

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА КАБЕЛЯ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА



А. Н. Назаркина, студентка,
e-mail: nazarkina-alexandra@mail.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

О. А. Клёсов, студент,
e-mail: klesov69@yandex.ru
ФГБОУ ВО «Калининградский государственный
технический университет»

Вопрос определения температуры нагрева изоляции кабеля в условиях эксплуатации является актуальной и сложной задачей в электроэнергетике. В статье исследован тепловой режим группы однофазных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена при помощи математического моделирования. Математическая модель стационарного теплового поля подземной кабельной линии была разработана на основе метода конечных элементов в программном комплексе ELCUT. Представлены результаты распределения температуры в исследуемом кабельном канале и окружающем грунте для различных вариантов прокладки кабелей в условиях рабочего режима. На основании полученных данных были сделаны выводы относительно влияния расположения и межфазного расстояния на сценарий развития тепловых процессов.

Ключевые слова: *одножильный силовой кабель, изоляция из сшитого полиэтилена, тепловой режим, подземная кабельная линия, математическое моделирование, метод конечных элементов, токопроводящая жила, электропроводящий экран, магнитное поле, тепловое поле*

ВВЕДЕНИЕ

Массовое применение силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена обуславливает актуальную задачу расчета их электромагнитных и тепловых параметров. На практике чаще применяют кабели однофазного исполнения. Это облегчает монтаж, позволяя использовать большие номинальные сечения жилы и строительные длины. Однако со временем была обнаружена проблема их термической стойкости.

Статистика причин повреждений кабельных линий по данным ОАО «Россети» представлены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Основные причины повреждений кабельных линий

Анализ причин показал, что основные ошибки возникают на стадии сооружения кабельных линий по условиям их прокладки.

Прокладка кабелей осуществляется различными способами, но зачастую в стесненных городских условиях кабельные линии прокладывают в подземном канале. Одним из ключевых недостатков подземных кабелей является их существенный перегрев в местах, где зачастую кабели прокладываются группами пофазно.

На повышенный нагрев влияет переменное магнитное поле, возникающее при протекании переменного тока по жилам кабелей, что приводит к потерям энергии в металлических экранах из-за наличия вихревых токов [1]. Из-за того, что сечение этих экранов значительно меньше сечения токоведущей жилы, то в них возникает существенное тепловыделение, которое приводит к выходу из строя кабелей по причине превышения рабочих температур.

Потери в экранах возникают только в одножильных кабелях и связаны со взаимным расположением кабелей относительно друг друга [1]. Суммарное воздействие теплового и магнитного полей приводит к ухудшению электрических и механических свойств изоляции, и, как следствие, к сокращению срока службы кабеля. Применяемые на практике системы профилактического контроля не всегда способны своевременно выявить постепенное ухудшение свойств изоляции. Ее внезапный выход из строя приводит к таким последствиям как нарушения электроснабжения потребителей, возникновение перенапряжений, возгорания, взрывы, электротравмы [2, 3]. Для предотвращения этих последствий важно исследовать влияние полей на нагрев кабельных линий.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом данного исследования является тепловой режим подземной однофазной кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена при различных способах прокладки, с учетом протекающих электромагнитных процессов и теплопроводности.

ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование теплового режима подземной кабельной линии невозможно без глубокого понимания процессов тепломассопереноса в кабельном канале с учетом влияния электромагнитного и теплового поля.

Одновременно учитывать сложный тепломассоперенос и проводить оценку эффективности мероприятий по снижению температурного воздействия на кабельные линии способна математическая модель.

Разработать модель подземной кабельной линии для изучения ее теплового режима возможно с помощью метода конечных элементов в программном комплексе ELCUT [4].

Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую модель стационарного теплового поля подземной кабельной линии на основе метода конечных элементов в программном комплексе ELCUT.
2. Исследовать зависимости температуры изоляции от расстояния между пофазно проложенными кабелями.
3. Определить наиболее рациональный способ прокладки силовых кабельных линий, с точки зрения их нагрева.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работе использовались следующие методы научного исследования: анализ литературы по теме исследования, а также математическое моделирование электромагнитных и тепловых полей, используя метод конечных элементов в сочетании с уравнениями подключенной электрической цепи в программном комплексе ELCUT.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подземная кабельная линия рассматривалась при часто используемых вариантах расположения группы однофазных кабелей: расположенных треугольником встык и в одной плоскости с дистанцией, равной диаметру кабеля (90 мм) [5]. Решение задачи включало несколько этапов. На первом этапе решалась задача «Магнитное поле переменных токов» для нахождения мощности тепловых потерь в экране силового кабеля, возникающей за счет наведенных токов [6].

