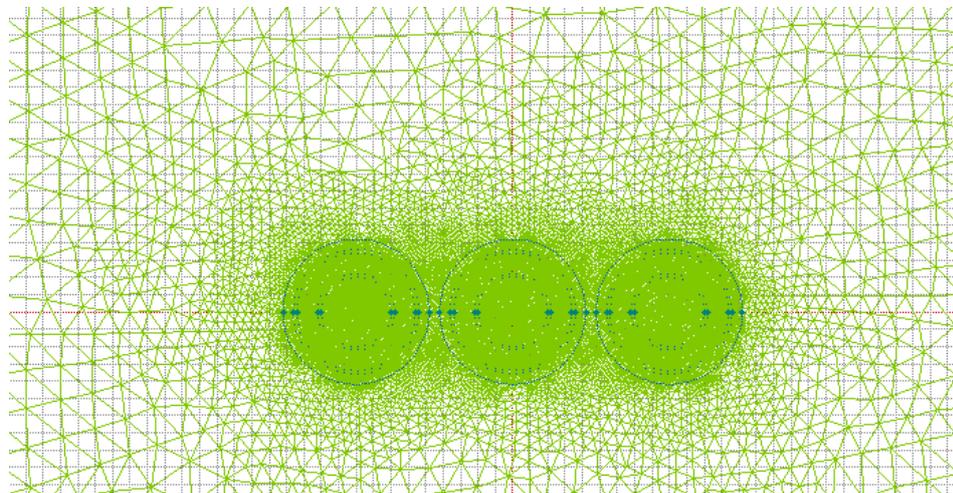


Рисунок 10 - Прокладка в горизонтальной плоскости

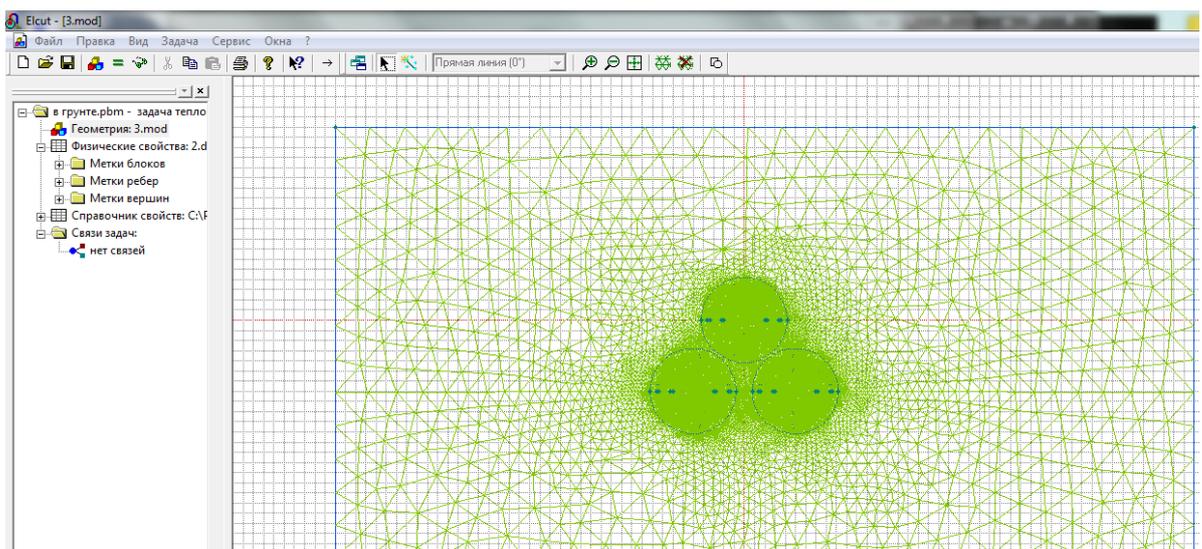


Рисунок 11 – Общий вид модели при прокладке в грунте треугольником

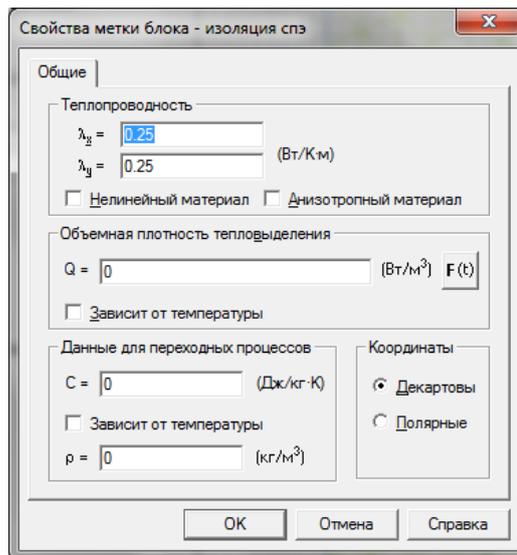


Рисунок 12 – Активное окно Elcut при введении свойств блока модели «ИЗОЛЯЦИЯ»

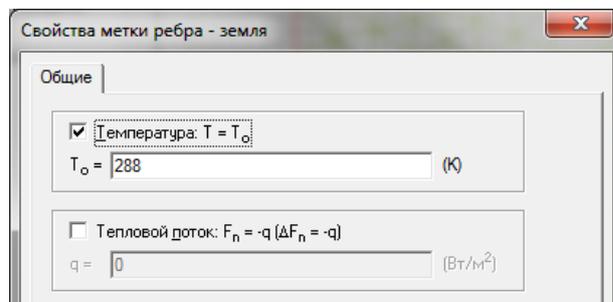


Рисунок 13 – Активное окно Elcut при введении граничных условия модели «грунт»

Приняты следующие допущения: процесс стационарный, задача плоская, теплофизические свойства материалов постоянны.

В качестве материала ТПЖ использована электротехническая медь. Свойства меди при температуре 20°C приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Свойства меди при температуре 20°C

Параметры	Значение
Плотность, г/ см <sup>3</sup>	8.89
Удельное сопротивление $\rho \cdot 10^6$ , Ом м	0.01724
Температурный коэффициент сопротивления, °C <sup>-1</sup>	0.0039

В таблице 6 приведены теплофизические свойства рассматриваемых материалов, которые были использованы для моделирования в программе Elcut.

Таблица 6 - Теплофизические свойства материалов и элементов конструкции

Теплопроводность меди, Вт/м·К	386
Теплопроводность воздуха, Вт/м·К	0,034
Теплопроводность изоляции, Вт/м·К	0,25
Теплопроводность оболочки кабеля, Вт/м·К	0,32
Теплопроводность грунта, Вт/м·К	0,4
Теплопроводность железобетон, Вт/м·К	1,7

При расчете в Elcut автоматически сгенерирована сетка конечных элементов (см. Рисунок 11).

Используя метод конечных элементов, получена картина распределения температурного поля (Рисунки 14-16). Картина распределения температуры в грунте приведена на рисунке 14.

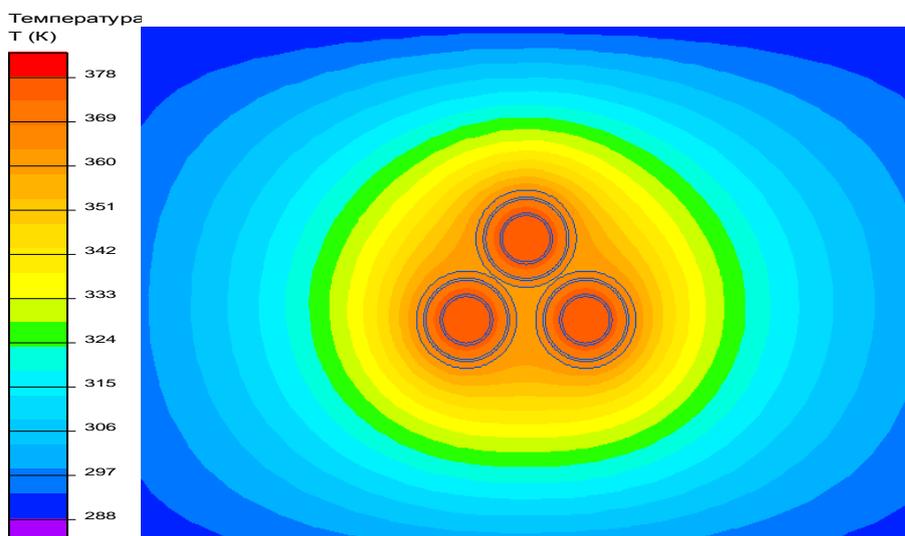


Рисунок 14 – Распределение температуры в грунте

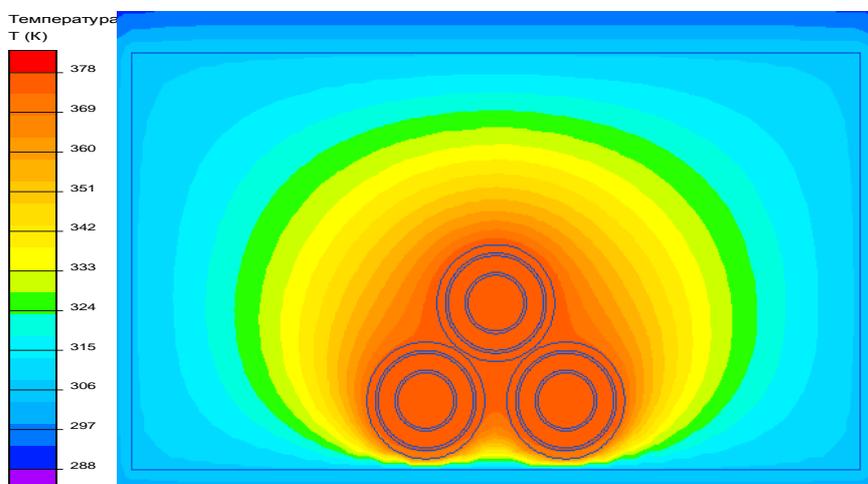


Рисунок 15 – Распределение температуры в блоке

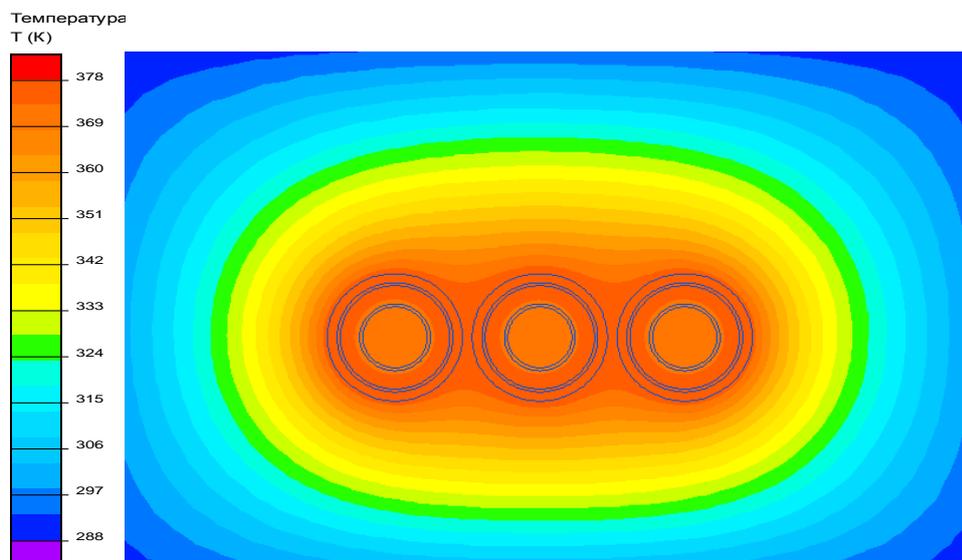


Рисунок 16 – Распределение температуры в воздухе

Для получения физических величин, характеризующих поле, использована панель калькулятора в программе Elcut (Рисунок 17). Elcut позволяет решить задачи несколькими способами, одним из которых является «Локальные полевые значения». Локальные значения отображают различные полевые характеристики в указанных точках расчетной области.

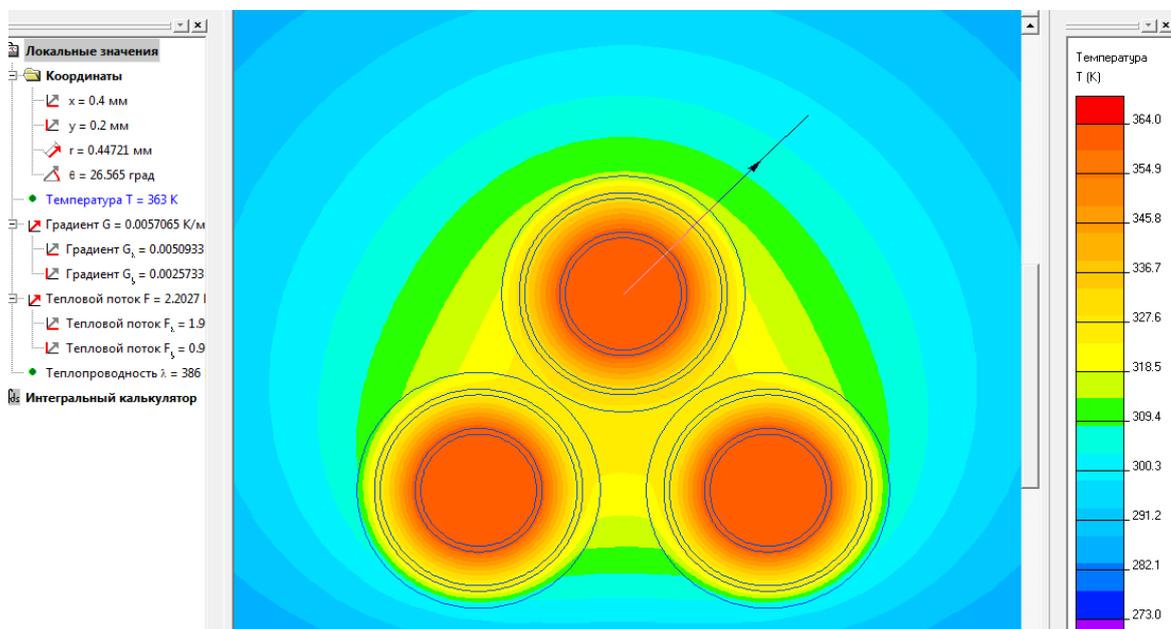


Рисунок 17 – Активное окно Elcut при использовании панели калькулятора

В результате решения данной задачи получены температуры нагрева жилы и температуры на границе оболочки кабеля (результаты представлены в таблице 7).

Таблица 7 – Локальные полевые значения температуры при различных способах прокладки (без учета вариации теплофизических свойств среды)

Условия прокладки		Значение температуры, °С	
		Жилы	На оболочке
Прокладка треугольником	Грунт	90	73,12
	Блок	90	73,49
Прокладка в горизонтальной плоскости	Воздух	90	76,8
	Блок	90	76,32

#### 4.2 Проверка адекватности алгоритма работы программы и математической модели

Для проверки адекватности разработанных математических моделей и достоверности полученных результатов, проведено сравнение полученных численных результатов с результатами, представленными в открытой литературе.

Тепловой расчет кабеля основан на решении уравнения теплового баланса: выделяющаяся в кабеле активная мощность переходит в тепло, которое нагревает кабель и окружающий его грунт. При рассмотрении этого уравнения и его составляющих предположено, что тепло отводится от кабеля только в радиальном направлении. [34].

Тепловая схема замещения, для проектируемого кабеля, приведена на рисунке 18. Обычно в инженерных расчетах термическое сопротивление среды принимается как константа. Согласно данной задаче именно эта величина варьируется.

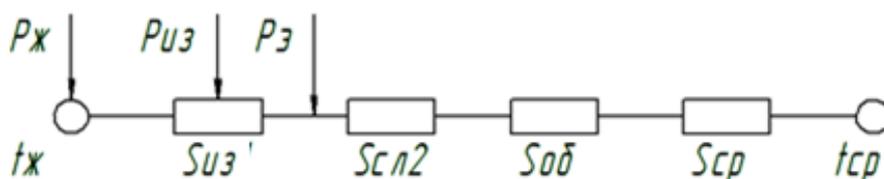


Рисунок 18 – Тепловая схема замещения проектируемого кабеля:

$t_{ж}$  - температура жилы;  $t_{ср}$  - температура среды;  $P_{ж}$  - потери в ТПЖ;  $P_{из}$  - потери в изоляции;  $P_{эк}$  - потери в медном экране;  $S_{из}$  - тепловое сопротивление изоляции;  $S_{сл1}$  - тепловое сопротивление разделительного слоя;  $S_{сл2}$   $S_{об}$  - тепловое сопротивление оболочки;  $S_{ср}$  - тепловое сопротивление среды.

Тогда, исходя из тепловой схемы замещения, для проектируемого кабеля, максимальный ток нагрузки:

$$I_{max} = \sqrt{\frac{\Delta t_{max} - P_{из} \cdot (0.5 \cdot S_{из} + S_{сл1} + S_{об} + S_{ср})}{R_{жст} \cdot (S_{из} + (1 + y_{\varnothing}) \cdot (S_{сл1} + S_{об} + S_{ср}))}}, \quad (4.2)$$

где  $\Delta t_{max}$  - перепад температур между температурой на поверхности кабеля и температуры окружающей среды;

$S_{из}, S_{сл1}, S_{об}, S_{ср}$  - соответственно термические сопротивления изоляции, разделительных слоев, оболочки и окружающей среды.