На втором этапе с учетом найденных тепловых потерь в экране решалась задача «Теплопередача стационарная» с учетом конвективного теплообмена и теплопроводности в кабельном канале [6].

Для моделирования был выбран кабель ПвП2г 1х1000/185 мм². Технические характеристики кабеля представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики кабеля ПвП2г 1х1000/185 мм²

Сечение токоведущей жилы, мм ²	1000
Площадь поперечного сечения металлического экрана, мм ²	185
Материал токоведущей жилы	Медь
Материал экрана	Медь
Длительная допустимая температура жилы, °С	90
Длительно допустимый ток при прокладке в земле (расположение треугольником/ расположение в ряд), А	1009/841
Номинальная частота, Гц	50
Область применения	Для прокладки в земле в независимости от степени коррозионной активности грунта (в траншеях, бетонных лотках, грунте)

Работа в программе ELCUT начинается с построения расчетной геометрической модели, которая представлена на рисунке 2.

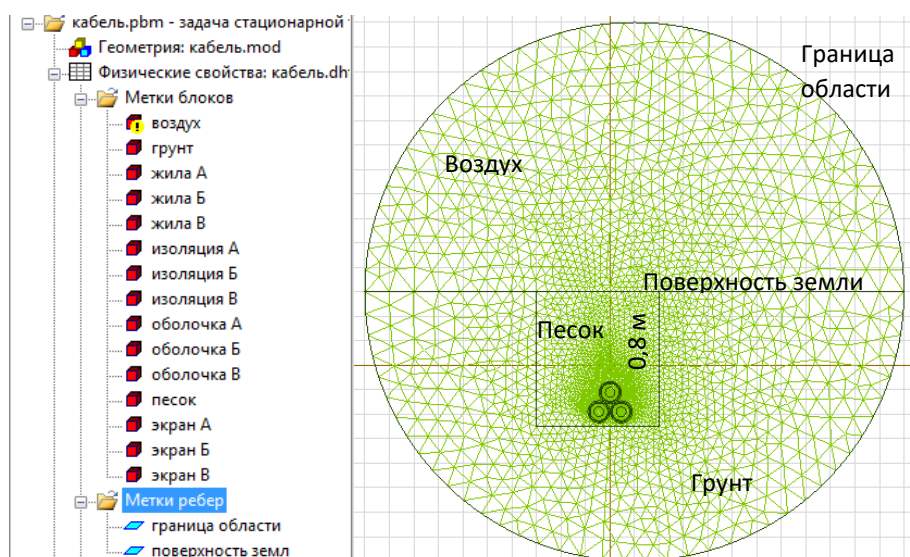


Рисунок 2 - Геометрическая модель кабельной линии (способ прокладки – треугольником)

Магнитная задача решалась совместно с уравнением электрической цепи, описывающей схему заземления экранов и систему питания жил с источниками тока [7].

Амплитудное значение тока, протекающего через жилу - 1кА, в двух других жилах протекает тот же ток, но смещенный по фазе на 120°. При таком токе температура в жилах не поднимется выше допустимых значений - 90 °С.

Созданная электрическая цепь представлена на рисунке 3.

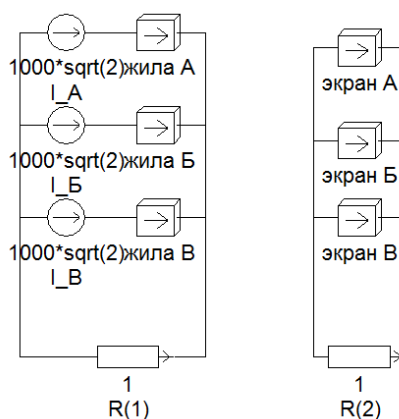


Рисунок 3 – Электрическая цепь

Физические свойства материалов были заданы следующими параметрами Магнитная проницаемость основных материалов - 1 Гн/м. Значение электропроводности для жил и экранов принято равным $56 \cdot 10^6$ См.

В результате электромагнитного расчета сформировано поле, где цветным градиентом показаны усреднённые потери в элементах кабеля и распределение внешнего магнитного поля. Модель представлена на рисунке 4.

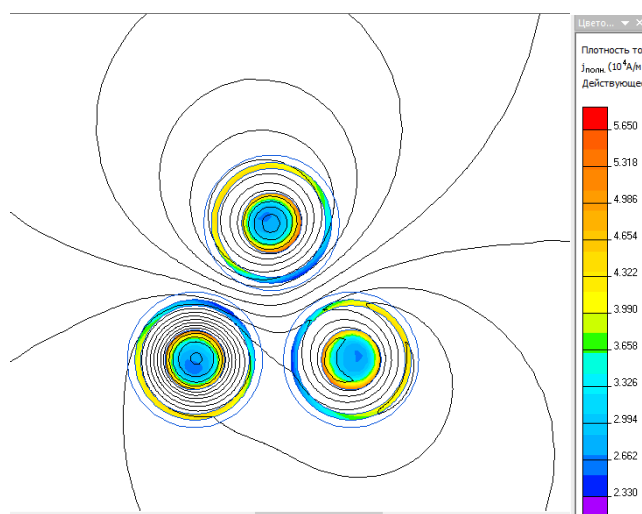


Рисунок 4 – Магнитное поле переменных токов

Магнитное поле распространяется за пределами кабеля. Видно, что распределение плотности тока неравномерно по сечению и ток есть не только в центральной жиле, но и в экране. Значения токов в экране кабелей представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Значение токов в экране

Треугольник	В ряд горизонтально	В ряд вертикально
875 А	885 А	891 А
893 А	1025 А	875 А
903 А	916 А	1029 А

Как видно из таблицы 2, при прокладке в ряд токи в экранах различных фаз заметно отличаются. А в жилах наоборот наблюдаем равное значение тока в каждой фазе.

Как известно, состояние изоляции кабеля оценивается током утечки и его асимметрией (разницей токов) по фазам [8]. Поэтому у одножильных кабелей, собранных в трехфазную группу, измеряется токораспределение. В соответствии с нормативными техническими документами ПУЭ и ПТЭЭП неравномерность распределения токов на одножильных кабельных линиях должна быть не более 10 %.

Этот способ проверки состояния кабельных линий был реализован при проведении испытаний после монтажа кабельной линии АПвПу2г 3х150/35. Измерения производились токоизмерительными клещами – мультиметром М-266С. При испытании протекающий ток был равен 0,5 А, ток измерялся в каждой фазе. Результатом были значения, неравномерность которых не превышала 5 %. После полученных результатов была разработана математическая модель кабельной линии, где задавался тот же ток, затем токи в фазах сравнивались с данными испытаний. Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Сравнение значений токов в экране при испытании и моделировании

Испытание	Моделирование
0,41 А	0,46
0,42 А	0,46
0,38 А	0,43

Как видно, расчеты достаточно близко согласуются с данными испытаний, а значит математическая модель верно описывает процессы, происходящие в кабельном канале.

Для моделирования поля температур использована задача ELCUT «Теплопередача стационарная», обусловленная плотностью мощности потерь, которые импортируются из магнитной задачи при помощи функции связки задач [4]. В задаче теплопередачи значения теплопроводности заданы из таблицы 4.

Таблица 4 – Значения теплопроводности конструктивных элементов кабеля

Конструктивные элементы кабеля	Значения теплопроводности, Вт/м·К
Медная жила	380
Изоляции из СПЭ	0,3
Медный экран	380
Оболочка из СПЭ	0,3
Грунт	1
Песок	0,8

В данной задаче воздух не моделируем, так как тепло забирается за счет конвекции. В границе области задан нулевой тепловой поток, а на поверхности земли условия конвекции приняты равными $10 \text{ Вт/К}\cdot\text{м}^2$.

Температурное поле, построенное по результатам расчетов методом конечных элементов, представлено на рисунке 5.

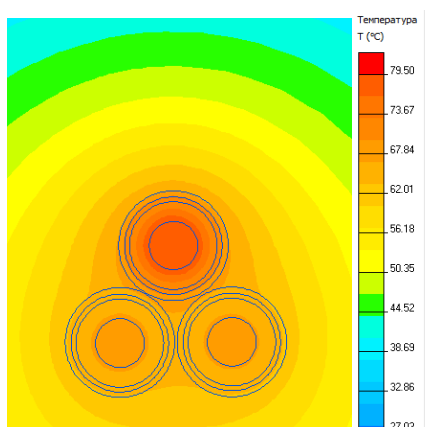


Рисунок 5 – Распределение температуры кабельной линии при прокладке треугольником

Модель позволяет рассчитать температуру линии каждого слоя, из которого состоит кабель. По результатам видно, что тепловыделение неравномерно и наиболее прогретым является первый кабель (79.50°C), что связано со сложным движением воздушного потока [9].