Рассчитаны тепловые сопротивления элементов кабеля:

$$S_{из} = \frac{\sigma_{из}}{2\pi} \ln \frac{R_{изэ}}{r_{жэ}} = \frac{3}{2\pi} \ln \frac{28.757}{11.507} = 0.437 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}; \quad (4.3)$$

$$S_{сл1} = \frac{\sigma_{сл}}{2\pi} \ln \frac{r_{сл1}}{R_{изэ}} = \frac{6.5}{2\pi} \ln \frac{29.007}{28.757} = 8.955 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}; \quad (4.4)$$

$$S_{об} = \frac{\sigma_{об}}{2\pi} \ln \frac{r_{к}}{r_{л}} = \frac{3}{2\pi} \cdot \ln \frac{32.407}{28.757} = 0.053 \text{ } ^\circ\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}; \quad (4.5)$$

где  $R_{изэ}$  - радиус по экрану изоляции;  $r_{л}$  - радиус по изоляции;  $r_{к}$  - радиус кабеля;  $r_{сл1} = 29,007$  мм - радиус по разделительному слою;  $\sigma_{сл1} = 6.5, ^\circ\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$  - удельное тепловое сопротивление разделительного слоя;  $\sigma_{из} = 3, ^\circ\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$  - удельное тепловое сопротивление изоляции;  $\sigma_{об} = 3, ^\circ\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$  - удельное тепловое сопротивление оболочки из полиэтилена.

Для стационарного режима работы кабельной линии когда  $W_{выд} = W_{отв}$  тепловой закон Ома записан в следующем виде:

$$t_{жс} - t_{ср} = P_{\Sigma} \cdot \sum_{i=1}^n S_i. \quad (4.6)$$

Для определения температуры на поверхности кабеля, в соответствии со схемой замещения, исключено из расчета термическое сопротивление окружающей среды. Тогда представим (4.6) в соответствии с этим условием:

$$\begin{aligned} \Delta t_{нк} = t_{жс} - t_{нк} &= P_{жс} \cdot (S_{из} + S_{сл1} + S_{об}) + P_{из} \cdot (0,5S_{из} + S_{сл1} + S_{об}) + \\ &+ P_{\vartheta} \cdot (S_{сл1} + S_{об}) = P_{жс} \cdot [S_{из} + (1 + Y_{об}) \cdot (S_{сл1} + S_{об})] + \\ &+ P_{из} \cdot (0,5S_{из} + S_{сл1} + S_{об}) \end{aligned} \quad (4.7)$$

В кабелях переменного тока диэлектрические потери в изоляции  $P_{из}$  находятся по формуле:

$$\begin{aligned} P_{из} &= \left( \frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot C \cdot \omega \cdot tg \delta = \\ &= \left( \frac{10 \cdot 10^3}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot 1.466 \cdot 10^{-10} \cdot 314 \cdot 5 \cdot 10^{-4} = 7.677 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м.} \end{aligned} \quad (4.8)$$

где  $tg \delta = 5 \cdot 10^{-4}$  – тангенс угла диэлектрических потерь СПЭ.

Определение потерь в ТПЖ:

$$P_{жс} = I^2 \cdot R_{жс} = 884,4^2 \cdot 7.339 \cdot 10^{-5} = 57.39 \text{ Вт/м} \quad (4.9)$$

При тепловом расчете кабеля потери электромагнитной энергии в металлических элементах связаны с магнитными полями своих и соседних жил и выражаются через потери в жилах. Таким образом, потери в металлическом экране на единице длины:

$$P_{\vartheta} = P_{жс} \cdot y_{\vartheta} = 6,485 \text{ Вт/м} \quad (4.10)$$

Тогда,

$$\begin{aligned} \Delta t_{нк} = t_{жс} - t_{нк} &= 34.439 \cdot [0.437 + (1 + 0,113) \cdot (8.955 \cdot 10^{-3} + 0.053)] + \\ &+ 7.677 \cdot 10^{-4} \cdot (0,5 \cdot 0.437 + 8.955 \cdot 10^{-3} + 0.053) = 17.425^{\circ} \text{C} \end{aligned}$$

Тогда, из расчётного выражения получено значение температуры поверхности кабеля равное  $72,57^{\circ} \text{C}$ .

Сопоставляя с результатами в программном комплексе Elcut, погрешность расчета температур на поверхности кабеля составляет менее 1%,

поэтому можно судить об адекватности расчета температуры на поверхности кабеля в программе Elcut .

В работе [35] были численно исследованы процессы теплопередачи и электродинамики силовых кабелей, проложенных линейно в массиве земли на глубине 1м на расстоянии 0,1 м друг от друга. На рис. 19 и рис. 20 представлены распределения температуры вблизи кабельной линии, полученные в результате решения тепловой задачи [36]. Максимальная температура достигается на поверхности жилы центрального силового кабеля.

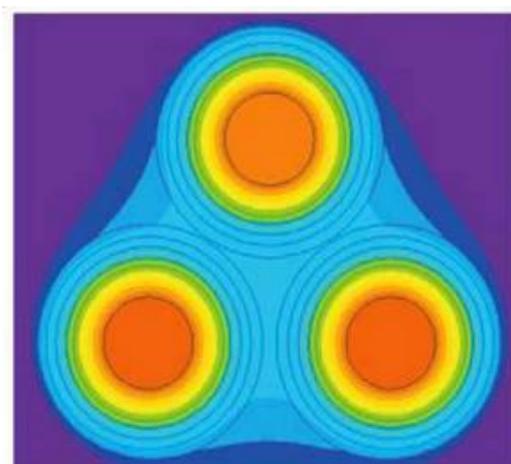


Рисунок 19 - Распределение температуры вблизи кабельной линии:  
данные расчета по модели работы [36].

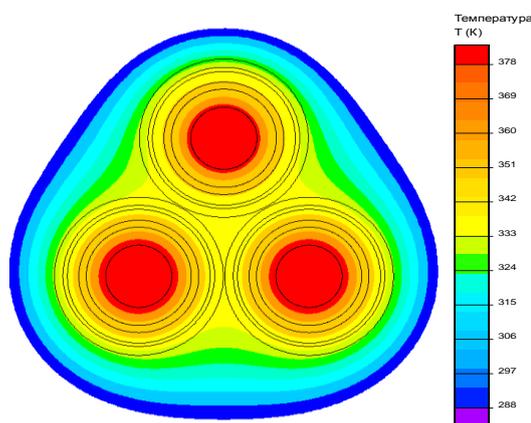


Рисунок 20 - Распределение температуры вблизи кабельной линии:  
данные расчета по предложенной модели 2.

Из анализа температурных полей видно, что численные расчеты, полученные с помощью предложенной математической модели достаточно

хорошо согласуются с результатами, представленными в работе [36]. Наибольшее расхождение температурных полей не превышает  $1^{\circ}\text{C}$ .

Сравнительный анализ полученных температурных полей показал, что результаты, полученные с помощью предложенной математической модели, достаточно хорошо согласуются с результатами работы, как на качественном, так и количественном уровне.

#### **4.3 Исследование влияния параметров окружающей среды на тепловое поле кабеля**

Без учета в тепловой модели таких параметров, как изменение потерь при увеличении электрического сопротивления жил кабеля, потерь в электрических оболочках силовых кабелей, а также изменения тепловых параметров прилегающих к кабелю слоев грунта может привести к недопустимым перегревам изоляции токоведущих жил. Важной характеристикой почв является увеличение их удельного термического сопротивления при осушении. Теплота, выделяемая кабелем, вызывает миграцию влаги в почве; в порах почвы, которые первоначально были заняты влагой, остается воздух, и удельное термическое сопротивление увеличивается из-за высокого удельного термического сопротивления воздуха, теплоемкость же, наоборот, уменьшается. Состав почвы также влияет на удельные величины теплоемкости и термического сопротивления почвы (тепловые параметры почвы).

Согласно стандарту МЭК 60287-1-3 [63] токовая нагрузка проложенных в земле кабелей определяется характеристиками почвы и свойствами кабелей. В стандарте указано, что удельное тепловое сопротивление грунта варьируется от  $0,5$  до  $1,2^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ , но тепло, рассеиваемое кабелем под влиянием нагрузки, увеличивает тепловое сопротивление грунта, что может привести к отказу кабеля по причине нарушения теплового режима и температурной нестабильности грунта вокруг кабеля.

При прокладке в плоскости токи рассчитаны при расстоянии между кабелями равном диаметру кабелей, при прокладке треугольником – вплотную. При прокладке в земле токи рассчитаны на глубине прокладки 0,7 метра и удельном термическом сопротивлении почвы 1,2 °С·м/Вт. Допустимые токи даны для температуры окружающей среды 15 °С при прокладке в земле и 25 °С при прокладке в воздухе. При других расчетных температурах окружающей среды применяют поправочные коэффициенты [64].

Международный стандарт МЭК 60502-2 (IEC 502) "Силовые кабели с экструдированной изоляцией и их арматура на номинальное напряжение от 1 кВ до 30 кВ" в издании 1997 г. повторяет эту рекомендацию.

Так как температура на поверхности кабеля рассчитана с помощью программного комплекса Elcut, можно оценить распределение температур в окружающей среде с учетом изменения ее параметров. Для стационарного режима формула расчет выглядит следующим образом:

$$\Delta t_{oc} = t_{нк} - t_{cp} = P_{\Sigma} \cdot S_{oc} \quad (4.11)$$

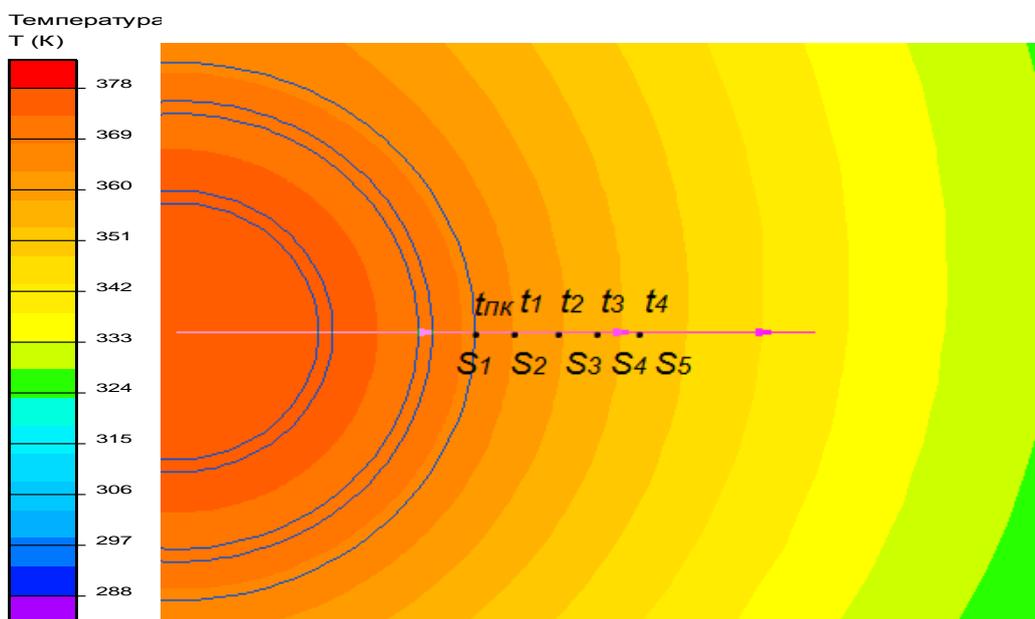


Рисунок 21 – Распределение температур в окружающей среде вблизи кабеля

При прокладке в земле теплоотдача от кабеля в грунт происходит за счет теплопроводности. Тепловое сопротивление грунта (земли) определяется как:

$$S_{12} = \frac{\sigma_3}{2\pi} \cdot \ln\left(\frac{4L}{D_k}\right) \left[ \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}}{\text{Вт}} \right] \quad (4.12)$$

где  $\sigma_3$  - удельное тепловое сопротивление грунта;

$D_k$  - диаметр кабеля, мм;

$L$  – глубина прокладки кабеля в земле (для кабелей  $U_n \leq 10$  кВ,  $L=0,7 \div 0,8$  м).

При проектировании систем заземления необходимо учитывать удельное термическое сопротивление грунта. Удельное термическое сопротивление земли связано со структурой и влажностью почвы.

Исходя из формул (4.14) и (4.15) и в результате интерполирования значений удельного термического сопротивления грунта, на основе данных из IEEE Std 142-1991 (для районов России с многолетней мерзлотой), получена зависимость термического сопротивления земли от температуры (рисунок 22).

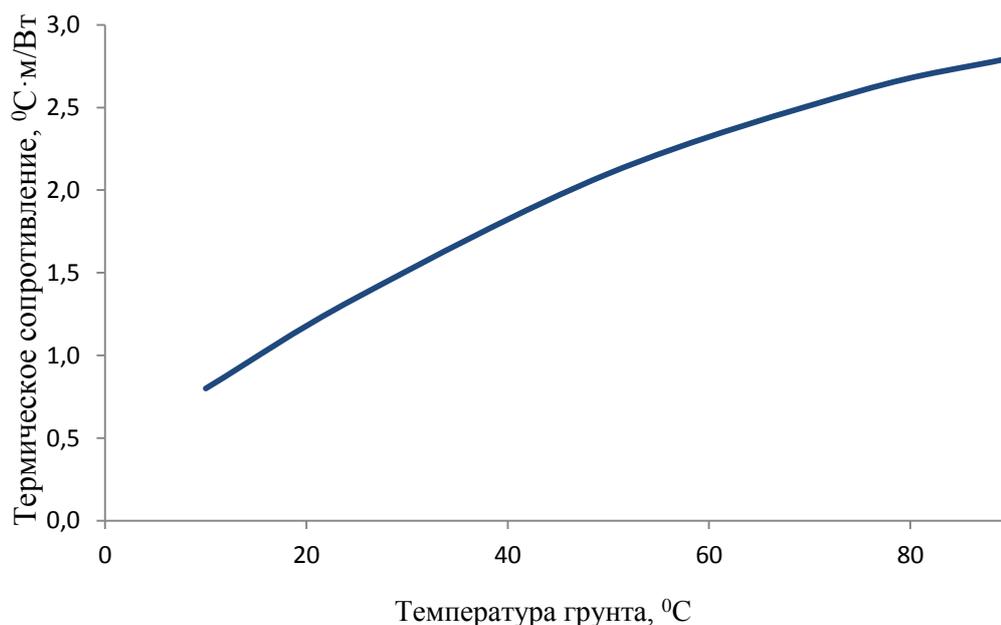


Рисунок 22 - Зависимость термического сопротивления земли от температуры почвы

Аналогичным способом получено термическое сопротивление среды при прокладке кабеля на открытом воздухе.

Тепловое сопротивление воздуха в условиях свободной конвекции и излучения определено по следующей формуле:

$$S_g = \frac{1}{\pi \cdot D_k \cdot (h + \varepsilon_n \cdot C_0 \cdot \Theta)} \left[ \frac{^{\circ}C \cdot m}{Вт} \right] \quad (4.13)$$

где  $h$  – коэффициент конвективной теплоотдачи,

$\varepsilon_n = 0.8$  – коэффициент черноты излучающей поверхности,

$C_0 = 5.7 \cdot 10^{-8} \frac{Вт}{м^2 \cdot К^4}$  – постоянная излучения абсолютно черного тела;

$$\Theta = \frac{T_{нк}^4 - T_{сп}^4}{\Delta t} = \frac{338^4 - 293^4}{45} = 1.263 \cdot 10^8; \quad (4.14)$$

где  $T_{нк} = 338, К$  – температура поверхности кабеля;

$T_{сп} = 293, К$  – температура окружающей среды;

$\Delta t_k = 45, К$  – разность температур поверхности кабеля и окружающей

среды.

Коэффициент конвективной теплоотдачи  $h$  рассчитывается через усредненную (за определенный срок эксплуатации) температуру окружающей среды.

$$h = 4.5 \cdot \sqrt[4]{\frac{\Delta t \cdot 10^{-2}}{D_k}} = 4.5 \cdot \sqrt[4]{\frac{45 \cdot 10^{-2}}{64.315 \cdot 10^{-3}}} = 7.318; \quad (4.15)$$

При изменении условий окружающей среды (перегрузка, изменение температуры окружающей среды и т.д.) коэффициент  $h$  изменяется, соответственно изменяется термическое сопротивление.

С учетом выше сказанного получена зависимость сопротивления при прокладке в воздухе (Рисунок 23).

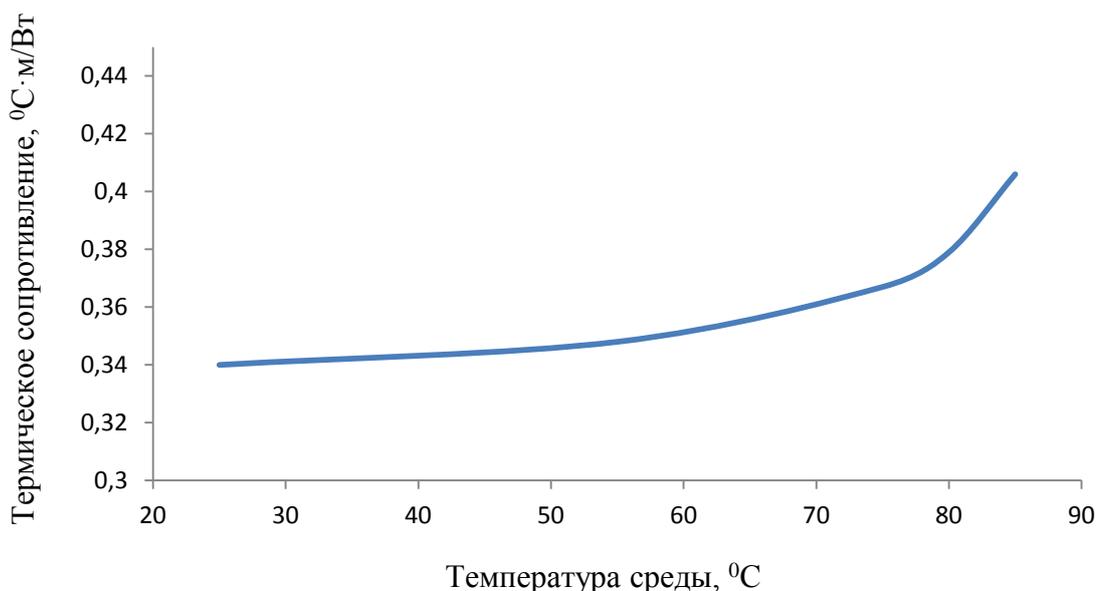


Рисунок 23 – Зависимость термического сопротивления воздуха от температуры среды

Однако определение коэффициентов теплопроводности и термического сопротивления этих изделий является проблемой, т. к. отсутствует утвержденная в установленном порядке методика и необходимое оборудование.

#### 4.4 Результаты моделирования с учетом вариации параметров среды

Для кабелей, проложенных в земле, рекомендуют ограничить температуру оболочки. Если тепло оболочки иссушает почву, тепловое удельное сопротивление может увеличиться, и кабель становится перегруженным. Один из способов избежать этого нагрева состоит в том, чтобы использовать значения максимального тока для случая нагрева ТПЖ до 70 °С даже для кабелей, разработанных для 90 °С.

Существующие стандарты рекомендуют не вводить поправочные коэффициенты при определении допустимой токовой нагрузки кабелей, проложенных в земле, если отклонения температуры не превышают 5 °С в течение нескольких недель в году.

Для учета изменения параметров окружающей среды можно воспользоваться методикой усреднения термического сопротивления, основанной на статистической обработке данных.

Для получения среднего значения удельного термического сопротивления использована интегральная сумма Дарбу.

Среднее значение криволинейной функции:

$$\sigma_{cp} = \frac{1}{b-a} \cdot \int_a^b \sigma(t) \quad (4.16)$$

где  $b-a$  – температурный интервал,

$t$  – температура окружающей среды,

$\sigma(t)$  – функциональная зависимость удельного термического сопротивления от температуры.

При отсутствии функциональной зависимости интеграл заменяется интегральной суммой, которая заключается в делении функциональной зависимости на конечное число участков и замене криволинейной площади под ними на площади прямоугольников, как показано на Рисунке 24.

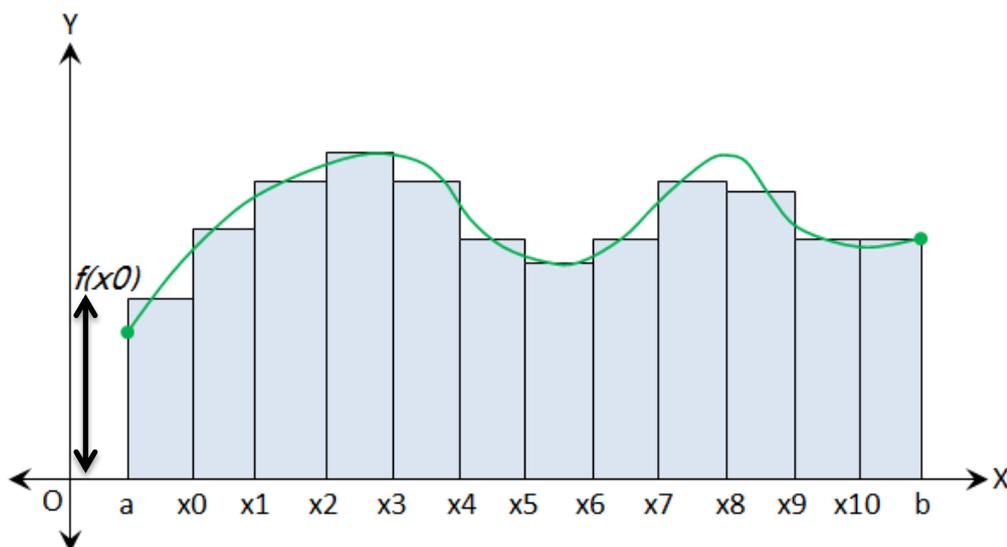


Рисунок 24 – Геометрическая интерпретация интегральной суммы

На рисунке 25 представлена геометрическая интерпретация интегральной суммы для грунта, которая отображает зависимость удельного термического сопротивления от температуры почвы.

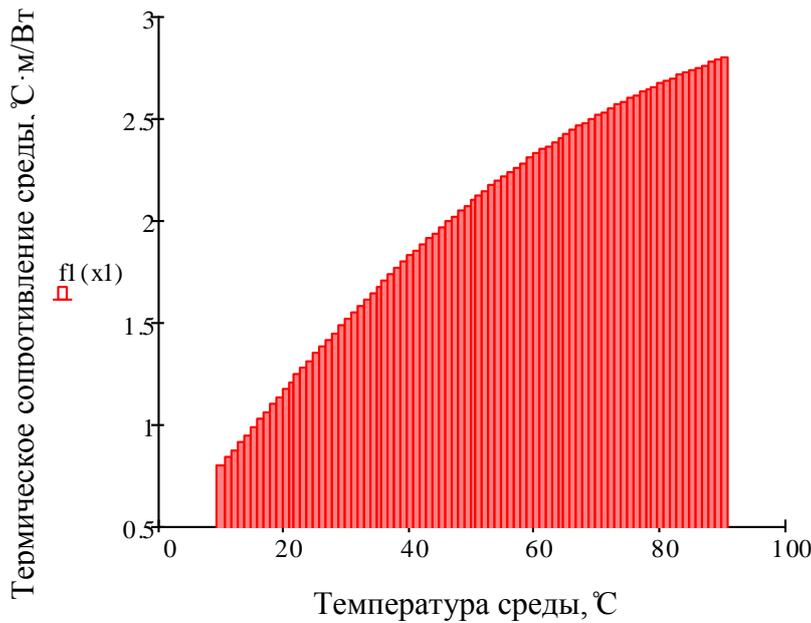


Рисунок 25 - Геометрическая интерпретация интегральной суммы для грунта

Аналогично составлена геометрическая интерпретация для термического сопротивления воздуха (Рисунок 26).

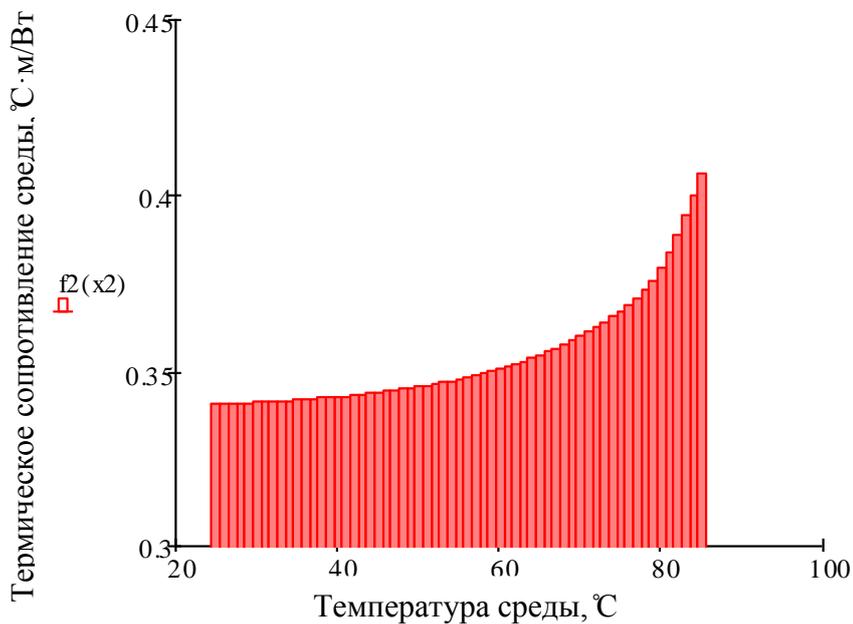


Рисунок 26 - Геометрическая интерпретация интегральной суммы для воздуха

В зависимости от толщины изоляции изменяется температура на поверхности кабеля, с учетом которой изменяется соответственно необходимый для расчета температурный интервал. Изменение данного интервала приводит к

смещению среднего значения удельного термического сопротивления окружающей среды. Интегральная сумма позволяет получить среднее значение удельного термического сопротивления среды, учитывающее изменение температурного интервала среды.

Усредненное термическое сопротивление необходимо рассчитывать для каждого конкретного случая отдельно.

С учетом вариации параметров окружающей среды определены средние значения удельного термического сопротивления грунта, термического сопротивления воздуха и термическое сопротивление блока через интегральные суммы.

Для определения значения удельного сопротивления грунта, в соответствии с формулой (4.19), для температурного интервала окружающей среды от 15 до 88 °С проведена интерполяция данных интегральной суммы (Рисунок 25).

$$\sigma_{уд} = \frac{1}{88-15} \cdot \int_{15}^{88} \sigma_i(t) = 2,049 \left[ \frac{^{\circ}\text{C} \cdot \text{м}}{\text{Вт}} \right]$$

Стандартное значение удельного термического сопротивления для грунта равно 1,2 °С·м/Вт, а фактическое значение, полученное с помощью данного метода, с учетом осушения грунта и изменения его удельного термического сопротивления, равно 2,049 °С·м/Вт.

В соответствии со схемой замещения (Рисунок 18) температура жилы с учетом изменения теплофизических свойств окружающей среды составит:

$$\begin{aligned} t_{ж} = & P_{ж} \cdot (S_{из} + S_{сл} + S_{об} + S_{ср}) + P_{из} \cdot (0,5S_{из} + S_{сл} + S_{об} + S_{ср}) + \\ & + P_{э} \cdot (S_{сл} + S_{об} + S_{ср}) = P_{ж} \cdot [S_{из} + (1 + Y_{об}) \cdot (S_{сл} + S_{об} + S_{ср})] + \\ & + P_{из} \cdot (0,5S_{из} + S_{сл} + S_{об} + S_{ср}) + t_{ср} \end{aligned} \quad (4.17)$$

С учетом полученного значения, определена температура жилы (по формуле 4.17):

$$t_{жс} = 57.398 \cdot \left[ 0.437 + (1 + 0,113) \cdot (8.955 \cdot 10^{-3} + 0.053 + \frac{\sigma l}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{4L}{Dк}) \right] +$$

$$+ 7.677 \cdot 10^{-4} \cdot (0,5 \cdot 0.437 + 8.955 \cdot 10^{-3} + 0.053 + \frac{\sigma l}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{4L}{Dк}) + 15 = 122.49^{\circ}C$$

где L – глубина прокладки кабеля, м, Dк – диаметр кабеля,  $\sigma l$  - пересчитанное значение удельного термического сопротивления грунта,  $^{\circ}C \cdot м/Вт$ .

На рисунке 27 приведено распределение теплового поля кабеля при прокладке в грунте с учетом вариации окружающей среды.

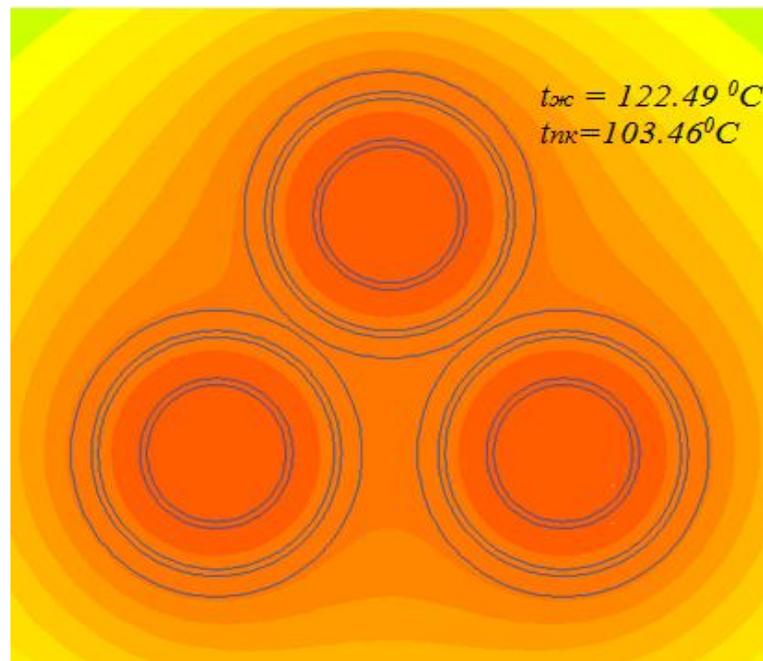


Рисунок 27 – Тепловое поле кабеля в зависимости от вариации параметров окружающей среды

Аналогичным образом проводится интерполяция термического сопротивления при прокладке в воздухе:

$$Sв = \frac{1}{88 - 25} \cdot \int_{25}^{88} \sigma 2(t) = 0,357 \left[ \frac{^{\circ}C \cdot м}{Вт} \right]$$

Для температурного интервала от 25 до 88  $^{\circ}C$  получено значение среднего термического сопротивления воздуха 0,357  $^{\circ}C \cdot м/Вт$  и определена температура жилы (по формуле 4.17):

$$t_{жс} = 73.48 \cdot \left[ 0.437 + (1 + 0,113) \cdot (8.955 \cdot 10^{-3} + 0.053 + Sв) \right] +$$

$$+ 7.677 \cdot 10^{-4} \cdot (0,5 \cdot 0.437 + 8.955 \cdot 10^{-3} + 0.053 + Sв) + 25 = 91.375^{\circ}C$$

При тепловом расчете кабеля в блоке термическое сопротивление определяется как сумма термических сопротивлений воздуха, железобетона и земли. По выше приведенным расчетам видно, что термическое сопротивление воздуха мало, поэтому оно исключено из расчетов ввиду малого влияния. Термическое сопротивление железобетона  $0,9 \text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ .

$$S_b = \frac{1}{75 - 25} \cdot \int_{25}^{75} \sigma^2(t) = 1.52 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}}{\text{Вт}} \right]$$

При использовании интегрированных значений термического сопротивления окружающей среды, с учетом вариации ее теплофизических свойств, получены температуры перегрева жилы и температуры оболочки, результаты представлены в таблице 8.

Таблица 8 – Локальные полевые значения температуры при различных способах прокладки (с учетом вариации теплофизических свойств среды)

Расположение кабелей	Значение температуры в зависимости от вариации теплофизических свойств среды, $^{\circ}\text{C}$			
	Без учета вариации		С учетом вариации	
	Жила	Оболочка	Жила	Оболочка
Грунт, треугольное	89,9	73,12	122,49	103,46
Блок, треугольное	88,6	73,49	102,24	86,19
Воздух, треугольное	89,9	76,8	91,37	77,19

В соответствии с проведенными расчетами, температура на поверхности кабеля для различных условий без учета вариаций теплофизических свойств среды находится в пределах от 73 до 76  $^{\circ}\text{C}$ .

Согласно современной литературе, увеличение температуры внешней среды на каждые 10  $^{\circ}\text{C}$  ускоряет протекающие процессы в полимерном материале в 2-4 раза, и срок службы кабельного изделия сокращается соответственно. В связи с прокладкой кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в земле, необходимо учитывать тот факт, что длительная

температура жилы значением  $+90^{\circ}\text{C}$  может высушить близлежащую почву и явиться, таким образом причиной перегрузки кабеля.

Для рассмотренного варианта, изменение параметров окружающей среды при прокладке в грунте приводит к возрастанию температуры на поверхности жилы свыше 35%, что составляет  $122,5^{\circ}\text{C}$ , соответственно, данный кабель работает при повышенных температурах. Оболочка же при данных условиях нагревается до температуры  $103,46^{\circ}\text{C}$ , что превышает ее максимально допустимую температуру, что приведет к ускоренному тепловому старению.

Учет изменения параметров окружающей среды необходим для случаев, когда теплообмен происходит за счет теплопроводности. По результатам (Таблица 8) видно, что наиболее критичное влияние оказывают вариации при прокладке в земле и блоке, и менее критично – в воздухе. Теплообмен с окружающим грунтом при треугольном расположении приводит к некоторому снижению тепловыделения в экранах, вследствие снижения индуктированных в них токов, и частично способствует росту температуры. Воздух обладает крайне низким коэффициентом теплопроводности, что затрудняет теплообмен.