Кроме того, рассмотрены варианты расположения кабелей в горизонтальной и вертикальной плоскости. На рисунке 6 представлены температурные поля для данных вариантов прокладки.

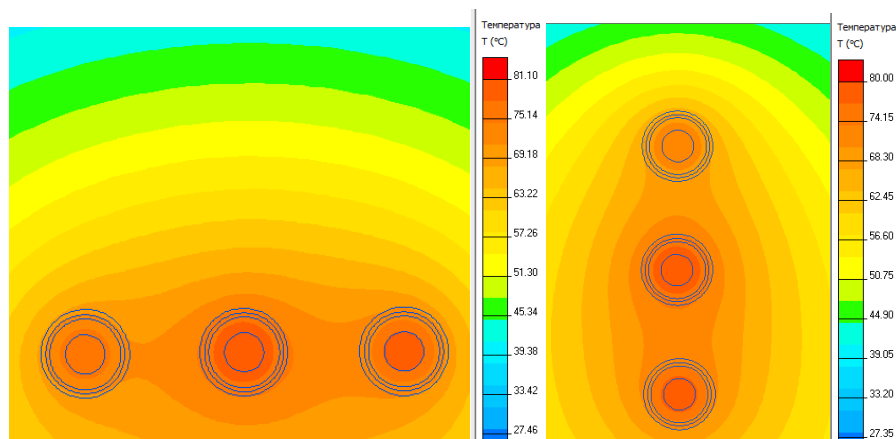


Рисунок 6 – Прокладка кабелей в горизонтальной плоскости и вертикальной плоскости

Максимальная температура на поверхности жилы центрального силового кабеля при прокладке в горизонтальной плоскости составила 81.10 °С, а в вертикальной 80.00 °С.

Таким образом, минимальная температура наблюдается при прокладке треугольником. Поэтому на данном этапе сделан вывод о целесообразности выбора в качестве способа прокладки – треугольник.

Следующим этапом проведена оценка зависимости уменьшения температуры в жиле благодаря увеличению межфазного расстояния. Результаты исследования представлены в виде графиков на рисунке 7.

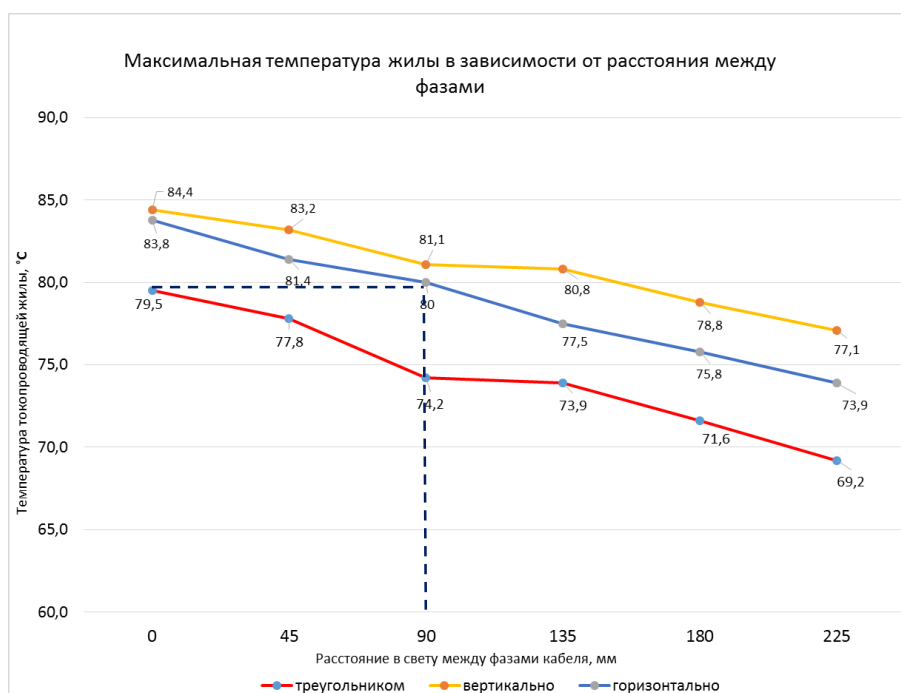


Рисунок 7 – График зависимости максимальной температуры жилы от расстояния между фазами

Из анализа графика можно утверждать, что зависимость существенна и самым рациональным способом прокладки является треугольник. Наименее благоприятным является прокладка линий в горизонтальной плоскости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что способ прокладки кабельных линий оказывает существенное влияние на реализуемое температурное поле в подземном кабельном канале.