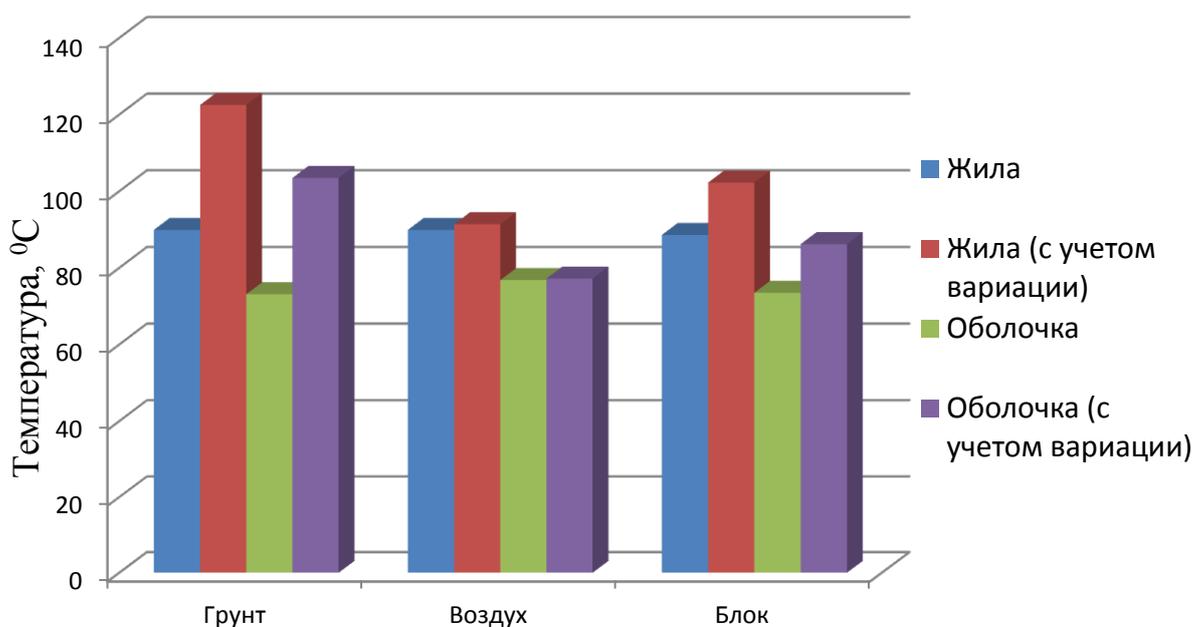


Рисунок 28 – Графическое отображение приращений температур с учетом и без учета вариации параметров окружающей среды

Следовательно, при повышенных температурах для «тонкостенных» кабелей необходимо рассматривать изменения параметров окружающей среды, так как, не учитывая эти параметры, равновесие температурного баланса смещается в сторону увеличения температуры токопроводящей жилы и изоляции, и соответственно температуры оболочки.

В совокупности это позволит адекватно оценивать максимально допустимый ток, при котором кабель будет работать в заявленный срок службы.

## 5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ4В	Айтжановой Асель Булатовне

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

### Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	<i>Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах; анкетирование; опрос, наблюдение</i>
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого и инновационного потенциала НТИ	<i>Проведение предпроектного анализ: оценка потенциальных потребителей, технология QuaD, морфологический подход.</i>
2. Разработка устава научно-технического проекта	<i>Определение целей, результатов и требований к результатам проекта</i>
3. Планирование процесса управления НТИ: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок	<i>Планирование этапов работы, определение календарного графика и трудоемкости разработки, расчет бюджета</i>
4. Определение ресурсной, финансовой, экономической эффективности	<i>Оценка сравнительной эффективности проекта</i>

### Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. «Портрет» потребителя результатов НТИ</li> <li>2. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>3. Оценочная карта QuaD</li> <li>4. Календарный план-график</li> <li>5. Бюджет НТИ</li> <li>6. Оценка сравнительной эффективности НТИ</li> <li>7. График проведения и бюджет НТИ</li> <li>8. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НТИ</li> </ol>	
--	--

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

### Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
доцент, каф. МЕН	Фигурко А.А.	к.э.н.		

### Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4В	Айтжанова А.Б.		

## **5.1 Введение**

Целью данного раздела работы является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Данная научно-исследовательская работа включает в себя численное исследование процессов теплообмена кабельной линии и окружающей среды при помощи программного комплекса. При выполнении численного исследования использовались программный комплекс Elcut версии 5.1.

Для достижения поставленных целей данного раздела поставлены следующие задачи [44]:

- разработка общей экономической идеи проекта;
- организация работ по научно-исследовательскому проекту;
- определение возможных альтернатив проведения научных исследований;
- планирование научно-исследовательских работ;
- оценки коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения;
- определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.

Первоначально производится организация и планирование работ, куда включается определение этапов работы и их трудоемкости.

## **5.2 Предпроектный анализ**

### **5.2.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Для оценки состояния кабельных линий в условиях эксплуатации применяются различные методы испытания и диагностики.

Для обеспечения надежной работы силовых кабельных сетей в настоящее время применяется система планово-профилактических испытаний, при которых кабели периодически подвергаются испытаниям высоким напряжением (в 4-6 раз, превышающим номинальные напряжения КЛ) с измерением тока утечки.

Испытания защитных пластмассовых оболочек кабелей 10-20 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена осуществляются периодически – через 2,5 года после включения в эксплуатацию и затем 1 раз в 5 лет (согласно УП-Б-1).

В данной диссертационной работе представлены результаты, способствующие предупредить нарушение оболочки кабельной линии, и, соответственно, увеличить срок службы кабельной линии. Поэтому потребителями данных рекомендации могут быть как эксплуатирующие и монтажные организации, так и заводы-изготовители.

### **5.2.2 Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

Для реализации проекта необходимо реализовать спектр задач, связанных с научными, техническими и экономическими проблемами. Детальный анализ конкурирующих разработок, существующих на рынке, необходимо проводить систематически, поскольку рынки пребывают в постоянном движении. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы успешнее противостоять своим соперникам.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Данный анализ проводится с помощью оценочной карты. Критерии для сравнения и оценки, приведены в Таблице 5.1, подбираются, исходя из

выбранных объектов сравнения с учетом их технических и экономических особенностей разработки, создания и эксплуатации.

При расчете токовой нагрузки кабельной системы с учетом конструкции кабеля и условий прокладки по ГОСТ Р МЭК 60287-2009 производится приближенный учет увеличения потерь, обусловленных эффектом близости и поверхностным эффектом. Другой эффект, который также рассчитывается в соответствии со стандартом приближенно, увеличение потерь от вихревых и циркуляционных токов в экранах и в броне. Стандарт МЭК 60287 опирается на методику с использованием электромагнитных и тепловых схем замещения, предложенную применительно к кабельной технике Дж. Нейером и М. Макграфом в середине 1950-ч, и позднее обобщенную Дж. Андерсом.

Альтернативным подходом является применение метода конечных элементов для расчета температурного поля кабельной линии. Особенностью метода является совместное решение нестационарных уравнений электромагнитного поля и теплопроводности, что позволяет учесть максимальное число факторов, ограничивающих нагрузочную способность кабелей без дополнительных упрощающих предположений.

Таблица 5.1 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>
Безопасность	0,15	5	4	5	0,75	0,6	0,75
Удобство в эксплуатации	0,15	5	5	4	0,75	0,75	0,6
Энергоэкономичность	0,10	4	4	4	0,4	0,4	0,4
Надежность	0,10	4	5	3	0,4	0,5	0,3
Снижение аварийности кабельной линии	0,20	5	5	4	1	1	0,8
Полнота учета теплофизических свойств	0,20	5	3	4	1	0,6	0,8
Предполагаемый срок службы	0,10	4	4	5	0,4	0,4	0,5
<b>Итого</b>	<b>1</b>				<b>4,7</b>	<b>4,25</b>	<b>4,15</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (5.1)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$B_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

### 5.2.3 Технология QuaD

Технология QuaD (Quality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект. По своему содержанию данный инструмент близок к методике оценки конкурентных технических решений.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины критерий таких групп как показатели оценки коммерческого потенциала разработки и показатели оценки качества разработки.

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD рекомендуется оценку проводить в табличной форме (Таблица 5.2).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.

Таблица 5.2 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических разработок

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)
1	2	3	4	5	6
Безопасность	0,15	100	100	1	0,15
Удобство в эксплуатации	0,15	90	100	0,9	0,135
Энергоэкономичность	0,10	89	100	0,89	0,089
Надежность	0,10	100	100	1	0,1
Снижение аварийности кабельной линии	0,20	100	100	1	0,2
Полнота учета теплофизических свойств	0,20	95	100	0,95	0,19
Предполагаемый срок службы	0,10	90	100	0,9	0,09
<b>Итого</b>	<b>1</b>				<b>0,954</b>

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$P_{cp} = \sum V_i \cdot B_i, \quad (5.2)$$

где  $P_{cp}$  – средневзвешенное значение показателя качества и перспективности научной разработки;  $V_i$  – вес показателя (в долях единицы);  $B_i$  – средневзвешенное значение  $i$ -го показателя.

Значение  $P_{cp}$  позволяет говорить о перспективах разработки и качестве проведенного исследования. В данном случае значение  $P_{cp}$  получилось равным 95,4, значит, такая разработка является перспективной.

Таким образом, рекомендации, приведенные в данной работе, являются эффективным инструментом совершенствования рабочего окружения.

### 5.3 Планирование управления научно-техническим проектом

Группа процессов планирования состоит из процессов, осуществляемых для определения общего содержания работ, уточнения целей и разработки последовательности действий, требуемых для достижения данных целей.

Для реализации проекта необходимо реализовать спектр задач, связанных с научными, техническими и экономическими проблемами. Основные решаемые в данном проекте задачи указаны в таблице 5.3.

На начальном этапе составляется полный перечень проводимых работ, и определяются их исполнители и оптимальная продолжительность. Результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Наиболее удобным, простым и наглядным способом для этих целей является использование линейного графика. Для его построения составим перечень работ и соответствие работ своим исполнителям, сведем в таблицу 5.3. Основные исполнители в проекте: инженер (И) и научный руководитель (НР).

Таблица 5.3 - Перечень работ и продолжительность их выполнения

Этап	Виды работ	Исполнители
Научно-теоретические исследования		
1	Формулирование задачи	НР. И.
2	Составление технического задания на проект	НР. И.
3	Подбор и изучение литературы	И.
4	Разработка календарного плана	И
5	Обсуждение литературы	И. НР.
6	Оформление пояснительной записки	И.
Работы расчетного характера, моделирование		
7	Разработка общего алгоритма программного комплекса	И
8	Реализация алгоритма в программном комплексе	И.
9	Анализ полученных результатов численного исследования	И.
10	Оформление расчетно-пояснительной записки	И.
11	Завершающий этап	И.

Для удобства построения линейного графика, длительность каждого из этапов работ из рабочих дней следует перевести в календарные дни. Для этого необходимо воспользоваться следующей формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{\text{кал}}, \quad (5.3)$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в календарных днях;

$T_{pi}$  – продолжительность выполнения  $i$ -й работы в рабочих днях;

$k_{\text{кал}}$  – коэффициент календарности.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - T_{\text{вых}} - T_{\text{пр}}}, \quad (5.4)$$

где  $T_{\text{кал}}$  – количество календарных дней в году;

$T_{\text{вых}}$  – количество выходных дней в году;

$T_{\text{пр}}$  – количество праздничных дней в году.

$$k_{\text{кал}} = \frac{365}{365 - 104 - 14} = 1,48 \quad (5.5)$$

Рассчитанные значения в календарных днях по каждой работе  $T_{ki}$  необходимо округлить до целого числа.

Все рассчитанные значения сведены в таблицу (табл. 5.4).

Таблица 5.4 - Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ, чел-часы						Исполнители	Длительность работ в рабочих часах		Длительность работ в календ-х днях	
	$t_{\min}$		$t_{\max}$		$t_{\text{ож}}i$			$T_{pi}$		$T_{ki}$	
	И	НР	И	НР	И	НР		И	НР	И	НР
Формулирование задачи	10	5	10	10	10	7	НР. И.	12	8,4	17,8	12,4
Составление технического задания на проект	15	15	15	15	15	15	НР. И.	18	18	26,6	26,6
Подбор и изучение литературы	20	—	30	—	24	—	И.	28,8	—	42,6	—
Разработка календарного плана	5	—	5	—	5	—	И	6	—	8,8	—
Обсуждение литературы	5	5	5	5	5	5	И. НР.	6	6	8,8	8,9
Оформление пояснительной записки	20	—	25	—	22	—	И.	26,4	—	39	—
Разработка общего алгоритма программного комплекса	60	—	75	—	66	—	И	79,2	—	117,2	—
Реализация алгоритма в программном комплексе	90	—	95	—	92	—	И.	110,4	—	163,4	—
Анализ полученных результатов численного исследования	40	—	47	—	42,8	—	И.	51,4	—	76	—
Оформление расчетно-пояснительной записки	50	—	55	—	52	—	И.	62,4	—	92,4	—
Завершающий этап	30	—	30	—	30	—	И.	36	—	53,3	—

На основе табл. 5.4 строится календарный план-график. График строится для максимального по длительности исполнения работ в рамках научно-исследовательского проекта, с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. Максимальным по длительности

исполнения работ является второй вариант. Календарный план-график выполнения работ по второму варианту представлен в таблице 5.5.

Таблица 5.5 - Календарный план-график проведения НИОКР по теме

		2015												2016												
		Окт	Ноя	Дек	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт
■	Формулирование задачи																									
■	Составление технического задания на проект																									
■	Подбор и изучение литературы																									
■	Разработка календарного плана																									
■	Обсуждение литературы																									
■	Оформление пояснительной записки																									
■	Разработка общего алгоритма программного комплекса																									
■	Реализация алгоритма в программном комплексе																									
■	Анализ полученных результатов численного исследования																									
■	Оформление расчетно-пояснительной записки																									
■	Завершающий этап																									

## 5.4 Бюджет научного исследования

Затраты на НИР подразделяются на капитальные (единовременные) и текущие. Капитальные затраты на НИР включают: стоимость лабораторного оборудования, приборов, стоимость зданий и сооружений, необходимых для проведения НИР. Состав текущих затрат: затраты на проведение испытаний экспериментальных образцов, затраты на проектирование и конструирование изделий, на разработку технологий и т.д. Определение затрат на конструирование и изготовление испытательной установки производим путем составления калькуляции плановой себестоимости.

Калькуляция плановой себестоимости проведения НИР производится путем составления следующих статей расходов:

1. Материальные затраты;
2. Спецоборудование и услуги сторонних организаций;

3. Амортизация основных фондов;
4. Расчет затрат на электроэнергию;
5. Прочие затраты.

К материальным затратам относятся затраты на сырье, основные и вспомогательные материалы, покупные полуфабрикаты, комплектующие изделия, необходимые для выполнения данного проекта. Затраты по данной статье определяются по действительным ценам с учетом расходов на их изготовление.

К затратам на спецоборудование и услуги сторонних организаций относят затраты на приобретение и изготовление сторонними организациями специального оборудования, стендов, аппаратов и других специальных приборов, необходимых для реализации данного проекта.

К прочим затратам относят выплаты, предусмотренные законодательством за работу во внерабочее время, отпускные выплаты и т.д.

К статье расходов на материалы относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ. Цена материальных ресурсов определяется по средней рыночной стоимости на 2016 год по соответствующим ценникам и приведена в таблице (5.6).

Таблица 5.6– Расходные материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Количество	Сумма, руб.
Офисная техника			
Компьютер	25999	1	25999
Клавиатура	490	1	490
Мышка	490	1	490
Принтер	4990	1	4990
Офисная мебель			
Стол	1899	1	1899
Стул	700	1	700
Итого:	34568		

Расходы на материалы составили  $C_{\text{мат}} = 34568$  руб.

Следующей статьёй расходов НИР для оценки является заработная плата исполнителей. Величина расходов по заработной плате определяется исходя из трудоемкости выполняемых работ и действующей системы окладов и тарифных ставок. В состав основной заработной платы включается премия, выплачиваемая ежемесячно из фонда заработной платы в размере 20 –30 % от тарифа или оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{зп} = Z_{осн} + Z_{доп}, \quad (5.6)$$

где  $Z_{осн}$  – основная заработная плата;

$Z_{доп}$  – дополнительная заработная плата (12-20 % от  $Z_{осн}$ ).

Среднедневная заработная плата руководителя составляет 1687,588 рублей, среднедневная заработная плата бакалавра составляет 834,4278 рублей.

Расчет затрат на основную заработную плату приведен в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Затраты на основную заработную плату

Исполнитель	Оклад, руб./мес.	Среднедневная ставка, руб./день	Затраты времени, дни	К	Фонд з/платы, руб.
НР	34595,56	1687,588	48	1,4	113405,9
И	17105,77	834,4278	646	1,4	754656,5
Итого:			868062,4		

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{доп} = k_{доп} \cdot Z_{осн} \quad (5.7)$$

где  $k_{доп}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,12 – 0,15).

Дополнительная заработная плата приведена в таблице 5.8.

Величина отчислений во внебюджетные фонды определяется исходя из следующей формулы:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (5.8)$$

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд обязательного медицинского страхования и пр.).

На 2016 г. в соответствии с Федеральным законом от 26.11.2015 №1265-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 22%.

Отчисления во внебюджетные фонды рекомендуется представлять в табличной форме (табл. 5.8).

Таблица 5.8 - Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Основная заработная плата, руб.	Дополнительная заработная плата, руб.
Руководитель	113405,9	13608,71
Бакалавр	754656,5	90558,78
Коэффициент отчислений во внебюджетные фонды	22%	
Итого: 213890,6		

Перейдем к расчету затрат на электроэнергию. Данный вид расходов включает в себя затраты на электроэнергию при работе оборудования а также затраты на электроэнергию, потраченную на освещение. Затраты на электроэнергию при работе оборудования для технологических целей рассчитываются по формуле:

$$\mathcal{E}_{\text{об}} = P_{\text{об}} \cdot C_{\mathcal{E}} \cdot t_{\text{об}} \quad (5.9)$$

где  $\mathcal{E}_{\text{об}}$  – затраты на электроэнергию, потребляемую оборудованием, руб.;

$P_{\text{об}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\mathcal{E}}$  – тарифная цена за 1 кВт·час;

$t_{\text{об}}$  – время работы оборудования, час.