С температурной точки зрения прокладка треугольником предпочтительнее, так как обеспечиваются минимальные токи в экранах и для городских условий, такая система занимает мало места.

При прокладке в ряд с просветом потери в экранах существенно возрастают по мере увеличения расстояния между фазами. Поэтому если прокладку предполагается выполнить в ряд, то следует уделять особое внимание взаимному расположению кабелей, склоняясь к такому варианту, который обеспечит минимальные токи в экранах и жилах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гринюк, М. С. Прогнозирование остаточного ресурса силовых кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена: специальность 13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Гринюк Михаил Сергеевич; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - Томск, 2019. - 123 с.
2. Kazhekin I.E. Influence of Non-Linear Load on Single-Phase Fault Current in Electrical Networks with Isolated Neutral/ I. E. Kazhekin, S. P. Finko // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon), Magnitogorsk, Russian Federation, 2022, pp. 330-335, doi: 10.1109/UralCon54942.2022.9906778.
3. Kazhekin I.E. Prevention of Ferroresonant Processes in Microgrid Operating in Island Mode/ I.E. Kazhekin, M.S. Kharitonov// Energy Ecosystems: Prospects and Challenges. EcoSystConfKlgtu 2022. Lecture Notes in Networks and Systems (Scopus), vol 626. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24820-7_8

4. ELCUT. Моделирование электромагнитных, тепловых и упругих полей методом конечных элементов. Версия 6.6: Руководство пользователя. – Санкт-Петербург, ООО «Тор», 2021 [электронный ресурс] URL: https://elcut.ru/downloads/manual_r.pdf (дата обращения 28.02.2023)

5. Правила устройства электроустановок // Информатика. – 2019. - 462 с.

6. Навалихина, Е. Ю. Математическое моделирование тепловых и электромагнитных процессов при определении допустимых токовых нагрузок кабельных линий / Е. Ю. Навалихина, Н. М. Труфанова. – Текст: непосредственный // Техника и технологии в энергетике: Известия Томского политехнического университета / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь, 2014. – Т. 325. № 4. - С. 82-90.

7. Дубицкий С.Д. Управление магнитным полем подземной кабельной линии / С. Д. Дубицкий, Г.В. Грешняков, Н.В. Коровкин. - Текст: электронный // Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 88-100. – URL: https://elcut.ru/publications/underground_cable_field.htm (дата обращения: 28.02.2023)

8. Айтжанова, А. Б. Оценка влияния вариации свойств окружающей среды на надежность силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена: специальность 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»: автореферат магистерской диссертации / Айтжанова Асель Булатовна; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. - Томск, 2016. – 125 с.

9. Навалихина, Е.Ю. Исследование конвективного теплообмена в кабельном канале, проложенном в земле / Е.Ю. Навалихина, Н.М. Труфанова. – Текст: непосредственный // Механика: Вестник ПНИПУ / Пермский национальный исследовательский политехнический университет. – Пермь, 2012. – №1. – С. 93-103.

THE RESULTS OF STUDIES OF THE THERMAL REGIME OF A CABLE WITH INSULATION MADE OF CROSS-LINKED POLYETHYLENE

A.N. Nazarkina, student,
e-mail: nazarkina-alexsandra@mail.ru
Kaliningrad State Technical University

O.A. Klesov, student,
e-mail: klesov69@yandex.ru
Kaliningrad State Technical University

The issue of determining the heating temperature of cable insulation under operating conditions is an urgent and difficult task in the electric power industry. In this article, the thermal regime of a group of single-phase cables with cross-linked polyethylene insulation is investigated using mathematical modeling. A mathematical model of the stationary thermal field of an underground cable line was developed based on the finite element method in the ELCUT software package. The results of the temperature distribution in the investigated cable duct and the surrounding soil for various cable laying options under operating conditions are presented. Based on the data obtained, conclusions were drawn regarding the influence of the location and interfacial distance on the scenario of the development of thermal processes.

Keywords: single-core power cable, cross-linked polyethylene insulation, thermal regime, cable line, mathematical modeling, finite element method, laying in the ground, conductive core, conductive shield, magnetic field, thermal field