Время работы оборудования определяется из расчета, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{об}} = P_{\text{уст.об}} \cdot K_C \quad (5.10)$$

где  $P_{уст.об}$  – установленная мощность оборудования, кВт;

$K_C$  – коэффициент спроса, зависящий от количества, загрузки групп электроприемников. Для технологического оборудования  $K_C = 1$ .

Затраты на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 - Затраты на электроэнергию для технологических целей

Наименование оборудования	Количество рабочих дней	Время работы оборудования $t_{об}$ , час	Потребляемая мощность $P_{об}$ , кВт	Затраты $\mathcal{E}_{об}$ , руб.
Персональный компьютер	646	5168	0,18	912,384
Итого				912,384

Затраты на электроэнергию для освещения помещения, где осуществлялось выполнение проекта  $\mathcal{E}_{ос}$ , рассчитываются по формуле

$$\mathcal{E}_{ос} = P_{ос} \cdot C_{э} \cdot t_{ос} \quad (5.11)$$

где  $P_{ос}$  – мощность, потребляемая осветительными приборами, кВт;

$t_{ос}$  – время работы осветительных приборов, час.

Мощность, потребляемая освещением  $P_{ос}$ , определяется по формуле:

$$P_{ос} = P_{уст.ос} \cdot K_C \quad (5.12)$$

где  $P_{уст.ос}$  – установленная мощность осветительных приборов, принимаем равной 1,28 кВт;

$K_C$  - коэффициент спроса для внутреннего освещения, принимаем равным 0,9.

$$P_{ос} = 1,28 \cdot 0,9 = 1,15 \text{ кВт}$$

Время работы освещения  $t_{ос}$  час, определяется по формуле

$$t_{ос} = t_{сут} \cdot T \quad (5.13)$$

где  $t_{сут}$  – длительность работы освещения за смену, час;

$T$  – время, затраченное на проведение работ.

$$t_{ос} = 5 \cdot 646 = 3230 \text{ час}$$

$$\mathcal{E}_{ос} = 1,15 \cdot 1,8 \cdot 3230 = 6686,1 \text{ руб}$$

Общие затраты на электроэнергию  $\mathcal{E}$ , руб, определяются по формуле

$$\mathcal{E} = \mathcal{E}_{об} + \mathcal{E}_{ос} \quad (5.14)$$

$$\mathcal{E} = 912,386 + 6686,1 = 7598,484 \text{ руб}$$

Следующим этапом расчёта затрат является расчет амортизационных расходов

В статье «Амортизационные отчисления» от используемого оборудования рассчитывается амортизация за время выполнения работы для оборудования, которое имеется в наличии.

Амортизационные отчисления рассчитываются на время использования оборудования по формуле:

$$C_A = \frac{H_A \cdot C_{об} \cdot t_{BT}}{F_D} \quad (5.15)$$

где  $H_A$  – годовая норма амортизации,  $H_A = 5\%$ ;

$C_{об}$  – цена оборудования;

$F_D$  – действительный годовой фонд рабочего времени;

$t_{BT}$  – время работы вычислительной техники при создании программного продукта.

Итак, затраты на амортизационные отчисления для оборудования составляют:

$$C_{А1} = \frac{0,1 \cdot 34568 \cdot 5168}{2816} = 6344 \text{ руб} \quad (5.16)$$

Для оценки не учтённых в предыдущих статьях расходов рассчитаем прочие расходы.

В статье «Прочие расходы» отражены расходы на разработку проекта, которые не учтены в предыдущих статьях. Прочие расходы составляют 16 % от единовременных затрат на выполнение технического продукта и проводятся по формуле:

$$C_{ПРОЧ} = (C_{МАТ} + C_{ОСН} + C_{СОЦ} + \mathcal{E} + C_{АМ}) \cdot 0,16 \quad (5.17)$$

$$C_{ПРОЧ} = (25000 + 5139,104 + 5635,36) \cdot 0,16 = 5723,91 \text{ руб.}$$

Определим общую себестоимость НИР путем сведения рассчитанных статей расчета в смету (таблица 5.10).

Таблица 5.10 – Смета затрат на НИР

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма, руб.
Материалы и покупные изделия	$C_{МАТ}$	34568
Фонд оплаты труда	$C_{ОСН}$	868062,4
Отчисления из ФОТ	$C_{СОЦ}$	213890,6
Расходы на электроэнергию	Э	7598,484
Амортизационные отчисления	$C_{АМ}$	6344
Прочие расходы	$C_{ПРОЧ}$	180874,2
Итого:		1312018

Таким образом, расходы на производство составили  $C = 1311338$  руб.

### 5.5 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования (см. табл. 5.10). Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (5.18)$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки (Таблица 5.11) отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в разгах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в разгах (значение меньше единицы, но больше нуля).

Таблица 5.11 – Значения интегрального финансового показателя трех вариантов исполнения разработки.

Исполнение	$I_{\text{финр}}^{\text{исп}i}$
Исполнение 1	0,74
Исполнение 2	1
Исполнение 3	0,91

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i, \quad (5.19)$$

где  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности для  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$a_i$  – весовой коэффициент  $i$ -го варианта исполнения разработки;

$b_i^a, b_i^p$  – бальная оценка  $i$ -го варианта исполнения разработки, устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания;

$n$  – число параметров сравнения.

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности рекомендуется проводить в форме таблицы (Таблица 5.12).

Таблица 5.12 - Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Исп.1	Исп.2	Исп.3
Безопасность	0,15	3	4	5
Удобство в эксплуатации	0,15	5	4	5
Энергоэкономичность	0,10	5	5	4
Надежность	0,10	4	4	4
Снижение аварийности кабельной линии	0,20	4	5	3
Полнота учета теплофизических свойств	0,20	5	5	4
Предполагаемый срок службы	0,10	5	3	4
ИТОГО	1	4,4	4,4	4,1

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки ( $I_{исп.i}$ ) определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{финр}^{исп.1}}, \quad I_{исп.2} = \frac{I_{p-исп2}}{I_{финр}^{исп.2}} \text{ и т.д.} \quad (5.20)$$

Таблица 5.13 - Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки

Исполнение	$I_{pi}$	$I_{финр}^{исп.i}$	$I_{исп.i}$
$I_{исп.1}$	4,4	0,74	5,9
$I_{исп.2}$	4,4	1	4,4
$I_{исп.3}$	4,1	0,91	4,5

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки (Таблица 5.13) позволит определить сравнительную эффективность проекта (см. Таблица 5.14) и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{cp}$ ):

$$\mathcal{E}_{cp} = \frac{I_{исп.1}}{I_{исп.2}} \quad (5.21)$$

Таблица 5.14 - Сравнительная эффективность разработки

№	Показатели	Исп.1		Исп.2		Исп.3	
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,74		1		0,91	
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,5		4,4		4,1	
3	Интегральный показатель эффективности	5,9		4,4		4,5	
4	Сумма строк 1-3	11,14		9,8		9,51	
5	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	Исп.2	Исп.3	Испл.1	Испл.3	Испл.1	Испл.2
		1,14	1,71	0,88	0,03	0,85	0,97

Сравнение значений интегральных показателей эффективности позволяет понять и выбрать более эффективный вариант решения поставленной в работе технической задачи с позиции финансовой и ресурсной эффективности.

## 5.6 Заключение

В данном разделе работы определены этапы и трудоемкость работ, составлены план-график и смета затрат, оценена финансовая эффективность проекта.

Данный проект является экономически эффективным, так как при рассчитанных затратах позволяет спрогнозировать аварийные ситуации при эксплуатации кабельной линии и тем самым предотвратить потери объемом равным стоимости замены линии и ущерба окружающей среде.

## 6 Социальная ответственность

Студенту:

Группа	ФИО
5ГМ4В	Айтжановой Асель Булатовне

Институт	ЭНИН	Кафедра	ЭКМ
Уровень образования	магистратура	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования и области его применения	Рабочее место – учебная аудитория, оснащенная компьютерным оборудованием для проведения моделирования и расчетов результатов работы.
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
<b>1. Производственная безопасность</b> 1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	Выявленные вредные факторы производственной среды: повышенный уровень электромагнитных излучений, повышенную напряженность электрического и магнитного полей, источники шума, отсутствие естественного освещения, отклонение показателей микроклимата.
1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения	Выявленные опасные факторы производственной среды данного рабочего места включают в себя: поражение электрическим током, повышенный уровень статического электричества.
<b>2. Экологическая безопасность:</b>	Воздействие на литосферу в результате образования отходов при поломке ПЭВМ.
<b>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможная чрезвычайная ситуация - возникновение пожара.
<b>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b>	Специфика труда оператора заключается в больших зрительных нагрузках в сочетании с малой двигательной активностью, монотонностью выполняемых операций, вынужденной рабочей позой.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
старший преподаватель, каф. ЭБЖ	Романцов И.И.	к.т.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4В	Айтжанова А.Б.		

## 6.1 Введение

Данная научно-исследовательская работа включает в себя численное исследование процессов теплообмена кабельной линии и окружающей среды при помощи программного комплекса. Объектом исследования в данной работе является силовой кабель на низкое и среднее напряжение. При выполнении численного исследования использовались программный комплекс Elcut версии 5.1.

Рабочее место – учебная аудитория, оснащенная компьютерным оборудованием для проведения моделирования и расчетов результатов работы. В данном разделе рассмотрены вопросы, связанные с охраной труда и техникой безопасности людей работающих в компьютерной лаборатории.

Выявленные вредные факторы производственной среды данного рабочего места включают в себя: повышенный уровень электромагнитных излучений, повышенную напряженность электрического и магнитного полей, источники шума, отсутствие естественного освещения, отклонение показателей микроклимата.

Выявленные опасные факторы производственной среды данного рабочего места включают в себя: поражение электрическим током, повышенный уровень статического электричества.

Также присутствует возможность возникновения на данном рабочем месте негативного воздействия на окружающую природную среду, а именно воздействие на литосферу в результате образования отходов при поломке ПЭВМ.

Возможной чрезвычайной ситуацией является возникновение пожара.

## **6.2 Профессиональная социальная безопасность**

### **6.2.1 Анализ вредных и опасных факторов, которые может создать объект исследования**

Объектом исследования в данной работе является силовой кабель на низкое и среднее напряжение.

При работах на линейных сооружениях кабельных линий возможны воздействия следующих опасных и вредных производственных факторов [45]:

- движущиеся машины и механизмы;
- повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны;
- повышенный уровень локальной вибрации;
- повышенное значение напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека;
- острые кромки, заусенцы и шероховатость на поверхностях заготовок, инструментов и оборудования;
- появление в зоне работы взрывоопасных, пожароопасных и ядовитых сред;
- недостаточная освещенность рабочих мест;
- вредные вещества (свинец и его неорганические соединения, оксид углерода, полиэтилен, ацетон);
- физические перегрузки;
- эмоциональные перегрузки.

Движущиеся части машин должны быть ограждены. В нерабочее время все машины и механизмы должны находиться в положении, исключающем возможность их пуска посторонними лицами. Работники обязаны знать и выполнять требования инструкции по эксплуатации машин.

Контроль уровней вибрации, параметров микроклимата, концентрации вредных веществ должен осуществляться производственными и санитарными лабораториями.

Содержание вредных веществ в воздухе рабочей зоны не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК), установленных государственным стандартом. Для каждого производственного участка должны быть определены вредные вещества, которые могут выделяться в воздух рабочей зоны. При обнаружении взрывоопасных материалов работы в этих местах следует немедленно прекратить до получения разрешения от соответствующих органов [45].

Распределительные устройства сетей энергоснабжения, такие как силовые трансформаторы, кабели являются источниками электромагнитного поля промышленной частоты [46, 47]. Исследования биологического воздействия электрического поля обнаружили неблагоприятное влияние на нервную систему человека, что ведет к нарушениям эндокринного аппарата и обмена веществ в организме, нарушает физиологические функции: ритм сердечных сокращений, уровень кровяного давления.

Допустимые значения напряженности электрического поля для рабочих мест указаны в СанПиН 2.2.4.1191-03 «Электромагнитные поля в производственных условиях». Предельно допустимый уровень напряженности электрического поля 50 Гц на рабочем месте в течение всей смены устанавливается равным 5 кВ/м.

Материалы, машины, механизмы и другое производственное оборудование, технологические процессы, материалы и химические вещества, средства индивидуальной и коллективной защиты работников, в том числе иностранного производства, используемые при работах на линейных сооружениях КЛП, должны соответствовать требованиям охраны труда, установленным в Российской Федерации, а вновь приобретаемые должны иметь сертификат соответствия.

Во время регламентированных перерывов с целью снижения или устранения нервно-психического, зрительного и мышечного напряжения необходимо выполнять комплексы упражнений.

В случае проведения работ по устранению аварии при температуре наружного воздуха ниже установленной нормы, руководителем работ должны быть установлены перерывы для обогрева работающих (перерывы засчитываются в рабочее время) или организовано чередование смен. При температуре наружного воздуха ниже нормы запрещается проводить работы на линейных сооружениях кабельных линий, исключение допускается для работ по ликвидации аварий. В этом случае через определенные промежутки времени должны быть установлены перерывы для обогрева работающих (перерывы засчитываются в рабочее время), или организовано чередование смен.

Работники, выполняющие работы на линейных сооружениях кабельных линий передачи, должны быть обеспечены специальной одеждой, специальной обувью и другими средствами индивидуальной защиты в соответствии с действующими типовыми отраслевыми нормами бесплатной выдачи специальной одежды, специальной обуви и других средств индивидуальной защиты работникам связи.

### **6.2.2 Анализ вредных и опасных факторов, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований**

Выявленные вредные факторы производственной среды данного рабочего места включают в себя: отсутствие естественного освещения, отклонение показателей микроклимата, источники шума. Рассмотрим каждый из вышеуказанных факторов поподробнее.

Для обеспечения достаточной освещённости необходимо использовать совмещённое освещение, при котором естественное дополняется искусственным. В соответствии с задачами зрительной работы помещение относится к 1 группе, т. е. помещения, в которых производится различение объектов зрительной работы при фиксированном направлении линии зрения. Нормированное значение освещённости рабочей поверхности для данной группы составляет 300 лк – согласно СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278 – 03.

«Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий» [48].

Микроклимат помещений для лёгкой категории работ включает определённую температуру и влажность. Нормы метеорологических условий учитывают время года и характер производственного помещения. В таблице 6.1. приведены требования к микроклимату для категорий работ по тяжести Ia в соответствии с ГОСТ 12.1.005-88 [49] и СанПиН 2.2.4.548 – 96 «Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений» [50].

Таблица 6.1 - Требования к микроклимату

Период Года	Температура, °С		Относительная влажность, %		Скорость движения воздуха, м/с
	Оптимальная	Допустимая	Оптимальная	Допустимая	
Холодный	20-22	18-23	30-60	15-75	<0,2
Теплый	22-25	Не выше 25	30-60	15-75	0,2-0,5

Требуемое состояние микроклимата рабочей зоны может быть обеспечено при использовании: защиты от источников тепловых излучений для снижения температуры воздуха в помещении и теплового облучения работающих; устройство вентиляции и отопления; применение средств индивидуальной защиты.

В лаборатории, где проводились исследования показатель теплового излучения ниже нормы -  $350 \text{ Вт/м}^2$ . Поэтому средства индивидуальной защиты не требуются.

Для обеспечения требуемого микроклимата воздушной среды в лаборатории рекомендуется применять искусственную вентиляцию в сочетании с естественной. Минимальный расход воздуха определяется из расчета 50 - 60 м<sup>3</sup>/ч на одного человека [49].

По характеру спектра в помещении присутствуют широкополосные шумы. Источник шумов – электродвигатели в системе охлаждения и центральная система вентиляции ЭВМ. Допустимый уровень шумов для помещений компьютерных залов 50 дБ определяется СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96

«Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки» [51] по шкале А шумомера – согласно ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ «Шум. Общие требования безопасности» [52].

Защитой от шумов является заключение вентиляторов в защитный кожух и установка внутрь корпуса ЭВМ.

Выявленные опасные факторы производственной среды данного рабочего места включают в себя: повышенный уровень электромагнитных излучений, повышенную напряженность электрического и магнитного полей.

Электромагнитные излучения полей радиочастот на данном рабочем месте исходят от монитора компьютера. Электромагнитные излучения оказывают на организм человека тепловое действие, а именно интегральное повышение температуры тела человека или отдельных частей его тела при общем или местном облучении, а также не тепловой эффект, который связан с переходом электромагнитной энергии, исходящей от монитора компьютера, в нетепловую форму энергии.

При длительном воздействии электромагнитных полей на человека у него могут возникнуть расстройства центральной нервной системы, сдвиги эндокринно-обменных процессов, а также изменения состава крови. Облучение глаз электромагнитным излучением может привести к помутнению хрусталика, а в дальнейшем к катаракте.

Нормирование электромагнитных излучений полей радиочастот проводится по ГОСТ 12.1.006–84 [53] и СанПиН 2.2.4/2.1.8.989–00 [54].

Электромагнитные поля радиочастотного диапазона от 60 кГц до 300 МГц оцениваются предельно допустимой напряженностью электрического и магнитного полей и предельно допустимой энергетической нагрузкой за рабочий день. Максимальные энергетические нагрузки электрического и магнитного полей равны соответственно  $20000 \text{ В}^2\text{ч/м}^2$  и  $200 \text{ А}^2\text{ч/м}^2$ . Максимальные значения напряженности электрического поля составляют 500 В/м, а магнитного поля 50 А/м.

К методам защиты персонала от электромагнитных излучений, исходящих от монитора компьютера, относятся:

- выбор рациональных режимов работы компьютера;
- ограничение времени нахождения работающих в электромагнитных полях, исходящих от монитора компьютера;
- защита расстоянием, что подразумевает максимально возможное удаление рабочего места от источника электромагнитных излучений;
- рациональное размещение в рабочем помещении ПЭВМ;
- использование приэкранных защитных фильтров для мониторов ПЭВМ;
- применение нейтрализаторов электромагнитных полей радиочастот;
- применение средств индивидуальной защиты, таких как очки защитные со спектральными фильтрами ЛС (линзы спектральные) и НСФ (набор спектральных фильтров).

Выявленные опасные факторы производственной среды данного рабочего места включают в себя: поражение электрическим током, повышенный уровень статического электричества. Рассмотрим каждый из вышеуказанных факторов поподробнее.

Источниками электрической опасности на данном рабочем месте являются электрические сети, вычислительная и организационная техника. Электрический ток оказывает на организм человека:

- термическое действие (нагрев кожи и тканей вплоть до ожогов);
- электролитическое (разложение и изменение состава и свойств жидкостей, например, крови);
- биологическое (нарушение биологических процессов в организме, раздражение и возбуждение тканей, судорожное сокращение мышц);
- механическое действие (разрыв тканей).

Электробезопасность и допустимые нормы регламентируются Правилами устройства электроустановок (ПУЭ), ПОТ Р М–016–2001, РД 153–34.0–03.150–00 [55], а также ГОСТ Р 12.1.019-2009 [56].

Допустимый ток частотой 50 Гц при длительности воздействия более 10 секунд составляет 2 мА, а при длительности 10 секунд и менее – 6 мА. Для переменного тока эта величина соответственно равна 10 и 15 мА.

Методы защиты от опасности поражения электрическим током:

- электрическая изоляция токоведущих частей (сопротивление изоляции должно быть не менее 0,5 МОм);
- ограждение токоведущих частей, которые работают под напряжением;
- использование малых напряжений, например, не более 50 В;
- электрическое разделение сетей на отдельные короткие участки;
- защитное заземление и зануление;
- использование плакатов и знаков безопасности, изолирующих подставок, указателей напряжения.

На данном рабочем месте в качестве источников статического электричества выступают компьютеры, оргтехника и другие электроприборы. Они являются распространителями заряда и создают электростатические поля.

Статическое электричество:

- раздражает нервные окончания кожи человека, поэтому в тканях организма происходит изменение ионного состава;
- при постоянном воздействии вызывает повышенную утомляемость, раздражительность, плохой сон;
- изменяет кожную чувствительность и сосудистый тонус;
- вызывает спазм сосудов и функциональные нарушения в центральной нервной системе.

Методы защиты от воздействия статического электричества:

- влажная уборка, чтобы уменьшить количество пылинок в воздухе и на предметах офиса;
- использование увлажнителей воздуха;
- регулярное проветривание;
- защитное заземление;
- применение средств индивидуальной защиты, таких как антистатические спреи и браслеты.

### **6.3 Экологическая безопасность**

На данном рабочем месте выявлен предполагаемый источник загрязнения окружающей среды, а именно воздействие на литосферу в результате образования отходов при поломке ПЭВМ.

Вышедшие из строя компьютеры и сопутствующая оргтехника относятся к IV классу опасности – вещества малоопасные, поэтому подлежат специальной утилизации. Степень вредного воздействия таких отходов – низкая.

Используя рациональный подход к вопросу по утилизации, почти 95% отходов оргтехники, сможет вернуться обратно в строй в каком-либо виде после переработки. А оставшиеся 5% будут отправлены на заводы и свалки. Это позволит достигнуть максимального КПД и минимального загрязнения окружающей среды.

Первый этап утилизации осуществляется вручную. После удаления опасных веществ, убираются все крупные пластиковые элементы. Затем сортируют и измельчают, чтобы иметь возможность в будущем повторно использовать. Все остывшие элементы после разборки (за исключением крупного пластика и ядовитых веществ) отправляют в измельчитель. Оставшийся цикл переработки взят из горнодобывающих технологий. Из переработанных в пыль элементов извлекают все железные частицы с помощью

магнитов. После чего приступают к выделению и сортировке цветных металлов.

Таким образом, компьютеры и сопутствующая оргтехника могут быть использованы вторично, но уже в виде другой оргтехники.

## **6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

### **6.4.1 Анализ вероятных ЧС, которые может инициировать объект исследований**

Ежегодно в России от электротехнических изделий происходит около 50 тыс. пожаров, что составляет 20...25 % от общего их числа в стране [57].

Традиционно наиболее пожароопасными из года в год (более 60 % от общего числа пожаров от электроустановок) являются кабельные изделия [58], для которых характерно неблагоприятное сочетание наличия горючих материалов с возникновением в аварийных режимах эксплуатации источников зажигания: электрических искр; дуг; контактных соединений и токоведущих жил, нагретых до температур, превышающих допустимые. Пожарная опасность перегрева токоведущих жил заключается в воспламенении изоляции, а также горючих материалов, находящихся в непосредственном контакте с электрическим кабелем.

В основе аварии может лежать человеческий фактор. Пожар может возникнуть вследствие нарушения правил безопасности. Следовательно, для обеспечения пожарной безопасности необходимо своевременно проводить обслуживающие, ремонтные и профилактические работы. Также, в обязательном порядке проводить среди персонала инструктажи по пожаробезопасности и учебные эвакуации. Работники должны допускаться к работе только после проведения противопожарного инструктажа [59]. Нужно предоставить и регламентировать специальные места для курения, и довести до

персонала информацию о расположении данных мест и о строгости выполнения мероприятия.

Также к мерам пожарной профилактики можно отнести:

- обязательное наличие на рабочих местах схем движения эвакуируемых из зон чрезвычайной ситуации;
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

Необходимо содержать в исправном состоянии пожарные извещатели, двери эвакуационных выходов также должны быть в исправном состоянии и быть свободно открываемыми. Необходимо следить за состоянием средств пожаротушения.

В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар самостоятельно, необходимо следовать строго установленному порядку действий при пожаре. Необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь разработанным и вывешенным планом эвакуации. По возможности принять меры по эвакуации людей и тушению пожара.

#### **6.4.2 Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть на рабочем месте при проведении исследований**

Возможная чрезвычайная ситуация в учебной аудитории - возникновение пожара. Рабочее место по пожарной опасности относится к категории «В4». Это помещения, в которых находятся малые количества твердых горючих веществ и материалов в холодном состоянии.

Возникновение пожара на рабочем месте может быть обусловлено возгоранием неисправных ПЭВМ. В современных ЭВМ очень высока плотность размещения электронных схем. В непосредственной близости друг от друга располагаются соединительные провода, коммуникационные кабели.

При протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество теплоты, что может привести к повышению температуры отдельных узлов до 80 – 100°С. При этом возможно оплавления изоляции соединительных проводов, их оголение и, как следствие, короткое замыкание, сопровождаемое искрением, которое ведет к недопустимой перегрузки элементов электронных схем. Они, перегреваясь, сгорают, разбрызгивая искры.

Согласно нормам первичных средств пожаротушения ППБ 101 – 89 [47]с учётом наличия электроустановок напряжением до 1000 В, на 100 м<sup>2</sup> должны быть: один углекислотный огнетушитель типа ОУ – 2, ОУ – 5 или ОУ – 8.

Для целей обеспечения пожарной безопасности при эксплуатации ПЭВМ необходимо своевременно проводить обслуживающие, ремонтные и профилактические работы.

К мерам пожарной профилактики относятся:

- повышение огнестойкости здания;
- использование исключительно исправного оборудования;
- проведение периодических инструктажей по пожарной безопасности;
- отключение электрооборудования, освещения и электропитания по окончании работ;
- курение в строго отведенном месте;
- содержание путей и проходов для эвакуации людей в свободном состоянии.

На видном месте в коридорах вывешены инструкции, обязанности сотрудников и план эвакуации в случае пожара. В случаях, когда не удастся ликвидировать пожар самостоятельно, необходимо вызвать пожарную охрану и покинуть помещение, руководствуясь разработанным и вывешенным планом эвакуации.

## **6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

### **6.5.1 Специальные (характерные для проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства**

Специфика труда оператора заключается в больших зрительных нагрузках в сочетании с малой двигательной активностью, монотонностью выполняемых операций, вынужденной рабочей позой. Эти факторы отрицательно влияют на самочувствие работающего. Зрительные нагрузки связаны с воздействием на зрение дисплея.

В СанПиН 2.2.2.542 – 96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно – вычислительным машинам и организации работы» [60] даются общие требования к организации и оборудованию рабочих мест операторов ПЭВМ.

В зависимости от категории трудовой деятельности и уровня нагрузки при работе с ПЭВМ устанавливается суммарное время регламентированных перерывов. Суммарное время регламентированных перерывов на данном рабочем месте составляет 50 минут за один рабочий день.

Во время регламентированных перерывов с целью снижения нервно-эмоционального напряжения, утомления зрительного анализатора, устранения влияния гиподинамии, предотвращения развития утомления целесообразно выполнять комплексы упражнений (физкультминутки, физкультурные паузы).

Для предупреждения развития переутомления обязательными мероприятиями являются:

- проведение упражнений для глаз через каждые 20 – 25 мин работы за ПЭВМ;
- устройство перерывов каждый час, длительностью около 7 мин;
- проведение во время перерывов сквозного проветривания помещений с ПЭВМ с обязательным выходом из него сотрудников;

- осуществление во время перерывов упражнений физкультурной паузы в течение 3 – 4 мин;
- проведение упражнений физкультминутки в течение 1 – 2 мин для снятия локального утомления, которые выполняются индивидуально при появлении начальных признаков усталости;
- замена комплексов упражнений один раз в 2 – 3 недели.

Лица, работающие с ПЭВМ более 50% рабочего времени (профессионально связанные с эксплуатацией ПЭВМ), должны проходить обязательные предварительные при поступлении на работу и периодические медицинские осмотры в установленном порядке. [61]

### **6.5.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны**

Рабочее место должно обеспечивать возможность удобного выполнения работ, учитывать размеры рабочей зоны, а также необходимость передвижения в ней работающего.

Невыполнение требований к расположению и компоновке рабочего места может привести к получению работником производственной травмы или развития у него профессионального заболевания. Рабочее место при выполнении работ в положении сидя должно соответствовать требованиям ГОСТ 12.2.032-78 [62].

Конструкция оборудования и рабочего места при выполнении работ в положении сидя должна обеспечивать оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием высоты рабочей поверхности, высоты сидения, оборудованием пространства для размещения ног и высотой подставки для ног.

В соответствии с СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 [61], который предписывает общие требования к организации и оборудованию рабочих мест с ПЭВМ, при работе инженера за столом, конструкция стола и стула должна обеспечивать

оптимальное положение тела работающего. Оптимальные параметры рабочего места при работе с ПЭВМ представлены в таблице 6.2:

Таблица 6.2 – Оптимальные параметры рабочего места при работе с ПЭВМ

Параметры	Значение параметра	Реальные значения
Высота рабочей поверхности стола	От 600 до 800 мм	700
Высота от стола до клавиатуры	Около 20 мм	20
Высота клавиатуры	600-700, мм	600
Удаленность клавиатуры от края стола	Не менее 80 мм	100
Удаленность экрана монитора от глаз	500-700, мм	500
Высота сидения	400-500, мм	500
Угол наклона монитора	0-30, град.	20
Наклон подставки ног	0-20, град.	0

Конструкция рабочего кресла поддерживает рациональную рабочую позу, а также позволяет изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины, что позволяет предупредить утомление.

Не рекомендуется располагать компьютеры рядом друг с другом в целях уменьшения действия переменного электрического поля.

## **Заключение**

Данная научно-исследовательская работа включает в себя численное исследование процессов теплообмена кабельной линии и окружающей среды при помощи программного комплекса.

Для написания выпускной квалификационной работы был проведен анализ научной литературы. На основе изученных материалов рассмотрены конструкция силового кабеля и свойства используемых материалов, а также основные проблемы эксплуатации кабельных линий на среднее напряжение. Проведено моделирование тепловых полей в кабелях с изоляцией из сшитого полиэтилена с учетом влияния теплофизических свойств окружающей среды.

В работе применен метод конечных элементов для расчета температурного режима кабельной линии. Метод позволяет учесть тепловое взаимное влияние кабелей друг на друга, а также особенности прокладки. С помощью программной среды Elcut можно смоделировать кабель при определенных условиях прокладки и определить их температуру при различной нагрузке.

При проектировании силовых кабельных линий необходимо учитывать изменения окружающей среды, так как она значительно влияет на надежность кабельного изделия

Результаты математического моделирования стационарного теплового поля с использованием Elcut и физического эксперимента достаточно близки. Отличие между ними не превышает 4%, что свидетельствует о высокой эффективности системы моделирования тепловых полей, реализованных в программном продукте. Поэтому Elcut нужно использовать, так как он позволяет достаточно адекватно оценить ситуацию.

Предлагается практический подход для более точного определения термического сопротивления окружающей среды, которое впоследствии влияет на надежность кабеля в целом и на его ресурс.

## Список использованных источников

1. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена: устройство, конструкции, преимущества, области применения // [Электронный источник] Ссылка: <http://electricalschool.info/main/kabel/1286-kabeli-s-izoljaciejj-iz-sshitogo.html/>
2. Кабели среднего напряжения: сшитый полиэтилен или бумага / А. Саитгалеев // Кабель news. -2013. - №4.
3. Интернет-портал «Справочник электротехники» // [Электронный источник] Ссылка: <http://electricalschool.info>
4. Техника высоких напряжений, Важов В.Ф., Кузнецов Ю.И., Куртенков Г.Е., Лавринович В.А., Лопатин В.В., Мытников А.В. – Томск: Изд-во ТПУ, 2008. – 232 с.
5. Силовые кабели на напряжение 10-500 кВ: история развития и перспективы/ Г.И. Мещанов, Ю.В. Образцов, И.Б. Пешков, М.Ю. Шувалов // Наука и техника. – 2006. - №3.
6. Пластикаты ПВХ // Аналитический портал химической промышленности [Электронный источник] Ссылка: <http://newchemistry.ru/material.php?id=22>
7. Полиэтилен: физико-химические и потребительские свойства, структура потребления, области применения полиэтилена // Интернет-портал «Полимерная индустрия» [Электронный источник] Ссылка: <http://plastinfo.ru/information/articles/42/>
8. Технология производства изделий из пластмасс: Учебное пособие / М. Г. Киселев, В. А. Юрчик, С.Д. Скарулис, и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. - 152 с.
9. Свойства ПВХ-пластикатов // Аналитический портал химической промышленности [Электронный источник] Ссылка: [http://newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=1373&cat\\_id=&sword=%EА%E0%E1%E5%ЕВ%FC](http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=1373&cat_id=&sword=%EА%E0%E1%E5%ЕВ%FC)

10. Технология полимерных материалов: учебное пособие / А.Ф. Крыжановский, В.В. Бурлов и др.; под общ.ред. В.К. Крыжановского. – СПб.: Профессия, 2008. – 544 с., ил.
11. Классификация кабелей // Интернет-портал «Компьютерные сети и кабельные системы» [Электронный источник] Ссылка: <http://www.abn.ru/catalog/inf/cab/index.shtml>
12. Кабель // [Электронный источник] Ссылка: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Кабель>
13. Повышение надежности кабельных линий 6-10 кВ путем электронного выбора даты испытаний // Кабель news. – 2013. - №6. – С. 50-53
14. Особенности эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / С.С Екимов, И.Ю. Цивилев // Кабели и провода. – 2011. - №2. – С.22-27
15. Диагностика // Издательство «Открытые системы» [Электронный источник] Ссылка: <http://www.osp.ru/lan/2003/12/138371/>
16. Силовые кабели на напряжение 10-500 кВ: история развития и перспективы // Наука и техника. – 2006. - №3.
17. Об эксплуатации кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / Г. Невар // Кабель news. – 2011. - №3.
18. Старение и стабилизация полимеров // Интернет-портал «ПластЭксперт» [Электронный источник] Ссылка: <http://www.e-plastic.ru/specialistam/polimernie-materiali/starenie-i-stabilizaciya-polimerov>
19. Влияние конструкции кабельных изделий на процесс теплового старения полимерных материалов: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: спец. 05.09.02 / О. А. Анисимова; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ); науч. рук. Ю. М. Анненков.— Томск: 2010. — Библиогр.: с. 114-122.
20. ГОСТ 9.710-84 ЕСЗКС. Единая система защиты от коррозии и старения. Старение полимерных материалов. Термины и определения

21. ГОСТ Р МЭК 811-1-2-94 Общие методы испытаний материалов изоляции и оболочек электрических и оптических кабелей. Методы теплового старения
22. Основы кабельной техники: учебник для студ. высш. учеб. заведений / В.М.Леонов, И.Б. Пешков, И.Б. Рязанов, С.Д. Холодный; под ред. И.Б. Пешкова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 432 с.
23. Интернет-портал «Русский кабель» [Электронный источник] Ссылка: <http://www.ruscable.ru/>
24. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов. Справочник. М.: ФИЗМАТГИЗ. 1959. - 356 с
25. Полиэтилен высокой плотности // Аналитический портал химической промышленности [Электронный источник] Ссылка: <http://newchemistry.ru/material.php?id=3>
26. Применение полимерных материалов в кабельной промышленности / Р. И. Аблеев // Полиуретановые технологии. – 2008. - №4
27. Расчет допустимых нагрузок одножильных кабелей с пластмассовой изоляцией / Э. Т. Ларина [и др.] // Электротехника. – 1991. – № 3. – С.28–31.
28. Тадмор З., Гогос К. Теоретические основы переработки полимеров. – М.: Химия, 1984. – 632 с.
29. Бернхардт Э. Переработка термопластических материалов. – М.: Химия, 1965. – 747 с.
30. Силин В.А. Динамика процессов переработки пластмасс в червячных машинах. – М.: Машиностроение, 1972. – 150 с.
31. Исследование старения оболочки из ПВХ пластиката «нг-LS» модификации: контрольные кабели КВВГнг-LS и КВБбШвнг-LS / Шатова Е.В. // Томск. – ТПУ. – 2010 г.
32. Расчет температурных полей электрических кабелей / В.Б. Веселовский, А.В. Берлов, Н.И. Белый, В.И. Ляшенко

33. Интернет-портал «Новости электротехники» [Электронный источник] Ссылка: <http://www.news.elteh.ru/arh/2012/75/10.php>
34. Численный метод анализа нагрузочной способности высоковольтной кабельной системы / Грешняков Г.В. // Кабель news. – 2013. - №3. - С.52
35. К оценке теплового режима трехфазной линии из СПЭ-кабеля / Титков В.В. // Кабель news. – 2009. - №10. - С.47–51.
36. Кабель // [Электронный источник] Ссылка: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Кабель>
37. Ларина Э.Т. Силовые кабели и высоковольтные кабельные линии: учебник для вузов / Э. Т. Ларина. — 2-е изд., перераб. и доп.. — Москва: Энергоатомиздат, 1996. — 464 с
38. Тенденции применения некоторых полимерных материалов в кабельной промышленности / И.Б. Пешков, Е.И. Уваров // Кабели и провода. – 2013. - №2 (339).
39. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена не панацея // Кабель news. – 2010. - №11. – С.28
40. Кабели 6–10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена. Требования к прокладке / К.Кадомская, Ю.Лавров, С.кандаков // Новости электротехники. – 2005. - №6 (36).
41. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации (утв. приказом Минэнерго РФ от 19 июня 2003 г. N 229) // Система ГАРАНТ. 2016.- URL: <http://base.garant.ru/>
42. Зависимость повреждаемости кабельных муфт среднего напряжения от температуры окружающей среды / Роджер Йонген, Эдвард Гульски, Йоган // Кабель newsю – 2012. - №4.
43. Влияние различных эксплуатационных факторов на тепловые потери в бесканальных подземных трубопроводах тепловой сети / В.С. Слепченко, А.Н. Рондель, Н.Н. Шаповалов // Новости теплоснабжения. – 2002. - № 6(22). - С.18–23

44. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / Н.А. Гаврикова, Л.Р. Тухватулина, И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.В. Шаповалова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 73 с.

45. ПОТ Р О-45-009-2003 Правила по охране труда при работах на линейных сооружениях кабельных линий передачи

46. К вопросу безопасности трансформаторов и силовых кабелей // Фундаментальные исследования. – 2013. - №10.

47. ППБ 101 – 89 Правила пожарной безопасности для общеобразовательных школ, профессионально – технических училищ, школ – интернатов, детских домов, дошкольных, внешкольных и других учебно – воспитательных учреждений

48. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03 Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий

49. ГОСТ 12.1.005-88. ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.- М.: Стандартинформ, 2006

50. СанПиН 2.2.4.548–96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений

51. СН 2.2.4/2.1.8.562 – 96 Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки

52. МУ 2.2.4.706-981/МУ ОТ РМ 01-98 Физические факторы производственной среды. Оценка освещения рабочих мест. Методические указания.- М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава РФ, 1999

53. ГОСТ 12.1.006–84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности

54. ГОСТ 12.1.003 – 83. ССБТ. Шум. Общие требования безопасности

55. ПОТ Р М-016-2001, РД 153-34.0-03.150-00 от 01.07.2001 г. Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок

56. ГОСТ Р 12.1.019-2009 ССБТ. Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты

57. Проблемы обеспечения пожарной безопасности кабельных потоков / Смелков Г.И., Пехотиков В.А., Рябиков А.И. // Кабели и провода. – 2005. – № 2. – С.8-14.

58. Определение вероятности пожара от кабелей и проводов электрических сетей / Методические рекомендации. – М.: ВНИИПО МВД СССР, 1990. – 40 с.

59. Белов С.В. Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды: учебник для вузов. – М.: Изд-во Юрайт, 2013. – 671с.

60. СанПиН 2.2.2.542 – 96 Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно – вычислительным машинам и организации работы

61. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы

62. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования

63. ГОСТ Р МЭК 60287-1-3-2009 Кабели электрические. Расчет номинальной токовой нагрузки. Часть 1-3

64. Гудков В.В. Кабели. Номенклатура, выбор, эксплуатация. Справочное пособие. Изд.2. – М.: МИЭЭ, 2009.-216 с.

**Приложение А**  
**(Обязательное)**

Раздел 7

**Evaluation of environmental variation properties influence on the reliability of  
the power cable with XLPE**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5ГМ4В	Айтжанова Асель Булатовна		

Консультант кафедры ЭКМ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры ЭКМ	Шуликин С.Н.			

Консультант – лингвист кафедры ИЯЭИ:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Старший преподаватель кафедры ИЯЭИ	Федоринова З.В.	к.п.н		

## **Introduction**

The research is vital, because without taking into account the influence of the power cable field on the thermal properties of environment, it is impossible to say exactly how extensively the process of thermal aging of the cable occurs.

**The aim of the present work** is to investigate the reliability of the power cable with XLPE insulation taking into account the variation of thermal properties of the environment.

### **The objectives of the work are:**

- to analyze literature data;
- to analyze problems of work of medium voltage cables
- to make models of thermal field cable;
- to test models;
- to analyze results of the tests;
- to estimate the impact of thermal properties of the environment on the cable.

**The research object** is the power cable with XLPE insulation medium voltage.

**The research method** is the finite element method.

**The scientific novelty of this work** is to evaluate the thermal properties of the environment that affect the reliability of the power cable lines.

### **Structure and volume of the work**

Our work has of 104 pages (excluding appendix) and consists of introduction, four basic units, conclusion, reference and appendices. Each unit consists of several logically interconnected chapters followed by a conclusion where we enumerate the results of our work concerning that unit. The total outcome of the research is summarized in a separate conclusion. Our references consist of 64 sources represented by books of Russian and foreign authors.

## **1 The theoretical description of the XLPE insulated Power cables**

### **1.1 Description of the construction of the XLPE insulated Power cables**

At present there is a steady increase production and consumption of cables with insulation of cross-linked polyethylene (XLPE) on the Russian market cable and wire products. The Russian designation of these cables is a СИЭ, the English - XLPE, German - VPE, Swedish - PEX [1].

Almost all cross-linkable polyethylene compounds (XLPE) for wire and cable applications are based on LDPE. XLPE-insulated cables have a rated maximum conductor temperature of 90 °C and an emergency rating up to 140 °C, depending on the standard used. They have a conductor short-circuit rating of 250 °C. XLPE has excellent dielectric properties, making it useful for medium voltage—10 to 50 kV AC, and high voltage cables—up to 380 kV AC-voltage, and several hundred kV DC [4].

In comparison to PVC and paper-insulated cables, the advantages of XLPE-insulated medium voltage power cables are possessing a low dielectric factor, such as it is 100 times smaller than of PVC-insulated cables. The good properties of XLPE-insulated cables remain constant at a long temperature range.

Numerous modifications in the basic polymer structure can be made to maximize productivity during the manufacturing process. For medium voltage applications, reactivity can be boosted significantly. This results in higher line speeds in cases where limitations in either the curing or cooling processes within the continuous vulcanization tubes used to cross-link the insulation. XLPE insulations can be modified to limit the amount of by-product gases generated during the cross-linking process. This is particularly useful for high voltage cable and extra-high voltage cable applications, where degassing requirements can significantly lengthen cable manufacturing time [4].

Cross-linked polyethylene is widely used as electrical insulation in power cables of all voltage ranges but it is especially well suited to medium voltage

applications. It is the most common polymeric insulation material. The acronym XLPE is commonly used to denote cross-linked polyethylene insulation.

Modern cables are manufactured with XLPE insulation and are used in electric networks of different voltage class (up to 500 kV). The use of cross-linked polyethylene provides with a high dielectric insulation properties, high mechanical properties, higher thermal regimes compared with paper-oil insulation, reliability and durability of the cables.

Popularity cables with XLPE insulation is confirmed by testing for over 10 years. The main advantages of cables with XLPE insulation (XLPE insulated Power cables) for cables with paper-impregnated insulation (PII cables) [2, 3]:

- thermal stability of XLPE cables in short-circuit currents higher due to higher limit temperature, specific damageability of XLPE cables 10-15 times lower than that of BPI-cables,

- for a short time it can withstand maximum 130°C and is favourable to endure short Circuit stresses.

- it is less sensitive to the setting of the network protection.

- because of the thermosetting process taking place due the effect of cross linking, the crack resistance is increased.

- due to the chemical cross-linking internal stresses are reduced. Consequently the material is less sensitive during manufacturing process to the setting of the cooling gradient.

- the thermal resistivity of cross linked material is favourably low, compared to the thermoplastic material.

- the low dielectric loss is significant advantage.

- the excellent mechanical features of the insulation improve the protection against external effects.

- the resistance of the XLPE to acids, alkalies is outstanding and is often compensating the adverse environmental influences.

In its thermoplastic state, the maximum operating temperature of polyethylene is 75°C. Consequently, it could not match the rating of fluid-impregnated-paper-insulated cables, which have an operating temperature in the range of 80 to 90°C. This problem was solved with the advent of XLPE, which had the ability to match or exceed the thermal rating of paper insulations.

Cross-linked polyethylene (XLPE) is a thermoset material produced by the compounding of low-density polyethylene with a cross-linking agent such as dicumyl peroxide. In this process, the long-chain polyethylene molecules “cross-link” during a curing (vulcanization) process to form a material that has electrical characteristics that are similar to thermoplastic polyethylene but with better mechanical properties, particularly at high temperatures.

The rated maximum conductor temperature of XLPE-insulated cables is 90°C, with an emergency rating of up to 140°C, depending on the standard used to rate XLPE-insulated cables. Cables insulated with XLPE also have a conductor short-circuit rating of 250°C [1].

Cross-linked polyethylene has excellent dielectric properties, making it useful for a large range of voltage applications from 600 V to 500 kV.

Cables insulated with XLPE were first installed in the early 1960s. The most significant users were Germany, Japan, and the United States. As with all new innovations, unforeseen problems appeared when the use became widespread.

Polymeric or solid dielectric cables presented two main challenges. The first was water treeing in medium-voltage cables. Soon after the first XLPE-insulated cables were installed, engineers discovered that moisture ingress into the insulation, combined with imperfections that created high-electrical-stress points, lead to water-tree growth. These microcavities weakened the insulation and caused the cable to fail prematurely.

The second unforeseen problem was the significant effect of contaminants in polymer insulations used for HV cable applications. The solid metallic sheath commonly used on HV cables prevents moisture ingress, so these cables rarely fail because of water treeing. However, the drive for electrical efficiency has required HV

cables to operate at much higher stresses than their medium-voltage counterparts. The presence of contaminants (primarily high-permittivity or conductive particles) locally increases the electrical stresses to the point that electrical trees initiate. Unlike water trees these trees rapidly grow and lead to cable failure.

When the temperature was increased to 40°C, tree inception time and tree growth time increased with increases in filler loading from 0% to 3%. These enhancements in electrical tree resistance result from the increase in the charge carrier trapping density and also from the increase in cross-link network structures. These changes result in difficulty in initiating an electrical tree since more field energy is needed to enhance growth.

Cables must also be specified, designed, manufactured, tested and installed such that the desired life is delivered.

## 1.2 XLPE cable construction

A typical armoured construction which has been supplied in substantial quantities is shown in **Figure 1** below [5].

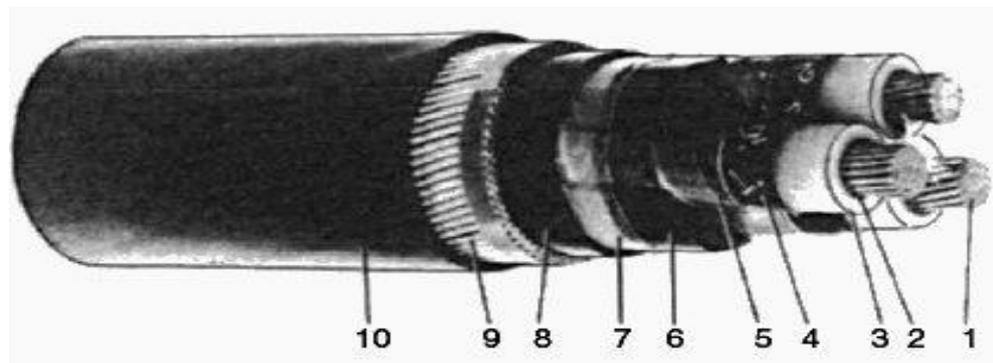


Figure 1 – XLPE cable construction

Where:

1. Circular stranded conductor
2. Semiconductor XLPE screen
3. XLPE insulation
4. Semiconducting tape screen
5. Copper tape screen

6. PVC filler
7. Binder
8. Extruded PVC sheath
9. Galvanized steel wire armour
10. Extruded PVC oversheath

Each component has an important purpose and must be selected carefully to assure that the composite cable structure will perform reliably in service. The critical structural elements of power cables are discussed in the following sections [1].

### 1. Conductor

Usually stranded copper (Cu) or aluminium (Al). Copper is densier and heavier, but more conductive than aluminium. Electrically equivalent aluminium conductors have a cross-sectional area approximately 1.6 times larger than copper, but are half the weight (which may save on material cost).

Annealing – is the process of gradually heating and cooling the conductor material to make it more malleable and less brittle.

Coating – surface coating (eg. tin, nickel, silver, lead alloy) of copper conductors is common to prevent the insulation from attacking or adhering to the copper conductor and prevents deterioration of copper at high temperatures. Tin coatings were used in the past to protect against corrosion from rubber insulation, which contained traces of the sulfur used in the vulcanising process.

### 2. Conductor Screen

A semi-conducting tape to maintain a uniform electric field and minimise electrostatic stresses (for MV/HV power cables).

### 3. Insulation

Commonly thermoplastic (eg. PVC) or thermosetting (eg. EPR, XLPE) type materials. Mineral insulation is sometimes used, but the construction of MI cables are entirely different to normal plastic / rubber insulated cables. Typically a thermosetting(eg. EPR, XLPE) or paper/lead insulation for cables under 22kV. Paper-based insulation in combination with oil or gas-filled cables are generally used for higher voltages.

Plastics are one of the more commonly used types of insulating materials for electrical conductors. It has good insulating, flexibility, and moisture-resistant qualities. Although there are many types of plastic insulating materials, thermoplastic is one of the most common. With the use of thermoplastic, the conductor temperature can be higher than with some other types of insulating materials without damage to the insulating quality of the material. Plastic insulation is normally used for low- or medium-range voltage [7].

Paper has little insulation value alone. However, when impregnated with a high grade of mineral oil, it serves as a satisfactory insulation for extremely high-voltage cables. The oil has a high dielectric strength, and tends to prevent breakdown of the paper insulation. The paper must be thoroughly saturated with the oil. The thin paper tape is wrapped in many layers around the conductors, and then soaked with oil.

**Enamel:** the wire used on the coils of meters, relays, small transformers, motor windings, and so forth, is called magnet wire. This wire is insulated with an enamel coating. The enamel is a synthetic compound of cellulose acetate (wood pulp and magnesium). In the manufacturing process, the bare wire is passed through a solution of hot enamel and then cooled. This process is repeated until the wire acquires from 6 to 10 coatings. Thickness for thickness, enamel has higher dielectric strength than rubber. It is not practical for large wires because of the expense and because the insulation is readily fractured when large wires are bent.

Mineral-insulated (MI) cable was developed to meet the needs of a noncombustible, high heat-resistant, and water-resistant cable. MI cable has from one to seven electrical conductors. These conductors are insulated in a highly compressed mineral, normally magnesium oxide, and sealed in a liquidtight, gastight metallic tube, normally made of seamless copper.

**Silk and Cotton:** in certain types of circuits (for example, communications circuits), a large number of conductors are needed, perhaps as many as several hundred. Because the insulation in this type of cable is not subjected to high voltage, the use of thin layers of silk and cotton is satisfactory.

## Operational temperature of cable insulation materials

	Operational temperature	Short-circuit temperature
LDPE*	70 °C	125 °C
XLPE*	90 °C	250 °C
EPR*	90 °C	250 °C
Mass-paper	50-55 °C	
Oil-paper	85-90 °C	

\*Abbreviations:

LDPE - *Low Density Polyethylene*

XLPE – *Cross-Linked Polyethylene*

EPR - *Ethylene propylene rubber*

### 4. Insulation Screen

A semi-conducting material that has a similar function as the conductor screen (ie. control of the electric field for MV/HV power cables).

### 5. Conductor Sheath

A conductive sheath / shield, typically of copper tape or sometimes lead alloy, is used as a shield to keep electromagnetic radiation in, and also provide a path for fault and leakage currents (sheaths are earthed at one cable end). Lead sheaths are heavier and potentially more difficult to terminate than copper tape, but generally provide better earth fault capacity.

### 6. Drain Wire (Instrument Cables)

Each screen has an associated drain wire, which assists in the termination of the screen. Typically used in instrument cables, but not in power cables.

### 7. Outer Sheath

Applied over the armour for overall mechanical, weather, chemical and electrical protection. Typically a thermoplastic (eg. PVC) or thermosetting(eg. CSP) compound, and often the same material as the bedding. Outer sheath is normally colour coded to differentiate between LV, HV and instrumentation cables. Manufacturer's markings and length markings are also printed on the outer sheath.

### 8. Conductor Protection (Appendix)

Wires and cables are generally subject to abuse. The type and amount of abuse depends on how and where they are installed and the manner in which they are used. Cables buried directly in the ground must resist moisture, chemical action, and abrasion. Wires installed in buildings must be protected against mechanical injury and overloading. Wires strung on crossarms on poles must be kept far enough apart so that the wires do not touch. Snow, ice, and strong winds make it necessary to use conductors having high tensile strength and substantial frame structures.

Generally, except for overhead transmission lines, wires or cables are protected by some form of covering. The covering may be some type of insulator like rubber or plastic. Over this, additional layers of fibrous braid or tape may be used and then covered with a finish or saturated with a protective coating. If the wire or cable is installed where it is likely to receive rough treatment, a metallic coat should be added.

The materials used to make up the conductor protection for a wire or cable are grouped into one of two categories: non-metallic or metallic.

The category of non-metallic protective coverings is divided into three areas. These areas are:

- 1) according to the material used as the covering,
- 2) according to the saturant in which the covering was impregnated, and
- 3) according to the external finish on the wire or cable.

These three areas reflect three different methods of protecting the wire or cable. These methods allow some wire or cable to be classified under more than one category. Most of the time, however, the wire or cable will be classified based upon the material used as the covering regardless of whether or not a saturant or finish is applied.

Many types of non-metallic materials are used to protect wires and cables. Fibrous braid is by far the most common and will be discussed first.

- 1) Fibrous braid is used extensively as a protective covering for cables. This braid is woven over the insulation to form a continuous covering without joints. The braid is generally saturated with asphalt, paint, or varnish to give added protection

against moisture, flame, weathering, oil, or acid. Additionally, the outside braid is often given a finish of stearin pitch and mica flakes, paint, wax, lacquer, or varnish depending on the environment where the cable is to be used.

2) Woven covers, commonly called loom, are used when exceptional abrasion-resistant qualities are required. These covers are composed of thick, heavy, long-fibered cotton yarns woven around the cable in a circular loom, much like that used on a fire hose. They are not braids, although braid covering are also woven; they are designated differently.

3) Rubber and synthetic coverings are not standardized. Different manufactures have their own special compounds designated by individual trade names. These compounds are different from the rubber compounds used to insulate cable. These compounds have been perfected not for insulation qualities but for resistance to abrasion, moisture, oil, gasoline, acids, earth solutions, and alkalies. None of these coverings will provide protection against all types of exposure. Each covering has its own particular limitations and qualifications.

4) Metallic protection is of two types: sheath or armour. As with all wires and cables, the type of protection needed will depend on the environment where the wire or cable will be used.

Lead-sheathed cable is one of three types currently being used: alloy lead, pure lead, and reinforced lead. An alloy-lead sheath is much like a pure lead sheath but is manufactured with 2-percent tin. This alloy is more resistant to gouging and abrasion during and after installation. Reinforced lead sheath is used mainly for oil-filled cables where high internal pressures can be expected. Reinforced lead sheath consists of a double lead sheath. A thin tape of hard-drawn copper, bronze, or other elastic metal (preferably nonmagnetic) is wrapped around the inner sheath. This tape gives considerable additional strength and elasticity to the sheath, but must be protected from corrosion. For this reason, a second lead sheath is applied over the tape.

## **2 The Root Cause of Power Cable Failures**

MV power cables are qualified by various manufacturers to provide a specified life of anywhere from 20 to 30 years of continued service in optimal environmental and operating conditions. Many of the MV power cables operating in commercial, electric utility, and industrial locations can be exposed to a variety of environmental and operational stressors, including elevated temperature, high UV radiation, high humidity, water submersion, and exposure to dust, dirt, and corrosive contaminants.

While deciding upon the cable sizes, derating factors for the type of cable and depth of laying, grouping, ambient temperature, ground temperature, and soil resistivity shall be taken into account.

These cables can be laid in earth, in air or in tubes.

In order to avoid any damage, the XLPE-insulated medium voltage cables should carefully laid and installed. The cable ends must be water-tight-sealed. A laying depth of 60 to 80 cm is recommended.

For laying in conduits, specially the influence of thermal insulation of air space between the cable and the inner wall of conduit should be considered. The inner diameter of the conduit should be at least 1,5 times that of the diameter of the cable.

The installation company responsible for laying the cables must heed the following parameters [8]:

- temperature range of the cable,
- bending radius of the cable,
- maximum tension of the cable,
- weight of the cable as well as
- storage and cutting.

High quality cables are required to assure that cable systems deliver the required reliability. Finding the root cause of cable failures can lead to better

maintenance practices and produce more reliable operation in the future. This in turn will lead to lower operating costs.

As an example, the final result of a cable failure may be that the insulation failed and the cable flashed over. The root cause may in fact be a building contractor removing thermally conducting back-fill around the ducts thereby causing local overheating. Determining the root cause of the failure can help prevent future failures.

Electromechanical forces resulting from the passage of high levels of short circuit current through a power cable can potentially cause mechanical damage to cable jacket and insulation material and cable conductors. High-voltage stress from lightning strikes or power system transients can also degrade the dielectric strength of cable insulation. Over time, these stressors — or combinations of stressors — can cause aging and areas of insulation stress points that will result in a gradual degradation of the cable insulation and jacket materials.

One of the fundamental aspects of the cable system is the method of installation. Cable systems can be installed in various ways including:

- In trays or troughs, either in or out doors;
- Suspended from poles, bridges, or walls of vaults or tunnels;
- Buried in ducts or conduits, or direct buried;
- Under water as a submarine cable;
- In special situations as mine trailing cables, crane cable etc.

Another aspect of the cable system is the operating environment. Some points of the operating environment, which must be considered, are:

- Cable current loading compared to cable ampacity;
- Ambient temperature;
- Type of backfill around direct buried cables or ducts;
- Moisture or chemicals in contact with the cables and accessories;
- Lightning impulses and other system induced over-voltages;
- Switching operations.

Structural defects in PVC and the presence of oxygen, acids or bases (including HCl itself) both accelerate degradation process of electrical cables. The result of the degradation processes is the alteration of the useful properties of the material; this process brings gradual generally named ageing. The factors which decrease the breakdown strength are generally identified as aging or degradation factors and are subdivided into three main categories: electrical aging, physical aging, and chemical aging.

During the examination, need to look for signs of overheating. Overheating may indicate a possible root cause of failure of the system protection, incorrect determination of the system ampacity, thermal runaway, or lack of thermal backfill. Signs of overheating may warrant further chemical or metallurgical tests to determine the maximum temperature reached. Further investigation into system operations may be necessary to determine the true root cause of this type of failure. Examples of root causes of overheating may be poor initial ampacity calculations, improper breaker settings, removal of proper backfill, or change in ambient conditions.

### **3 Thermal analysis**

Analytical and numerical approaches are available for defining current carrying capacity of power cables. Analytical approaches are based on IEC 60287 standard and there can only be applied in homogeneous ambient conditions and on simple geometries [6]. For example, formation of surrounding environment of a cable with several materials having different thermal properties, heat sources in the vicinity of the cable, non-constant temperature limit values make the analytical solution difficult. In this case, only numerical approaches can be used. Based on the general structure of power cables, especially the most preferred numerical approach among the other numerical approaches is the finite element method [6].

Losses produced by voltage applied to a cable and current flowing through its conductor, generate heat in that cable. The current carrying capacity of a cable depends on effective distribution of produced heat from the cable to the surrounding

environment. Insulating materials in cables and surrounding environment make this distribution difficult due to existence of high thermal resistances.

The current carrying capacity of power cables is defined as the maximum current value that the cable conductor can carry continuously without exceeding the limit temperature values of the cable components, in particular not exceeding that of insulating material. Numerical methods are used for calculation of temperature distribution in a cable and in its surrounding environment, based on generated heat inside the cable.

Calculations in thermal analysis are made usually by using only boundary temperature conditions, geometry, and material information. Because of difficulty in identification of the problem, analyses taking into account the effects of electrical parameters on temperature or the effects of temperature on electrical parameters are performed very rare. In numerical methods and especially in singular analyses by using the finite element method, heat sources of cables are entered to the analysis as fixed values. After defining the region and boundary conditions, temperature distribution is calculated. These losses are not constant in reality. Evaluation of loss and heating factors simultaneously allows the modeling of power cables closer to the reality.

Power cables are exposed to electrical, thermal, and mechanical stresses simultaneously depending on applied voltage and current passing through. In addition, chemical changes occur in the structure of dielectric material. In order to define the dielectric material life of power cables accelerated aging tests, which depends on voltage, frequency, and temperature are applied. Since power cables operate at high temperatures, it is very important to consider the effects of thermal stresses on aging of the cables.

Thermal ageing of polymer cables can lead to serious safety, performance and cost issues.

The main causes of ageing of polymeric cables are [9]:

- thermal degradation (leading namely to consumption of antioxidant);

- partial discharges due to manufacturing imperfections or to mechanical damage;
- water trees, i.e. tree-like micro-cracks that grow from defects when the insulation is subjected to electrical stress and moisture;
- aggression by the environment;
- losses.

Thermal degradation of organic and inorganic materials used as insulation in electrical service occurs due to the increase in temperature above the nominal value [9].

When exposed to heating, poorly formulated PVC compounds will rapidly demonstrate a loss of physical properties due to loss of plasticiser. Operation in elevated temperatures is the primary concern for cables.

When the cable is laid in the soil with moisture more than normal, it is easier to disperse the heat generated by the cable. If the heat produced remains the same, according to the principle of conservation of energy, increase in dispersed heat will result in decrease in the heat amount kept by cable, therefore cable temperature drops and cable can carry more current. In this case, it will be difficult to disperse the heat generated by the cable; the cable current carrying capacity will drop.

In the numerical calculations, the value of thermal conductivity of the soil is usually assumed to be constant. However, if the soil surrounding cable heats up, thermal conductivity varies. This leads to form a dry region around the cable.

Triangle shaped type of set-up, in which the cables contact to each other. Each cable heats up more by the effect of two adjacent cables in this placement. As a result of this analysis, cables at the bottom heated up more when compared with the cable at the top but, the difference has been found to be fairly low.

The heat generated by a cable usually has negative effect on heat exchange of the adjacent cables. In XLPE insulated cable model, when three pieces of cables are laid side by side, the cable in the middle heats up more because of both not being able to transmit its heat easily and getting heat from the side cables. This also lowers the

current carrying capacity of the center conductor. To reduce this effect it is necessary to increase the distance between cables.

Life of cables is closely linked with the operation conditions. Particularly temperature is one of the dominant factors affecting the life of a cable. An increase in temperature shortens the life of the cable. Low temperatures increase both the life and the current carrying capacity of the cable.

Tests have shown that XLPE cables can operate at a temperature of 105°C for a limited time without significantly reducing the service life of cables. To avoid undue ageing of the cables the overload should be applied for a maximum of 4 hours at any one time, for a maximum of not more than 100 hours in any consecutive months, and for not more than 500 hours in the lifetime of the cable [10].

The normal maximum operating temperature of XLPE cables is 90°C. Increasing the operating temperature of the cables will increase the rate at which the anti-oxidant is used up and hence reduce the service life. Once the anti-oxidant in the cable is used up, the XLPE will start to oxidise and become brittle. The cable will then be subject to stress cracking and electrical failure at positions of mechanical stress.

Many studies demonstrated that one diagnostic method is not sufficient to assess the condition of cable insulation. The final decision (complete or partial replacement, curing or further use) should be based on the combination of different measurement results and analyses of the failures. The correct interpretation of these results must be based on a solid experience and knowledge of the degradation processes . This assessment can be realized by means of various measurements on-site (non-destructive electrical measurements) and in the laboratory (destructive testing).

#### **4 Finite element method**

The finite element method (FEM) is a numerical technique for finding approximate solutions to boundary value problems for partial differential equations.

The simple equations that model these finite elements are then assembled into a larger system of equations that models the entire problem [6]. This powerful design tool has significantly improved both the standard of engineering designs and the methodology of the design process in many industrial applications.

FEM allows detailed visualization of where structures bend or twist, and indicates the distribution of stresses and displacements. FEM software provides a wide range of simulation options for controlling the complexity of both modeling and analysis of a system. FEM allows entire designs to be constructed, refined, and optimized before the design is manufactured.

An electromagnetic finite element method is proposed to evaluate the losses generated in the conductors and in the steels, these are then used as the heat sources for thermal analysis. In thermal analysis, the inclusion of radiation heat exchanges between external cable surface and internal duct surface makes a heat transfer problem nonlinear.

The finite elements technique is better suited for cable ampacity because of the round geometry of cables.

There are three physical mechanisms for heat transfer [11]:

- Conduction
- Convection
- Radiation

Convection of heat occurs in moving fluids (air, water, etc.) and obeys Newton's Law. The flow of heat is proportional to the temperature difference. In an underground cable installation convection takes place in the air space inside the ducts and at the surface of the earth. The Stefan-Boltzmann Law describes the radiation of heat phenomenon as being proportional to the difference the temperatures at the power of four. In underground cables radiation of heat occurs from the cable(s) to the ducts.

The heat sources in cable installations can be divided into two generic groups: heat generated in conductors and heat generated in insulators. The losses in the metallic (conductors) elements are by far the most significant losses in a cable and

they are caused by: (a) Joule losses due to impressed currents, circulating currents or induced (eddy current) losses; (b) Hysteresis losses in conductors that are also magnetic.

The following metallic components of a cable system will produce heat:

- Core conductors
- Sheaths
- Concentric neutrals
- Armors
- Skid wires
- Pipes/ducts

Insulating materials also produce heat. The heat produced in the insulating layers is only important under certain high voltage conditions. The following components could be considered [6]:

- Main insulation
- Shields
- Screens
- Jackets
- Beddings/servings

In an underground cable system the main heat transfer mechanism is by conduction. With the exception of the air inside the conduits in duct banks or buried ducts installations all the heat is transferred by conduction. Since the longitudinal dimension of a cable is always much larger than the depth of the installation, the problem becomes a two-dimensional heat conduction problem.

Since numerical solutions require of the solution of a large number of linear (or nonlinear) equations only with the powerful computers available nowadays, FEM is becoming practical to get numerical solutions for cable rating purposes [11].

The thermal analysis objective is to provide the temperature distribution for subsequent stress analysis. The thermal strain is proportional to the temperature change from initial conditions and the coefficient of thermal expansion. In practice

components will have a more complex temperature distribution and distribution of thermal properties as well as mechanical boundary conditions and will develop thermal stresses throughout, even if nominally free to expand.

Thermal FEA solutions are relatively straightforward to set up, however obtaining the required accuracy, idealization methods and mesh discretization can be challenging. A smooth temperature contour plot is not a very good indicator; instead the heat flux convergence is a better guide and is analogous to the stress convergence in a structural solution. If the ultimate goal is a structural analysis with thermal strain loading then the accuracy and sensitivity of this analysis with respect to the thermal modeling is the criterion to judge the analysis by.

## **Conclusion**

From the outcome of our investigation it is possible to conclude that results will be used in the design, manufacture and operation of cables with XLPE insulated medium voltage, and for decision-making in the course of the working resource of the cable line.

## References

1. Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена: устройство, конструкции, преимущества, области применения // [Электронный источник] Ссылка: <http://electricalschool.info>
2. Кабели среднего напряжения: сшитый полиэтилен или бумага / А. Саитгалеев // Кабель news. -2013. - №4.
3. Интернет-портал «Справочник электротехники» // [Электронный источник] Ссылка: <http://electricalschool.info>
4. Технология производства изделий из пластмасс: Учебное пособие / М. Г. Киселев, В. А. Юрчик, С.Д. Скарулис, и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2004. - 152 с.
5. Cross-linked polyethylene // URL: <https://en.wikipedia.org/>
6. Electrical engineering portal // URL: <http://electrical-engineering-portal.com>
7. Hwang, C. C. & Jiang, Y. H. (2003). "Extensions to the finite element method for thermal analysis of underground cable systems", Elsevier Electric Power Systems Research, Vol. 64, pp. 159-164.
8. Hirschler, M. M. (1992). Heat release from plastic materials. In: Brabauskas V, Grayson SJ, editors. Heat release in fires. London, UK: Elsevier Applied Science.
9. Pielichowski, K. & Njuguna, J. (2005). Thermal degradation of polymeric materials. Shropshire, UK: Rapra Technology Limited.
10. Wilkie, C.A, Levchik, S.V. & Levchik, G.F. (2001). Is there a correlation between crosslinking and thermal stability? In: Al-Malaika S, Golovoy A, Wilkie CA, editors. Specialty polymer additives: principles and application. Oxford, UK: Blackwell Science.
11. Brenner, S. & Scott, R. (1994). The Mathematical Theory of Finite Element Methods. Springer-Verlag, Corr. 2nd printing.